

Université de Montréal

**Conception du réseau de distribution d'une entreprise de livraison de courrier
rapide**

par
Amine Ikama

Département d'informatique et de recherche opérationnelle
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)
en informatique

Août, 2016

© Amine Ikama, 2016.

RÉSUMÉ

Les problèmes de conception de réseaux pour les entreprises de livraison de courrier rapide connaissent un intérêt croissant. Parmi ces réseaux, ceux appelés «*hub-and-spoke*», présentent plusieurs avantages en terme d'efficacité (par exemple, la réduction du nombre de routes possibles). Ils ont, cependant, quelques inconvénients. Par exemple, le développement des services de commerce électronique impose que les marchandises commandées sur internet à tout moment de la journée puissent être livrées le jour même. La structure de ces réseaux ne permet pas d'assurer ce genre de livraisons appelé «*same-day delivery*».

Nous nous intéressons dans ce mémoire au cas d'une entreprise de livraison de courrier rapide. Nous développons des modèles et des méthodes afin d'étudier les activités de l'entreprise et d'améliorer son efficacité. Il s'agit d'examiner la localisation des terminaux et de proposer une meilleure configuration, tout en étudiant les différentes façons de gérer le flux sur le réseau. L'objectif est de minimiser les coûts variables de transport et les coûts fixes d'installation ou de gestion des terminaux.

Nous avons testé nos modèles en nous basant sur différents scénarios. Les résultats obtenus permettent de réduire les coûts globaux jusqu'à 22% dans certains cas.

Mots clés: Livraison de courrier rapide, réseau *hub-and-spoke*, conception de réseau, localisation-tournées, localisation-affectation.

ABSTRACT

Major express package delivery companies exploit hub-and-spoke networks, where regional hubs are connected to a number of terminals. Such networks have obvious advantages in terms of effectiveness (for instance, reducing the number of possible routes and thus facilitating parcel tracking) and quality of service (by ensuring next-day delivery). They have, however, some drawbacks. One of them is that it is not adapted to the current trend of "same-day delivery" that follows the development of e-commerce services, where goods ordered on the Internet at any time of the day can be delivered the same day.

We focus in this work on a courier delivery company. We develop models and methods to study the activities of the company and improve its efficiency. We develop models and solution methods to address the issues faced by the company. In particular, we investigate several configurations of the terminals, by closing some of them and relocating their operations to the regional hub or to other terminals, while trying to improve the management of the flows on the network. The objective is to minimize the transportation costs and the fixed costs of opening of operating facilities.

We test our models on real instances, based on three different scenarios. Numerical results show that our models reduce overall costs up to 22 % in some cases.

Keywords: Express package delivery, hub-and-spoke network, facility location, hub location, location-routing.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
ABSTRACT	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES	viii
REMERCIEMENTS	ix
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 : DESCRIPTION ET ANALYSE	3
2.1 Purolator	3
2.2 Organisation	3
2.2.1 Réseau	3
2.2.2 Description des opérations journalières	4
2.2.3 Contexte du projet	5
2.3 Problèmes relevés	6
2.3.1 Limitations du modèle « next-day delivery »	6
2.3.2 Déplacements superflus sur le réseau	7
2.3.3 Sous-utilisation du hub	8
2.3.4 Localisation des terminaux	8
2.4 Objectifs du projet	8

CHAPITRE 3 :	REVUE DE LITTÉRATURE	10
3.1	Réseaux « <i>hub-and-spoke</i> »	10
3.2	Littérature sur la livraison de courrier rapide	11
3.2.1	Planification stratégique	11
3.2.2	Planification tactique	13
3.2.3	Planification opérationnelle	15
3.3	Problèmes de localisation-tournées	16
3.3.1	Description	16
3.3.2	Le PLT dans le contexte de la livraison de courrier rapide	18
CHAPITRE 4 :	CONCEPTION DU RÉSEAU ET MODÉLISATION	19
4.1	Réseau actuel	19
4.2	Méthodologie de modélisation	20
4.3	Utilisation du hub comme terminal	20
4.3.1	Description	20
4.3.2	Données	22
4.3.3	Hypothèses	23
4.3.4	Modélisation	25
4.4	Mouvements intra-terminal	27
4.4.1	Description	27
4.4.2	Modélisation	28
4.5	Mouvements inter-terminaux	30
4.5.1	Description	30
CHAPITRE 5 :	RÉSULTATS	35
5.1	Données, instances et environnement	35
5.1.1	Extraction des historiques de cueillettes et de livraisons	35

5.1.2	Calcul des coûts de transport	37
5.1.3	Autres données	39
5.1.4	Environnement	40
5.2	Tests effectués	40
5.2.1	Sans modification des déplacements sur le réseau	41
5.2.2	Avec modification des déplacements sur le réseau	46
5.3	Analyse des résultats et conclusions	48
CHAPITRE 6 : CONCLUSION		51

LISTE DES TABLEAUX

5.I	Comparaison des coûts journaliers moyens du 1 ^{er} scénario	42
5.II	Comparaison des coûts journaliers moyens des trois scénarios . .	45
5.III	Gains obtenus en réduisant le coût total	47
5.IV	Pourcentages de colis “intra-terminal”	48
5.V	Pourcentages de colis “intra-terminal” et “inter-terminaux”	48

LISTE DES FIGURES

2.1	Emplacements des terminaux de Montréal	7
2.2	Distribution des clients servis par le terminal de ville Saint-Pierre.	9
3.1	Exemple d'un réseau « <i>hub-and-spoke</i> » avec deux niveaux d'installations	12
4.1	Description du réseau actuel	21
4.2	Description du réseau "hub-terminal"	21
4.3	Description du réseau "intra-terminal"	28
4.4	Description du réseau "inter-terminaux"	31
5.1	Extrait du fichier d'historiques de livraisons	37
5.2	Données historiques disponibles	38
5.3	Évolution du volume de cueillettes et de livraisons	38
5.4	Évolution de l'affectation des clients aux terminaux (1 ^{er} scénario)	43
5.5	Affectation des clients aux terminaux (2 ^e scénario)	43
5.6	Localisation du nouveau terminal au centre-ville	45
5.7	Affectation des clients aux terminaux (3 ^e scénario)	46
5.8	Gains journaliers sur la période étudiée pour les différents scénarios	50

REMERCIEMENTS

En tout premier lieu, je remercie Allah tout puissant de m'avoir donné la force et la volonté nécessaire à la réalisation de ce travail.

Je tiens à adresser mes remerciements et ma gratitude à mon directeur de recherche Bernard Gendron, pour son support, sa disponibilité et ses directives tout au long de ce travail.

Je remercie également Emma Frejinger et Ammar Metnani pour leurs contributions à la réussite de cette maîtrise.

Je remercie mes parents, mon frère et mon épouse, qui malgré la distance, se sont toujours montrés présents, m'ont soutenu et encouragé à suivre ma voie. Une pensée à ma défunte sœur, qui avait un grand respect pour les études.

Je remercie MITACS et Purolator pour leur soutien financier apporté au cours de ce projet.

Enfin, que tous ceux et celles que j'ai involontairement oublié et qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail, trouvent ici l'expression de ma gratitude.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Suite au développement des services de commerce électronique, l'industrie de la livraison de courrier rapide a connu une forte croissance. Le marché de la livraison de colis a été le segment de transport ayant connu la plus forte croissance aux États-Unis au cours des deux dernières décennies. Le cabinet de conseil *Oxford Economic* [1] estime à 1,3 millions, le nombre d'emplois directs créés par l'industrie à travers le monde (plus que l'industrie du raffinage du pétrole), et à 2.75 millions, le nombre d'emplois indirects. La même étude affirme que l'industrie de la livraison de courrier rapide a contribué, en 2008, à hauteur de 80 milliard de dollars, au produit intérieur brut mondial, et que sa part augmente.

Les entreprises de livraison de courrier rapide exploitent des réseaux appelés « *hub-and-spoke* », ce qui implique l'exploitation d'un réseau où chaque noeud peut être expéditeur et/ou destinataire. Les colis doivent être acheminés simultanément entre toutes les paires origine-destination. Comme le flux entre la plupart des paires est trop faible pour être livré sur un véhicule dédié, les colis sont généralement consolidés et acheminés conjointement sur la majeure partie de leurs voyages depuis leurs origines jusqu'à leurs destinations. Dès lors, des décisions doivent être prises quant à la localisation et l'allocation des installations où les colis seront consolidés et triés. Il est également nécessaire de considérer les tournées de véhicules qui seront utilisées pour servir les clients à partir de ces installations. De tels problèmes sont connus dans la littérature comme des problèmes de localisation-tournées ou « *location-routing problems* ».

La résolution de ce type de problèmes est particulièrement difficile à cause des décisions de localisation et de tournées de véhicules qui doivent être prises simultanément.

Le travail présenté dans ce mémoire est basé sur le cas pratique du réseau local de Montréal opéré par Purolator, une compagnie de livraison de courrier rapide canadienne. Nous proposons trois modèles de localisation-affectation représentant différentes perspectives de gestion de flux dans le réseau. Les tournées de véhicules sont calculées séparément et intégrées aux modèles sous forme de coûts de transport.

Nous décrivons dans le chapitre 2 de ce mémoire les activités de Purolator. Nous analysons les spécificités du réseau de l'entreprise sur l'île de Montréal et nous identifions certains problèmes qui causent des pertes au niveau des coûts globaux. Dans le chapitre 3, nous donnons un aperçu général des problèmes d'optimisation liés aux réseaux «*hub-and-spoke*». Nous passerons également en revue quelques travaux traitant de la livraison de courrier rapide. Le chapitre 4 comporte les éléments clés de notre mémoire. Nous y présentons les modèles que nous avons développés afin de répondre aux problématiques soulevées dans le chapitre 2. Enfin, nous présentons dans le chapitre 5 les expérimentations effectuées pour tester nos modèles, ainsi que les résultats que nous avons obtenus.

CHAPITRE 2

DESCRIPTION ET ANALYSE

Nous présentons dans ce chapitre les activités de Purolator en général, ainsi que la structure du réseau de distribution et l'organisation des opérations dans le temps et l'espace. Nous nous intéressons ensuite à la région de Montréal sur laquelle porte notre étude, en dégagant les problématiques qui sont traitées dans la suite du mémoire.

2.1 Purolator

Purolator est une entreprise postale canadienne dont le siège est à Mississauga. Elle est détenue majoritairement par la Société canadienne des postes. L'entreprise fondée en 1967 sous le nom de Trans Canada Couriers a réalisé un chiffre d'affaire de 1,68 milliard de dollars pour l'année 2014. Purolator emploie 11 000 personnes dont plus de 3 200 sont des livreurs, exploite 194 installations de collecte et centres d'expédition, et possède un parc de 3535 de camions dont 560 véhicules électriques hybrides. Consciente du poids que représente la livraison au client final («*last mile delivery*») en terme de coût (de 28% à 35% du coût total) et de l'impact des camions de livraison sur l'environnement et sur la congestion des grands centres urbains, l'entreprise cherche à améliorer son réseau de distribution afin de réduire ses coûts et augmenter sa compétitivité sur le marché.

2.2 Organisation

2.2.1 Réseau

Purolator exploite un réseau «*hub-and-spoke*», où les centres régionaux sont reliés à un certain nombre de terminaux. Ce genre de réseaux, avec deux niveaux d'installations,

est particulièrement adapté aux activités de livraison de courrier rapide et présente des avantages opérationnels en réduisant les coûts de transport. D'abord, les terminaux, via leurs flottes de camions, se chargent des tournées de cueillette et de livraison. Les colis cueillis sont alors regroupés, puis envoyés aux centres de tri (hubs). Ils y seront ensuite triés et acheminés vers le terminal de destination.

La plupart des colis passent par un terminal avant d'être acheminés au hub. Toutefois, lorsqu'une grande quantité de colis doit être collectée chez un client de grande taille (une usine, par exemple) et qu'il est justifié d'utiliser un camion dédié, des cueillettes spéciales sont alors effectuées. Appelés « *city bulk* », ces voyages se font directement depuis le client vers le hub sans passer par le terminal. À noter que ces voyages « *city bulk* » ne représentent qu'une petite portion de la quantité totale traitée au hub. Nous verrons par la suite que ces voyages spéciaux ne seront pas intégrés dans nos modèles, car ils sont indépendants de la localisation des terminaux.

2.2.2 Description des opérations journalières

Les opérations de cueillette et de livraison, ainsi que les tâches de tri et de consolidation doivent se conformer à des horaires précis, qui définissent ce qu'on appelle le modèle «*next day delivery*» :

1. **12h - 18h** : cueillette, ramassage chez le client et transport vers le terminal (ou directement vers le hub dans le cas des voyages « *city bulk* »).
2. **17h - 21h** : tri des colis au terminal.
3. **21h - 00h** : envoi des colis depuis le terminal vers le hub.
4. **16h - 8h** : tri des colis au hub (les colis « *city bulk* » sont triés dans l'après-midi, alors que les colis provenant de l'extérieur sont triés au fur et à mesure de leurs arrivées).

5. **23h - 7h** : envoi des colis depuis le hub vers le terminal.
6. **2h - 9h** : tri des colis au terminal.
7. **7h - 23h** : livraison, transport depuis le terminal vers le client final.

Ces horaires se chevauchent et représentent la séquence des opérations depuis la collecte à la source jusqu'à la livraison à la destination. Les opérations de cueillettes et livraisons sont indépendantes les unes des autres. Ainsi, les cueillettes (1) ont lieu durant l'après-midi et se terminent à 18h afin de laisser place aux opérations de tri durant la soirée. Les livraisons (7) se font généralement durant la matinée (suivant les contraintes contractuelles, des clients doivent recevoir leurs colis avant le début des horaires de travail, c'est-à-dire entre 7h et 9h), mais aussi tout au long de la journée suivant la réception des colis depuis le hub. Les opérations de tri des colis collectés (2) commencent dès que les cueillettes sont terminées. Le tri à ce niveau est nécessaire afin d'identifier la destination des colis : il existe en effet des liaisons qui permettent d'aller directement depuis le terminal d'origine vers le hub de destination (par exemple, des expéditions sont faites directement depuis des terminaux à Toronto vers le hub de Montréal). De même, il est nécessaire de trier les colis provenant du hub (6) afin d'identifier leurs destinations finales et de les affecter aux bons camions de livraison. Les opérations 3, 4 et 5 permettent de transférer les colis depuis le terminal d'origine vers le terminal de destination en passant par le hub.

2.2.3 Contexte du projet

Nous nous intéressons dans notre étude au réseau de distribution de l'entreprise sur l'île de Montréal. Comme l'illustre la figure 2.1, le réseau actuel comporte trois terminaux : le terminal d'Anjou, le terminal de Saint-Laurent et le terminal de ville Saint-Pierre, ainsi que le hub de Montréal (en rouge sur la figure 2.1). Nous nous concentrons

dans notre étude sur le réseau de l'île de Montréal, car les données historiques sont abondantes et aussi parce que l'entreprise utilise les mêmes stratégies de distribution dans d'autres grandes villes canadiennes. Il sera dès lors possible d'utiliser les résultats et les modèles générés lors de cette étude dans le contexte d'autres zones géographiques.

2.3 Problèmes relevés

Nous détaillons dans cette sous-section les problèmes que nous avons relevés suite à l'analyse des activités de Purolator.

2.3.1 Limitations du modèle « next-day delivery »

Le réseau et l'activité de Purolator sont organisés afin d'assurer la livraison des colis le lendemain du jour de collecte. Outre les contraintes contractuelles, ce modèle de livraison est motivé par deux facteurs :

- La majorité des clients qui ont des activités commerciales ou industrielles doivent recevoir leurs colis avant le début des horaires de travail, c'est-à-dire tôt le matin ou durant la matinée.
- Le fait de livrer le plus rapidement possible les colis collectés permet de réduire les coûts de stockage et de conditionnement.

Toutefois, le développement des services de commerce électronique impose que les marchandises commandées sur internet à tout moment de la journée puissent être livrées le jour même. La structure du réseau actuel et l'organisation des opérations telle qu'elle est présentement ne permettent pas d'assurer ce genre de livraisons appelé « *same-day delivery* ».

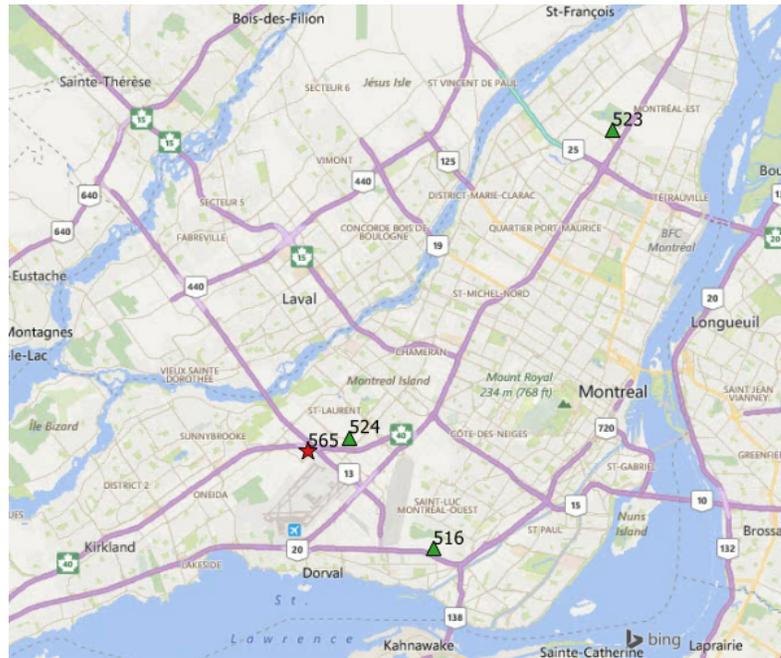


Figure 2.1 : Emplacements des terminaux de Montréal

2.3.2 Déplacements superflus sur le réseau

Nous avons remarqué, lors de l'analyse des historiques des livraisons, qu'il existe des colis qui transitent depuis le terminal de cueillette vers le hub, puis reviennent au même terminal pour y être livrés. Ce scénario est dû à l'absence de tri aux terminaux après les cueillettes, tous les colis étant dirigés au hub avant d'être triés. Ce mouvement de va-et-vient au hub est superflu et engendre des coûts de transport additionnels. Nous considérons dans notre étude la possibilité de traiter les colis aux terminaux afin d'éviter ce genre de situation. Les colis devant être livrés localement seront alors triés au terminal sans devoir passer par le hub. Nous appelons ce genre de déplacements dans le réseau mouvement intra-terminal. Il faudra alors considérer les coûts additionnels de tri des colis au terminal.

2.3.3 Sous-utilisation du hub

L'une des principales préoccupations relevées par Purolator au début du projet est la sous-utilisation du hub de Montréal. Ce dernier est totalement automatisé et permet une grande capacité de tri. Pourtant, bien que le hub tourne à plein régime durant la nuit, il n'est presque pas utilisé pendant la journée (de 8:00 à 16:00). Dès lors, nous envisageons dans notre étude la possibilité de transférer l'activité de terminaux voisins au hub (le terminal de Saint-Laurent est à 2 km de distance du hub).

2.3.4 Localisation des terminaux

La localisation des terminaux dépend principalement de la répartition géographique des clients. Or, la figure 2.2 montre que la demande et la localisation de ces clients varient et peuvent évoluer au cours du temps, ce qui peut nuire à la qualité du positionnement de certains terminaux. En particulier, le terminal de ville Saint-Pierre qui dessert essentiellement le centre-ville de Montréal est situé à 20 km de sa zone de couverture. Les distances parcourues par les camions entraînent des coûts supplémentaires, d'autant plus que le nombre de clients à servir au centre ville de Montréal est important. La figure 2.2 illustre la distribution des clients servis par le terminal ville Saint-Pierre. Les zones en rouge foncé, correspondent notamment au centre-ville de Montréal, représentent le nombre de colis livrés par jour.

2.4 Objectifs du projet

Le but de ce projet est d'analyser comment adapter la conception du réseau actuellement utilisé par Purolator afin de remédier à certains des problèmes relevés précédemment. Plus spécifiquement, nous examinons la possibilité de déplacer les opérations de certains terminaux vers le hub de Montréal (dans le cas du terminal de Saint-Laurent)

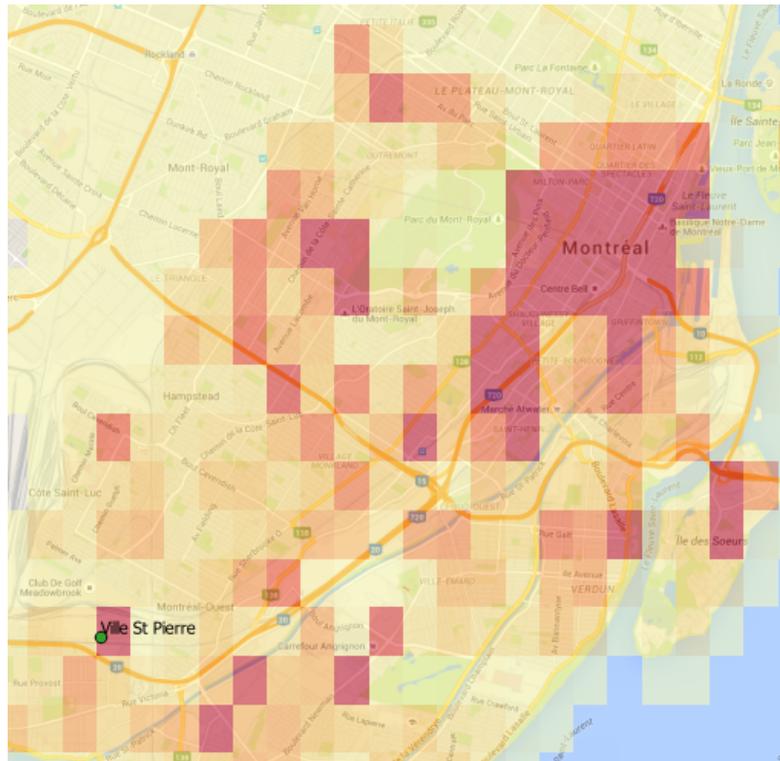


Figure 2.2 : Distribution des clients servis par le terminal de ville Saint-Pierre.

et vers d'autres terminaux. Nous étudions également le gain obtenu en déplaçant les activités du terminal de ville Saint-Pierre vers un terminal fictif situé au centre-ville de Montréal. De plus, nos modèles sont étendus afin de prendre en compte la possibilité de traiter localement les colis en provenance et à destination du même terminal (mouvement intra-terminal). Nous étudions également la possibilité de livraisons directes entre terminaux sans passer par le hub (mouvement inter-terminaux). L'objectif est de réduire les coûts (puisque certains terminaux peuvent désormais être fermés et la capacité du hub mieux utilisée tout au long de la journée), tout en maintenant la même qualité du service, et idéalement, l'améliorer.

CHAPITRE 3

REVUE DE LITTÉRATURE

Parmi les problèmes d'optimisation traitant des réseaux « *hub-and-spoke* », on retrouve les problèmes de localisation de hubs. Ces derniers sont particulièrement utiles dans le contexte des entreprises de livraison de courrier rapide. Nous débutons ce chapitre en présentant les réseaux « *hub-and-spoke* » et leurs caractéristiques. Nous examinons ensuite quelques travaux qui traitent des problèmes de livraison de courrier rapide, selon différents niveaux de planifications. Nous étudions enfin les problèmes de localisation tournées et leur spécificité lorsqu'ils sont appliqués au contexte de la livraison de courrier rapide.

3.1 Réseaux « *hub-and-spoke* »

Les grandes entreprises de livraison de courrier rapide exploitent des réseaux appelés « *hub-and-spoke* » (Aykin [2]; O'Kelly et Miller [3]). Ces réseaux sont constitués de nœuds qui peuvent envoyer et recevoir du flux. Comme la demande entre la plupart des paires de nœuds est trop faible pour être transportée via un véhicule dédié, les colis sont regroupés dans des centres de consolidation, réduisant ainsi les coûts de transport. Le type d'installation peut varier d'un domaine à un autre, et d'une entreprise à une autre. Dans le contexte de la livraison de courrier rapide, on parle souvent de terminaux et de centres de tri (hubs). Chaque centre de tri est connecté à plusieurs terminaux et chaque terminal s'assure de couvrir une partie des clients finaux (cueillette et livraison). Tous les centres de tri sont connectés mais pas nécessairement voisins, c'est-à-dire qu'il existe toujours un chemin entre deux centres de tri. Du côté de la cueillette, chaque terminal collecte les colis à envoyer par les clients, les regroupe, puis les transfère au centre de

tri. Suite à la réception des colis provenant des terminaux, chaque centre de tri répartit les colis à envoyer aux autres centres pour qu'ils soient livrés ultérieurement. Du côté de la livraison, chaque centre de tri reçoit des colis en provenance d'autres centres et affecte chaque colis au terminal approprié. Ce dernier se chargera ensuite de livrer le client final. La figure 3.1 montre un exemple d'un réseau « hub-and-spoke » avec deux niveaux d'installations.

3.2 Littérature sur la livraison de courrier rapide

La littérature sur les services de livraison de courrier rapide a traité les trois niveaux de planification ; stratégique, tactique et opérationnel, tout en distinguant entre les zones de grande superficie (à l'échelle nationale) et les réseaux locaux (métropolitains).

3.2.1 Planification stratégique

Au niveau stratégique, la plupart des études se penchent sur le problème de localisation des stations de tri (hubs) et des terminaux pour des réseaux étendus. Ce dernier est une extension du problème de localisation de hub ou « *hub location problem* » (O'Kelly et Miller [3], Alumur et Kara [4]). Le problème de localisation de hub se base sur les trois hypothèses suivantes :

- Les économies résultantes des installations de consolidation sont exprimées par un facteur $0 < \alpha < 1$ représentant une économie d'échelle. L'idée est que le coût c_{ij} sur un lien (i, j) est actualisé pour devenir αc_{ij} si les deux nœuds extrêmes du lien sont des hubs.
- Il est économiquement justifié d'avoir des connexions directes entre tous les hubs, c'est-à-dire que le coût d'aller directement à partir d'un hub à un autre est toujours

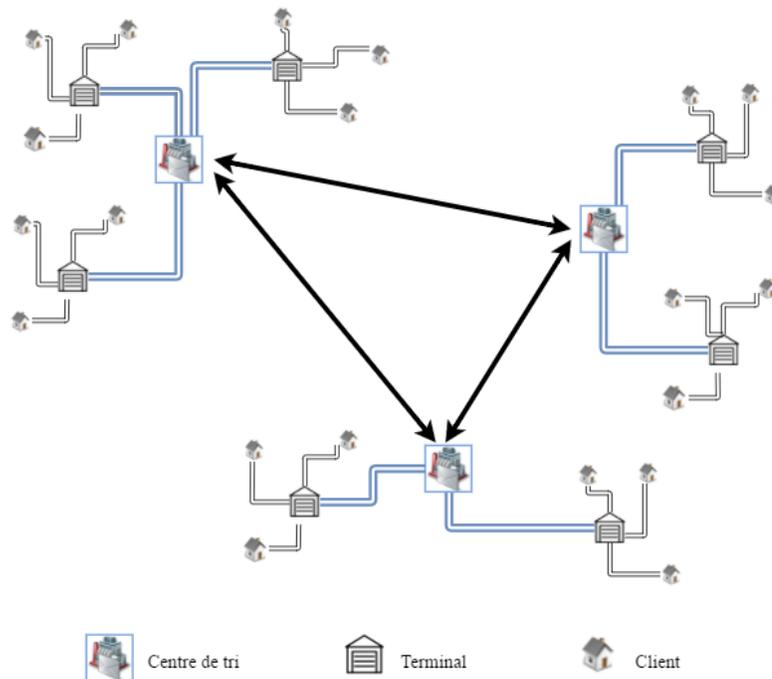


Figure 3.1 : Exemple d'un réseau « *hub-and-spoke* » avec deux niveaux d'installations

moins cher que de transiter par un troisième hub. Il en résulte que le réseau de hubs est un réseau complet.

- Les seules installations à localiser sont les hubs, c'est-à-dire qu'il y a seulement un type ou un niveau d'installations.

La plupart des travaux dans la littérature se conforment à ces hypothèses pour se ramener à un problème de localisation de hubs. Néanmoins, plusieurs travaux essaient de relaxer une ou plusieurs de ces hypothèses afin de mieux représenter les opérations dans le monde réel.

Ben Ayed [5], dans son étude sur les réseaux de distribution de colis par voie terrestre, relaxe les deux premières hypothèses et propose un modèle qu'il appelle PDNPD « Parcel Distribution Network Design Problem ». Il justifie son choix par le fait que la première hypothèse ignore la corrélation entre le coût de transport et le volume trans-

porté, et qu'il est possible qu'un volume transporté entre un client de grande taille et un hub soit supérieur au volume entre deux hubs. La deuxième hypothèse est, selon l'auteur, irréaliste chaque fois que le volume entre deux hubs est trop faible pour justifier l'utilisation d'un véhicule dédié ; il serait alors plus rentable d'utiliser un ou plusieurs hubs intermédiaires pour certaines expéditions hub-vers-hub. L'auteur propose aussi un deuxième modèle avec deux niveaux d'installations (hubs et terminaux) qui sera ensuite appliqué au contexte d'une entreprise de livraison de colis express avec un gain autour de 9% sur les coûts annuels. Il est à noter néanmoins que les coûts de livraison et de cueillette ne sont pas inclus dans la fonction objectif, alors qu'ils dépendent de la localisation des terminaux et de l'affectation des clients aux terminaux.

O'Kelly et Miller [3], en se basant sur des exemples du monde réel qui violent une ou plusieurs des trois hypothèses, proposent une classification des problèmes de localisation de hub selon la nature du réseau, quatre des huit classes proposées (protocoles B, D, F et H) présentent des réseaux de hubs non complets (ce qui viole la deuxième hypothèse).

Kuby et Gray [6], de leur côté, se sont intéressés au gain résultant de l'utilisation d'escales et d'opérations de consolidation dans le contexte de la livraison de courrier rapide. Leur modèle mixte en nombres entiers permet de trouver la configuration optimale des opérations une fois que la localisation des hubs est déterminée.

Quelques rares études ont relaxé la troisième hypothèse afin de considérer deux niveaux d'installations (hub et terminaux), dont les travaux de Wasner et Zäpfel [7], Thomadsen et Larsen [8] et Yaman [9].

3.2.2 Planification tactique

La planification tactique survient généralement lorsque les décisions de localisation ont été prises au niveau stratégique. Elle prend en considération un ensemble de décisions interdépendantes afin d'assurer l'utilisation optimale des ressources disponibles.

Dans le contexte de la livraison de courrier rapide, elle se concentre sur la sélection des routes et la planification des tournées.

Les travaux dans la littérature qui traitent la planification tactique pour les services de livraison et de cueillette diffèrent selon la fonction objectif, les contraintes prises en considération et le choix de modélisation. Le problème de conception des services et fréquences dans un réseau (Crainic [10]) vise à déterminer le nombre de voyages à effectuer et la quantité à transporter dans une période de temps afin de satisfaire la demande tout en respectant la structure du réseau. La détermination des fréquences de service est bien souvent insuffisante dans le contexte de la livraison de courrier rapide, et il est important d'identifier les horaires exacts de livraison et de cueillette. Dès lors, des modèles de conception de services dans un réseau, ou « Dynamic Service Network Design Problem (DSNDP) », sont considérés lorsqu'il est question d'introduire la dimension du temps dans la prise de décision. L'horizon de planification (une journée dans le contexte de livraison de courrier rapide) est alors divisé en 24 périodes d'une heure chacune, et la représentation du réseau est dupliquée pour chaque période.

Barnhart et Shen [11] proposent une extension de ces modèles au contexte de la livraison de courrier rapide. Un autre modèle utilisant des variables temporelles continues (afin d'identifier les horaires de départ et d'arrivée) a été proposé par Kara et Tansel [12], l'objectif étant de minimiser l'heure d'arrivée du dernier véhicule à sa destination. Leur modèle fut l'objet de plusieurs travaux par la suite (Yaman, Kara et Tansel [13]). Hamzaoui et Ben Ayed [14], quant à eux, résolvent un modèle basé sur des variables discrètes, ce qui permet de prendre en considération les fenêtres de temps. La fonction objectif tend à minimiser les coûts totaux de transport et de traitement des colis dans les terminaux. Il est toutefois à noter que le modèle proposé par les auteurs se base sur l'hypothèse de complétude du réseau des stations de tri (hub), qui est rarement vérifiée dans le contexte de la livraison par voie terrestre.

3.2.3 Planification opérationnelle

La planification au niveau opérationnel dans le contexte de la livraison de courrier rapide a pour but d'identifier les itinéraires des véhicules lors des livraisons et des cueillettes. Le problème de tournées de véhicules a été largement traité dans la littérature, de même que plusieurs de ses extensions. Néanmoins, la nature des opérations de livraison et cueillette de courrier rapide impose plusieurs considérations opérationnelles, les tournées des véhicules sont alors plus complexes que dans un problème de tournées de véhicules dit "classique". Wong [15] décrit des contraintes qui caractérisent le calcul des tournées dans un contexte de livraison de courrier rapide :

- Il existe une tendance à vouloir servir le même client par le même livreur et au même moment de la journée. Cette tendance s'explique par le fait que, dans la plupart des cas, les clients industriels signent des contrats avec la compagnie afin d'assurer la livraison dans une fenêtre de temps spécifique. Il est également préférable d'assigner le même personnel au client durant les journées de services, car cela permet au personnel chargé de la livraison de mieux anticiper le comportement du client afin d'optimiser le trajet. Cette contrainte a été traitée dans la littérature sous le nom de problème de cohérence du calendrier client (Groër, Golden et Wasil [16]).
- La gestion des zones de couverture géographique : chaque livreur se voit assigner une zone géographique qu'il devra desservir, ce qui permet au livreur de mieux adapter son itinéraire en cas d'imprévu (accident de la route, chantier, etc.). Puisque les demandes des clients varient de jour en jour, il est nécessaire d'affecter des livraisons ou des cueillettes en dehors des zones de couverture habituelles afin de respecter la même charge de travail pour tous les livreurs. On doit alors considérer des problèmes de gestion et d'affectation de zones de couverture.

- Dans un problème de tournées de véhicules classique, les articles à livrer sont généralement de même nature, ce qui n'est pas vrai pour les courriers rapides où chaque colis doit être placé dans le camion de façon optimale et suivant l'itinéraire choisi. Les imprévus qui peuvent changer l'ordre de livraison, ainsi que la possibilité de faire des cueillettes au cours d'un circuit de livraison, ajoutent de la complexité au problème d'ordonnement des colis dans un camion. Des études dans ce sens pourraient être envisagées.

Nous constatons donc que la littérature traite les problèmes de livraison de courrier rapide selon différents niveaux de planification, Nous nous focalisons dans notre étude sur les aspects de planification stratégique en intégrant des approximations des coûts de transport. En particulier, nous nous intéresserons aux façons de modifier la circulation du flux dans le réseau et de mieux utiliser la capacité des hubs. Il est alors nécessaire de considérer simultanément l'emplacement des installations et les tournées de véhicules. De tels problèmes sont connus dans la littérature comme étant des problèmes de localisation-tournées.

3.3 Problèmes de localisation-tournées

3.3.1 Description

Le problème de localisation-tournées (PLT) se définit comme une extension naturelle à la fois des problèmes de localisation d'installations et de tournées de véhicules. Le PLT, comme son nom l'indique, implique que les décisions au niveau de la localisation d'installations (entrepôts, centres de distribution, centres de tri) soient prises conjointement avec les décisions sur les tournées de véhicules. Il est possible, en se basant sur des approximations, de résoudre ce problème comme un problème de localisation pur. Toutefois, il a été prouvé que cette simplification peut conduire à des solutions sous-

optimales de mauvaise qualité (Salhi et Rand [17]). Dans sa forme la plus simple, le PLT peut être énoncé comme suit : étant donné un ensemble d'installations potentielles A (qui peut être de taille infinie), un ensemble de clients I et une flotte de véhicules K , le problème est de sélectionner un sous-ensemble d'installations I' à partir desquels seront acheminés les véhicules de l'ensemble K , afin de satisfaire la demande de chaque client, tout en minimisant une certaine fonction objectif. Il existe plusieurs variantes du PLT selon la nature de l'ensemble A , l'horizon de planification, la structure du réseau, ainsi que la fonction objectif considérée.

L'état de l'art sur les problèmes de localisation-tournées a été présenté par Nagy et Salhi [18], puis mis à jour successivement par Prodhon et Prins [19], puis par Drexl et Schneider [20]. Ces derniers mettent l'accent sur les différentes variantes du PLT. Ainsi, selon l'horizon de planification, on peut distinguer entre des problèmes statiques et dynamiques ; le terme statique veut dire qu'il y a une seule période de planification. Par opposition, les problèmes dynamiques considèrent plusieurs périodes de planification où les informations (généralement les demandes des clients) sont connues au fur et à mesure de l'avancement dans le temps.

La nature de l'ensemble des installations A a aussi un impact sur la formulation et la résolution du PLT. La majorité des travaux dans la littérature considèrent un ensemble discret, c'est-à-dire que les localisations possibles des installations sont définies comme un sous-ensemble des nœuds du réseau. Schwardt et Fischer [21], ainsi que Manzour-al-Ajdad, Torabi et Salhi [22] traitent des PLT planaires où le choix des localisations n'est pas restreint à un ensemble fini et chaque installation peut être localisée librement dans le plan. Un autre facteur qui différencie les PLT est le choix de la fonction objectif. La plupart des articles considèrent les coûts fixes d'installations, ainsi que les coûts de transport. Toutefois, quelques travaux considèrent plusieurs fonctions objectif simultanément (Lin et Kwok [23]).

3.3.2 Le PLT dans le contexte de la livraison de courrier rapide

Bien que la littérature sur les problèmes de localisation-tournées soit abondante, il existe à notre connaissance très peu d'études qui prennent en compte les services de livraison de courrier rapide, principalement dans le contexte de réseaux étendus (Wasner et Zapfel [7]). Ces derniers, dans leur étude sur un cas réel d'une compagnie de livraison de courrier rapide australienne, proposent une heuristique itérative, où la solution d'un sous-problème sert d'entrée au sous-problème suivant. Cette approche permet de réduire la complexité du problème en traitant successivement des sous-problèmes de localisation et de tournées de véhicules, plusieurs rétroactions (« feedback ») sont exécutées régulièrement afin d'améliorer la solution obtenue. Les auteurs testent leur modèle sur le cas d'une compagnie autrichienne et obtiennent un gain de 10.8% en fermant trois des dix terminaux du réseau initial et de 14.7% en restructurant complètement le réseau.

CHAPITRE 4

CONCEPTION DU RÉSEAU ET MODÉLISATION

Nous présentons dans ce chapitre la structure du réseau actuel de Purolator pour la ville de Montréal, ainsi que les scénarios de distributions proposés pour améliorer l’efficacité et réduire les coûts. Nous construisons graduellement trois modèles, en augmentant à chaque fois le niveau de complexité. Nous commençons par un modèle qui représente uniquement l’utilisation du hub comme terminal et la fermeture de certains terminaux. Par la suite, nous ajoutons successivement la possibilité de mouvements intra-terminal et inter-terminaux.

4.1 Réseau actuel

Le réseau actuel est décrit à la figure 4.1. Il représente les liens entre le hub et les terminaux et entre les terminaux et les clients. Comme notre étude porte uniquement sur l’île de Montréal, tous les colis arrivant de l’extérieur de l’île (ou se dirigeant vers l’extérieur de l’île), sont affectés à un client fictif, appelé “externe” sur notre représentation. Le hub de Toronto est représenté également, car il a la particularité d’envoyer des colis directement aux terminaux de Montréal sans passer par le hub ; il sera considéré dans nos modèles comme faisant partie de l’ensemble des clients. Cette représentation de réseau utilise un graphe non orienté qui exploite le fait que chaque client est attribué à un seul terminal, utilisé aussi bien pour le ramassage que pour la livraison. Les flux sont dirigés dans ce graphe et se déplacent sur des chemins entre une origine et une destination (clients + hubs externes). Les opérations sur ce réseau suivent la séquence présentée au chapitre 2, ce qui rend ce réseau automatiquement “espace-temps”.

4.2 Méthodologie de modélisation

Notre modèle devra répondre à plusieurs questions : Quelles seront les localisations des terminaux sur le réseau ? Quelles seront les affectations des clients aux terminaux ? Quelle sera la nature des mouvements de colis sur le réseau ? Finalement, quelles seront les routes utilisées pour servir les clients ? Afin de répondre à toutes ces questions, nous devons considérer un modèle de localisation-tournées. Comme nous l'avons expliqué au chapitre 2, la résolution de ce type de problèmes est particulièrement difficile à cause des décisions de localisation et de tournées de véhicules qui doivent être prises simultanément. Or, les choix de localisation et d'affectation ont un impact sur le coût total beaucoup plus important en comparaison avec le choix des tournées de véhicules. Nous avons alors décidé d'adopter une approche de planification stratégique et de nous concentrer sur les décisions de localisation et d'affectation. Les tournées de véhicules seront approximées et intégrées au modèle sous forme de coûts de transport (nous détaillerons cette procédure au chapitre 5). Ce choix de modélisation permet de réduire grandement la complexité du problème en se ramenant à un problème de localisation-affectation, ce qui nous permettra d'arriver à une solution optimale en un temps raisonnable (1 minute en moyenne) en utilisant le solveur Cplex (nous détaillerons les résultats dans le chapitre suivant). Un autre avantage de cette modélisation est qu'elle nous permet de tester notre modèle sur de très courtes périodes (une journée), et ainsi mesurer avec précision l'impact de nos décisions sur les coûts journaliers.

4.3 Utilisation du hub comme terminal

4.3.1 Description

L'un des problèmes relevés dans le chapitre 2 est la sous-utilisation du hub de Montréal. Bien qu'entièrement automatisé, le hub est pratiquement inactif pendant la majeure

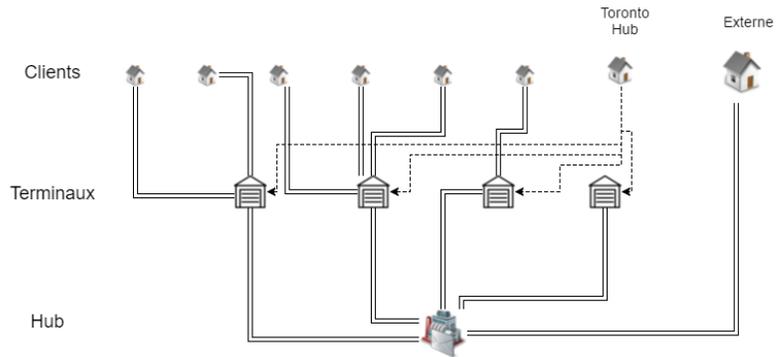


Figure 4.1 : Description du réseau actuel

partie de la journée (de 8:00 jusqu'à 16:00) et n'est pleinement utilisé que pendant la nuit. Le réseau représenté à la figure 4.2 propose de réorienter les activités des terminaux voisins vers le hub avec la possibilité de fermer ces terminaux (dans le cas du terminal de Saint-Laurent, mais éventuellement d'autres terminaux). La représentation du réseau a été modifiée afin de prendre en considération cette possibilité : une copie "terminal" du hub a été ajoutée et connectée au hub par un lien, les liens en rouges représentent les clients désaffectés de leurs terminaux originaux et affectés au nouveau "hub-terminal".

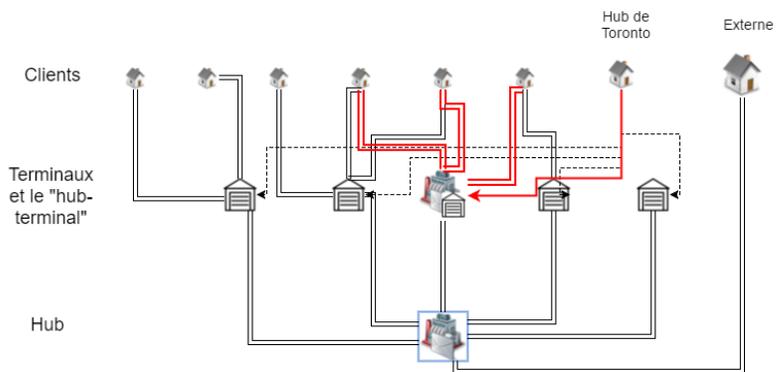


Figure 4.2 : Description du réseau "hub-terminal"

4.3.2 Données

Nous avons choisi de modéliser les opérations sur un horizon de temps d'une journée complète, ce choix nous permettra d'étudier avec précision l'impact des décisions sur les coûts journaliers (coûts de transport, coûts d'opération des terminaux, etc.). Des moyennes seront ensuite calculées sur des saisons et des périodes de l'année spécifiques afin d'obtenir des analyses plus fines. Dès lors, les données utilisées sur nos modèles sont calculés sur une base journalière. Nous présentons ci-dessous une liste des données nécessaires pour notre premier modèle :

Réseau et demandes

- J : Ensemble des clients.
- I : Ensemble des terminaux.
- $H = \{h\}$: Hub de Montréal.
- d_{jk} : Demande (en nombre de pièces) expédiée par le client d'origine $j \in J$ et réceptionnée par le client de destination $k \in J$.

Capacités

- s : Capacité (en nombre de pièces) des camions "line-haul" assurant les liaisons entre le hub et les terminaux.
- q_{ih}, q_{hi} : Capacités de transport entre le hub et le terminal $i \in I$ calculées en multipliant le nombre de camions disponibles sur cette ligne par la capacité des camions.
- $q_{h'h}, q_{hh'}$: Capacités de traitement additionnelles des colis au "terminal" h' (copie "hub-terminal" du hub h); comme le hub n'est pas utilisé à 100% de sa capacité, la capacité de traitement supplémentaire est mesurée en pièces par journée-cycle.

Coûts et gains

- r_i : Gain de fermeture du terminal $i \in I$, ce gain est obtenu en supprimant les coûts d'exploitation du terminal.
- $f_{h'}$: Coût fixe d'ouverture du "hub-terminal" h' ; ce coût représente les frais encourus en adaptant le hub afin de l'opérer aussi comme terminal.
- c_{ji}, c_{ij} : Coûts de transport entre le client $j \in J$ et le terminal $i \in I \cup \{h'\}$ (livraison, cueillette) ; ces coûts sont exprimés en pièces par kilomètre.
- e_{ih}, e_{hi} : Coûts de transport entre le hub h et le terminal $i \in I$.
- $e_{hh'}, e_{h'h}$: Coût par pièce de traitement au hub des colis allant directement vers un client (ou provenant directement d'un client). Le hub h fonctionne dans ce cas comme un "terminal" h' .

4.3.3 Hypothèses

Plusieurs facteurs entrent en considération lors du calcul des coûts de transport, des coûts d'opération des terminaux et des capacités de tri et de transport. Nous avons essayé lors des réunions avec l'entreprise d'identifier les éléments les plus influents et de formuler une définition claire des paramètres qui seront utilisés dans nos modèles. Les principales hypothèses sur lesquelles nous nous basons pour la construction de nos modèles sont les suivantes :

- Les coûts de tri au terminal sont principalement des coûts de main-d'œuvre et d'équipement. Ces coûts sont utilisés lors du calcul du gain généré par la fermeture d'un terminal.
- Les coûts de tri au hub ne sont considérés que pour le calcul du coût additionnel de tri des colis aux terminaux (lorsque les terminaux peuvent opérer aussi comme

“hub”). Ainsi, ces coûts ne sont pris en considération que lorsqu’on décide de trier un colis au terminal au lieu de le trier au hub.

- Outre les camions “*line-haul*” assurant les liaisons entre le hub et les terminaux, deux autres types de camions sont utilisés lors des opérations quotidiennes : des camions de messagerie qui effectuent les tournées de cueillette et de livraison et des camions appelés “*city-bulk*” qui assurent des liaisons directes entre le hub et des clients de grande taille. Le premier type de camions n’est pas considéré dans nos modèles, car une fois qu’un client est affecté à un terminal, la route correspondante est utilisée chaque fois qu’il y a une livraison ou une cueillette vers ce client. Le deuxième type de camions n’est également pas nécessaire lors de la modélisation. En effet, ces voyages ne transitent jamais par un terminal et n’affectent donc pas la conception du réseau (cependant, ces volumes affectent la capacité de traitement additionnelle au hub).
- Le nombre de camions utilisés entre le hub h et le terminal $i \in I$ est connu (que ce soit pour la livraison ou pour la cueillette), ce qui permet de calculer les coûts de transport e_{ih}, e_{hi} et les capacités q_{ih}, q_{hi} .
- Le hub traite majoritairement les colis provenant des terminaux, mais pourra éventuellement traiter des colis provenant ou se dirigeant directement vers un client. Il est alors important de considérer le temps et les équipements nécessaires afin de traiter cette charge additionnelle. Dès lors, les coûts additionnels $f_{h'}$, $e_{h'h}$, $e_{hh'}$ et les capacités $q_{h'h}$, $q_{hh'}$ sont considérés.
- Dans les faits, les capacités de traitement de colis sont calculées en pièces par heure. La prise en considération de ces capacités horaires implique l’introduction de variables représentant la dimension temporelle. Comme nous ne considérons pas la possibilité de livraison au même jour, et par soucis de simplification, nous

exprimons les capacités de traitement, au hub et aux terminaux, en pièces par journée-cycle.

4.3.4 Modélisation

L'objectif de notre modèle est de trouver la configuration optimale du réseau "hub-terminaux". Le modèle devra répondre aux questions suivantes : Faut-il transformer le hub afin de l'opérer également comme terminal ? Est-il économiquement justifié de fermer des terminaux ? Si oui, lesquels ? Comment affecter les clients aux terminaux et dans le cas échéant au "hub-terminal" ? Nous fournissons la liste des paramètres et des variables qui seront utiles pour décrire le modèle :

- $X_{jkil} = 1$, si la demande d_{jk} , $j, k \in J$, est satisfaite en transitant successivement via le terminal i , le hub, puis le terminal l , 0 sinon.
- $y_{h'} = 1$, si le hub est exploité comme "terminal", 0 sinon.
- $z_i = 1$, si le terminal $i \in I$ est fermé, 0 sinon.
- $u_{ij} = 1$, si le client $j \in J$ est affecté au terminal $i \in I \cup \{h'\}$, 0 sinon.
- $b_{jkil} = c_{ij} + d_{jk}(e_{ih} + e_{hl}) + c_{lk}$ est le coût de transport total afin de satisfaire la demande d_{jk} via les terminaux i et l .

$$\min f_{h'} y_{h'} - \sum_{i \in I} r_i z_i + \sum_{j \in J} \sum_{k \in J} \sum_{i \in I \cup \{h'\}} \sum_{l \in I \cup \{h'\}} b_{jkil} X_{jkil}. \quad (4.1)$$

Sujet à :

$$\sum_{i \in I \cup \{h'\}} \sum_{l \in I \cup \{h'\}} X_{jkil} = 1, \quad j \in J, k \in J \mid d_{jk} > 0, \quad (4.2)$$

$$\sum_{i \in I \cup \{h'\}} u_{ij} = 1, \quad j \in J, \quad (4.3)$$

$$\sum_{l \in I \cup \{h'\}} X_{jkil} \leq u_{ij}, \quad j \in J, k \in J, i \in I \cup \{h'\}, \quad (4.4)$$

$$\sum_{l \in I \cup \{h'\}} X_{kqli} \leq u_{ij}, \quad j \in J, k \in J, i \in I \cup \{h'\}, \quad (4.5)$$

$$u_{h'j} \leq y_{h'}, \quad j \in J, \quad (4.6)$$

$$u_{ij} \leq (1 - z_i), \quad i \in I, j \in J, \quad (4.7)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in J} \sum_{l \in I \cup \{h'\}} d_{jk} X_{jkil} \leq q_{ih} \quad i \in I \cup \{h'\}, \quad (4.8)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in J} \sum_{l \in I \cup \{h'\}} d_{jk} X_{jkli} \leq q_{hi}, \quad i \in I \cup \{h'\}, \quad (4.9)$$

$$X_{jkil} \in \{0, 1\}, \quad j \in J, k \in J, i \in I \cup \{h'\}, l \in I \cup \{h'\}, \quad (4.10)$$

$$u_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i \in I \cup \{h'\}, j \in J, \quad (4.11)$$

$$z_i \in \{0, 1\}, \quad i \in I, \quad (4.12)$$

$$y_{h'} \in \{0, 1\}. \quad (4.13)$$

La fonction objectif (4.1) vise à réduire le coût total, à savoir le coût de transformation du hub $f_{h'} y_{h'}$ et les coûts de transport $b_{jkil} X_{jkil}$, tout en tenant compte du gain

engendré par la fermeture des terminaux r_{iz_i} . Pour satisfaire la demande, les contraintes (4.2) assurent que pour chaque paire de clients, il existe un chemin par lequel transite la demande. Les contraintes (4.3) assurent que chaque client soit affecté à un et un seul terminal (ou éventuellement au "hub-terminal" h'). Les contraintes (4.4) et (4.5) imposent qu'aucun volume ne transite entre un client $j \in J$ et un terminal $i \in I$ s'ils ne sont pas affectés l'un à l'autre. Il est aussi nécessaire de s'assurer qu'aucun client ne soit affecté au "hub-terminal" h' , si ce dernier n'est pas transformé pour opérer en tant que terminal (contraintes 4.6) et qu'aucun terminal ne servira de clients une fois fermé (contraintes 4.7). Enfin, les contraintes (4.8) et (4.9) assurent le respect des capacités sur les arcs hub-terminaux.

4.4 Mouvements intra-terminal

4.4.1 Description

Afin d'élargir les possibilités de conception de réseau et d'ajouter plus de flexibilité aux façons de traiter les colis, nous ajoutons dans cette section la possibilité de mouvements intra-terminal. Il est dorénavant possible, lorsqu'un colis provenant d'un client j , affecté au terminal i , est envoyé au client j' , également attribué au même terminal i , de ne pas envoyer ce colis au hub, mais plutôt de le trier au niveau du terminal. Afin de représenter cette option, nous ajoutons une copie i' de chaque terminal i qui agira comme un "hub" pour les colis intra-terminal. Le terminal et sa copie sont reliés par un lien qui représente le traitement additionnel encouru par le tri des colis intra-terminal. Le réseau résultant est représenté à la figure 4.3.

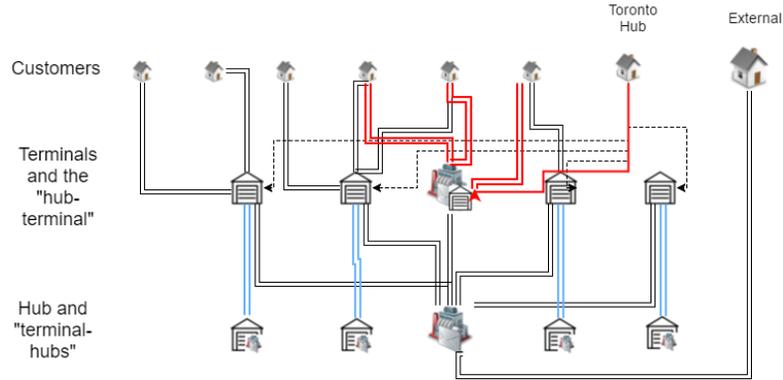


Figure 4.3 : Description du réseau “intra-terminal”

4.4.2 Modélisation

La formulation dans l’espace des chemins permet d’étendre facilement notre premier modèle afin de prendre en considération des mouvements intra-terminal. Nous définissons l’ensemble I' comme étant l’ensemble des copies “hub”, une pour chaque terminal $i \in I$. Les variables X_{jkil} telles que définies précédemment ne suffisent alors plus. Nous les remplaçons par les variables X_{jkil}^p qui valent 1 si la demande d_{jk} est servie via les terminaux i et l , dans cet ordre, en passant par le hub $p \in I' \cup \{h\}$, et 0 sinon. En plus des données du premier modèle, nous aurons besoin d’une nouvelle donnée :

- $e_{ii'}$: Coût additionnel de traitement des colis au terminal $i \in I$ (le terminal i opère dans ce cas comme un “hub” i'), qui représente la différence en coût unitaire (par pièce) entre le tri du colis au terminal et le tri de ce même colis au hub.

Les colis ne passeront plus nécessairement par le hub et pourront être traités au terminal. Le coût de transport total doit être aussi mis à jour afin de prendre en compte cette option :

- $b_{jkil}^p = c_{ij} + d_{jk}(e_{ip} + e_{pl}) + c_{lk}$.

Pour la cohérence du modèle, nous fixons $e_{i'i} = 0$, puisque chaque lien est bidirectionnel. Aussi, nous posons $e_{li'} = \infty$, $e_{li} = \infty$ pour tout $l \neq i$, car aucun mouvement direct

entre deux terminaux différents n'est permis pour ce scénario. Notre deuxième modèle est le suivant :

$$\min f_{h'} y_{h'} - \sum_{i \in I} r_i z_i + \sum_{j \in J} \sum_{k \in J} \sum_{i \in IU\{h'\}} \sum_{l \in IU\{h'\}} \sum_{p \in I' \cup \{h\}} b_{jkil}^p X_{jkil}^p \quad (4.14)$$

Sujet à (4.3), (4.6), (4.7) et

$$\sum_{i \in IU\{h'\}} \sum_{l \in IU\{h'\}} \sum_{p \in I' \cup \{h\}} X_{jkil}^p = 1, \quad j \in J, k \in J | d_{jk} > 0, \quad (4.15)$$

$$\sum_{l \in IU\{h'\}} \sum_{p \in I' \cup \{h\}} X_{jkil}^p \leq u_{ij}, \quad j \in J, k \in J, i \in IU\{h'\}, \quad (4.16)$$

$$\sum_{l \in IU\{h'\}} \sum_{p \in I' \cup \{h\}} X_{jkli}^p \leq u_{ij}, \quad j \in J, k \in J, i \in IU\{h'\}, \quad (4.17)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in J} \sum_{l \in IU\{h'\}} d_{jk} X_{jkil}^p \leq q_{ip}, \quad i \in IU\{h'\}, p \in I' \cup \{h\}, \quad (4.18)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in J} \sum_{l \in IU\{h'\}} d_{jk} X_{jkli}^p \leq q_{pi}, \quad i \in IU\{h'\}, p \in I' \cup \{h\}, \quad (4.19)$$

$$X_{jkil}^p \in \{0, 1\}, \quad j \in J, k \in J, i \in IU\{h'\}, l \in IU\{h'\}, p \in I' \cup \{h\}, \quad (4.20)$$

$$u_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i \in IU\{h'\}, j \in J, \quad (4.21)$$

$$z_i \in \{0, 1\}, \quad i \in I, \quad (4.22)$$

$$y_{h'} \in \{0, 1\}. \quad (4.23)$$

Ce modèle reprend essentiellement la même structure que le premier modèle à la différence près que la fonction objectif et les contraintes sont étendus afin de prendre en considération la possibilité de traiter les colis au terminal sans passer par le hub.

4.5 Mouvements inter-terminaux

4.5.1 Description

Après avoir examiné la possibilité de transformer le hub en "hub-terminal", puis celle de traiter les colis aux terminaux sans devoir passer par le hub, nous testons dans ce dernier modèle l'intérêt de permettre l'envoi de colis directement entre deux terminaux i_1 et i_2 sans devoir passer le hub. Concrètement, ce modèle devra répondre à la question de savoir s'il est économiquement justifié, dans certain cas, d'envoyer un ensemble de commandes directement depuis un terminal de cueillette i_1 vers un terminal de livraison i_2 (par exemple, si les deux terminaux i_1 et i_2 sont proches l'un de l'autre et que la quantité à envoyer justifie l'usage d'un camion dédié). Afin d'adapter la représentation du réseau, nous ajoutons des liens entre i'_1 (copie "hub" du terminal i_1) et i_2 et entre i'_2 (copie "hub" du terminal i_2) et i_1 . Le réseau "inter-terminaux" est représenté à la figure 4.4.

Les liens en vert représentent les nouveaux mouvements possibles sur le réseau. Nous devons dès lors prendre en considération les coûts de transport sur ces liens :

- $e_{i'l}$: Coût de transport (par pièce) entre le "hub" i' et le terminal $l \in I$.

Pour la cohérence du modèle, nous fixons $e_{i'l} = \infty$, c'est-à-dire qu'aucun mouvement n'est permis entre un terminal et une copie "hub" d'un autre terminal. En effet, les

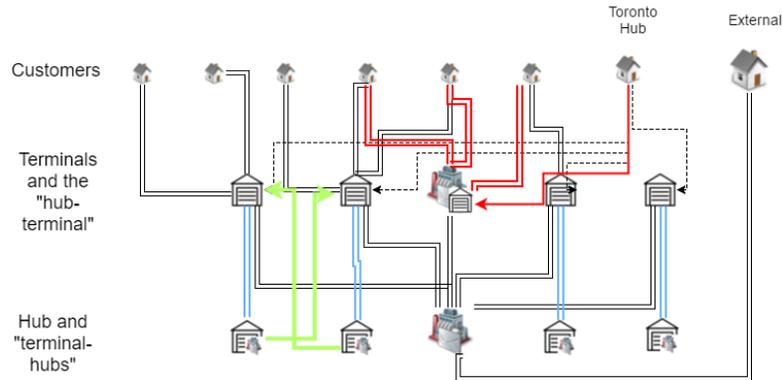


Figure 4.4 : Description du réseau "inter-terminaux"

colis doivent d'abord être triés au terminal d'origine afin de déterminer le terminal de destination (au niveau de la copie "hub"), avant d'être envoyés à ce même terminal.

Dans les deux premiers modèles, le nombre de camions affectés à chaque lien entre le hub et un terminal reste inchangé. Ce nombre servira ensuite à déterminer la capacité de transport sur chaque lien. Pour ce modèle, des camions peuvent être utilisés pour effectuer des livraisons depuis un terminal vers un autre. Il est alors nécessaire d'ajouter une variable qui nous permettra de quantifier le volume transporté sur chaque lien (y compris sur les liens inter-terminaux) :

- v_{lt} : nombre de camions assurant la liaison entre le hub (ou "terminal-hub") $t \in I' \cup \{h\}$ et le terminal $l \in I$.

Nous ajoutons également dans ce modèle la possibilité d'ouvrir de nouveaux terminaux. Cette nouvelle option répond au besoin de l'entreprise de savoir s'il est possible de déplacer l'emplacement de certains de ses terminaux afin de mieux répondre à la demande des clients (nous avons montré dans le chapitre 2 que le terminal de ville Saint-Pierre est très éloigné de sa zone de couverture). Les emplacements de ces nouveaux terminaux sont choisis en concertation avec l'entreprise. Étant donné que les coûts d'ouverture d'un nouveau terminal sont principalement des coûts d'acquisition (ou de loca-

tion) de locaux, ces coûts sont estimés selon la taille du terminal et en se basant sur les coûts d'opération des terminaux actuels. Le modèle devra alors évaluer la pertinence d'ouvrir ces nouveaux terminaux en comparaison avec le rendement des terminaux actuels. Nous détaillons dans le chapitre 5 les résultats obtenus selon différents scénarios de test. Ces résultats joueront le rôle de tableau de bord pour l'entreprise afin de prendre des décisions sur ses implantations futures. Nous aurons besoin de nouvelles données afin de représenter ces nouveaux terminaux :

- A : Ensemble des nouveaux terminaux.
- f_i : Coût fixe d'ouverture d'un terminal $i \in A$.

Nous ajoutons également une nouvelle variable pour modéliser l'ouverture d'un nouveau terminal :

- $y_i = 1$, si le terminal $i \in A$ est ouvert, 0 sinon.

Le troisième modèle est alors formulé ainsi :

$$\min \sum_{i \in A \cup \{h'\}} f_i y_i - \sum_{i \in I} r_i z_i + \sum_{j \in J} \sum_{k \in J} \sum_{i \in I \cup \{h'\}} \sum_{l \in I \cup \{h'\}} \sum_{p \in I' \cup \{h\}} b_{jkil}^p X_{jkil}^p \quad (4.24)$$

Sujet à (4.3), (4.6), (4.7) (4.15), (4.16), (4.17) et

$$u_{ij} \leq y_i, \quad i \in A, j \in J, \quad (4.25)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in J} \sum_{l \in I \cup \{h'\}} d_{jk} X_{jkil}^h \leq sv_{ih}, \quad i \in I \cup \{h'\}, \quad (4.26)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in J} \sum_{l \in I \cup \{h'\}} d_{jk} X_{jkli}^h \leq sv_{pi} \quad i \in I \cup \{h'\}, p \in I' \cup \{h\}, p \neq i', \quad (4.27)$$

$$\sum_{i \in IU\{h'\}} \sum_{p \in I' \cup \{h\}} v_{ip} = \sum_{i \in I} q_{ih}/s, \quad (4.28)$$

$$\sum_{i \in IU\{h'\}} \sum_{p \in I' \cup \{h\}} v_{pi} = \sum_{i \in I} q_{hi}/s, \quad (4.29)$$

$$X_{jkil}^p \in \{0, 1\}, \quad j \in J, k \in J, i \in IU\{h'\}, l \in IU\{h'\}, p \in I' \cup \{h\}, \quad (4.30)$$

$$u_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i \in IU\{h'\}, j \in J, \quad (4.31)$$

$$z_i \in \{0, 1\}, \quad i \in I, \quad (4.32)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad i \in AU\{h'\}, \quad (4.33)$$

$$v_{lt} \geq 0, \quad l \in I, t \in I' \cup \{h\}. \quad (4.34)$$

La fonction objectif (4.24) est modifiée afin de considérer les coûts d'ouverture de nouveaux terminaux. Les contraintes (4.25) assurent qu'un client est affecté à un terminal si et seulement si ce dernier est ouvert. Les contraintes (4.26), (4.27), (4.28) et (4.29) assurent le respect des capacités de transport sur le réseau. Premièrement, les contraintes (4.26) assurent qu'au départ de chaque terminal $i \in I$, la quantité acheminée vers le hub h , ne dépasse pas la capacité sur ce lien (nombre de camions v_{ih} multiplié par la capacité s des camions). Deuxièmement, les contraintes (4.27) assurent qu'au départ de chaque copie "hub" p d'un terminal (ou au départ du hub h), la quantité acheminée vers un ter-

minal $i \in I$ (ou vers le “hub-terminal” h'), ne dépasse pas la capacité sur ce lien. Les contraintes (4.28) et (4.29) assurent que le nombre de camions répartis sur les différents liens du réseau ne dépasse pas le nombre total de camions disponibles.

CHAPITRE 5

RÉSULTATS

Nous présentons dans ce chapitre les expérimentations que nous avons effectuées. Nous avons testé nos modèles sur des données réelles de l'entreprise. Nous expliquons d'abord la nature de ces données et les traitements effectués afin d'adapter ces données brutes de l'entreprise au contexte de notre projet. Nous précisons ensuite la stratégie de test suivie, ainsi que les différents scénarios testés. Nous analysons enfin les résultats obtenus, et nous discutons de la pertinence des décisions de conception de réseau, et leur impact sur les coûts de fonctionnement de Purolator.

5.1 Données, instances et environnement

Nous décrivons dans cette section la nature des données historiques fournies par Purolator et le formatage que nous avons effectué afin d'exploiter ces données.

5.1.1 Extraction des historiques de cueillettes et de livraisons

Plusieurs informations sont enregistrées à chaque fois qu'un camion effectue une cueillette ou une livraison chez un client. Ces données concernent les localisations du client et du terminal correspondant, la taille de la commande (nombre de pièces, volume, etc.), la route utilisée, ainsi que d'autres informations. Deux types de fichiers de format csv sont utilisés pour stocker ces informations, selon qu'il s'agisse d'une cueillette (*pickup*) ou d'une livraison (*delivery*). Un identifiant unique est utilisé afin de retracer les colis sur la totalité du circuit de livraison. Nous utilisons cet identifiant afin de fusionner les deux fichiers et produire un seul document, retraçant pour chaque commande les informations suivantes : date, client d'origine, terminal d'origine, client de destination,

terminal de destination, route et nombre de pièces. La figure 5.1 montre un exemple du fichier formaté (les lettres P et D sont utilisés respectivement pour désigner les cueillettes et les livraisons). À noter que ces données ont été réduites afin de n’extraire que les commandes concernant l’île de Montréal (pour lesquelles le terminal d’origine ou de destination est l’un des trois terminaux suivants : Anjou, Saint-Laurent et ville Saint-Pierre). Comme notre étude porte sur une zone urbaine de grande densité, les codes postaux représentent des zones de petite taille. Nous avons alors décidé d’utiliser la liste des codes postaux fournie par Purolator afin de géolocaliser les clients et les terminaux. Les clients localisés à l’extérieur de l’île de Montréal sont regroupés en un client fictif et ne sont pas considérés lors du processus d’optimisation (nous les représentons par le client fictif “XXX” dans notre fichier).

Les journées pour lesquelles nous avons effectuées nos tests sont marqués en rouge sur la figure 5.2. Les données fournies par Purolator couvrent une période de cinq mois avec un creux de trois semaines pour lesquelles nous n’avons pas pu récupérer les données à cause d’un problème technique. Néanmoins, l’évolution du volume de cueillettes et de livraisons effectués durant chaque journée, représentée à la figure 5.3, permet de dégager une tendance hebdomadaire. Les cueillettes, généralement programmées à l’avance, sont effectuées en début de semaine et ont tendance à diminuer au fil des jours de la semaine. Les livraisons suivent également la même cadence avec des sommets en milieu de semaine. Excepté quelques périodes particulières comme les fêtes de Noël, le volume de cueillettes et de livraisons effectuées est généralement le même d’une semaine à une autre. Ceci s’explique par le fait que la majorité des clients de Purolator ont des activités industrielles ou commerciales, et doivent recevoir et envoyer des colis d’une façon périodique. Cette propriété nous permettra d’utiliser les résultats obtenus à partir de ces données historique afin d’optimiser les livraisons et les cueillettes futures. À noter également que les marchandises commandées sur internet sont généralement

```

Date;PTerm;PRoute;PCodeP;PLat;PLon;DTerm;DRoute;DCodeP;DLat;DLon;nb_pieces
2015-08-21;523;620;H2B3A8;45.566351;-73.647039;999;xxx;X0X0X0;0,00;0,00;6
2015-08-21;523;620;H2C1R2;45.559455;-73.658471;999;xxx;X0X0X0;0,00;0,00;1
2015-08-21;523;620;H1H5H3;45.579921;-73.644109;999;xxx;X0X0X0;0,00;0,00;3
2015-08-21;523;620;H2B1Z7;45.565132;-73.646511;999;xxx;X0X0X0;0,00;0,00;1
2015-08-21;523;620;H2B1K8;45.574;-73.648972;999;xxx;X0X0X0;0,00;0,00;1
2015-08-21;523;620;H1H4X6;45.578334;-73.636814;999;xxx;X0X0X0;0,00;0,00;3
2015-08-21;523;620;H2C3K2;45.560754;-73.665622;999;xxx;X0X0X0;0,00;0,00;1
2015-08-21;523;620;H2B2M3;45.571173;-73.645268;999;xxx;X0X0X0;0,00;0,00;3
2015-08-21;523;620;H2C1T3;45.567827;-73.65377;999;xxx;X0X0X0;0,00;0,00;2
2015-08-21;523;620;H2B1R9;45.570859;-73.658336;999;xxx;X0X0X0;0,00;0,00;1
2015-08-21;523;620;H2B2Z5;45.575769;-73.637974;999;xxx;X0X0X0;0,00;0,00;4
2015-08-21;523;620;H2B1K3;45.572068;-73.650316;999;xxx;X0X0X0;0,00;0,00;1
2015-08-31;516;61E;H3B1A5;45.505892;-73.567412;999;xxx;X0X0X0;0,00;0,00;6
2015-08-31;516;32B;H3B3Z4;45.498518;-73.570661;999;xxx;X0X0X0;0,00;0,00;14
2015-08-31;516;61E;H2X3Y7;45.508946;-73.568385;999;xxx;X0X0X0;0,00;0,00;1
2015-08-31;516;67D;H3A6T6;45.505854;-73.572624;999;xxx;X0X0X0;0,00;0,00;2
2015-08-31;516;32B;H3G1M8;45.497123;-73.578498;516;68D;H3G2V1;45.500106;-73.583465;1
2015-08-31;516;32C;H3B2V6;45.499914;-73.570479;999;xxx;X0X0X0;0,00;0,00;108
2015-08-31;516;18A;H8T3H4;45.439917;-73.689795;999;xxx;X0X0X0;0,00;0,00;7
2015-08-31;516;61C;H3B1X9;45.500909;-73.568164;523;610;H1J1H6;45.612913;-73.565948;1

```

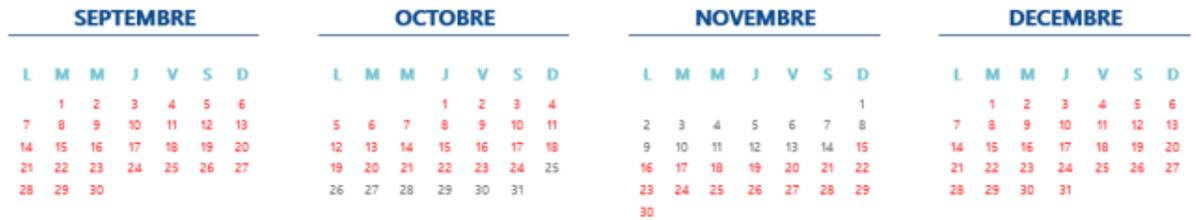
Figure 5.1 : Extrait du fichier d'historiques de livraisons

cueillies à l'extérieur de l'île de Montréal. Le nombre de livraisons est dès lors supérieur au nombre de cueillettes sur l'île.

5.1.2 Calcul des coûts de transport

Comme nous l'avons mentionné au chapitre 4, le calcul des tournées de véhicules est implicitement inclus dans le modèle à travers les coûts de transport. En effet, nous effectuons un pré-traitement afin de calculer le coût de transport d'un terminal vers un client, en intégrant ce dernier dans l'une des routes effectuées à partir du terminal en question. Nous exploitons les regroupements de clients appelés "*clusters*" fournis par Purolator afin de calculer les tournées de véhicules. Lors de chaque journée, les clients appartenant au même "*cluster*" sont identifiés et regroupés. Nous nous retrouvons ensuite avec plusieurs sous-problèmes de voyageur de commerce qui sont résolus par une heuristique appelée "insertion de proche en proche" ou "*Nearest insertion*". Cette der-

Année 2015



Année 2016

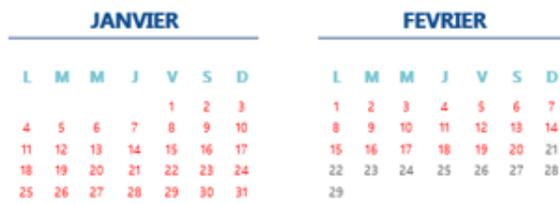


Figure 5.2 : Données historiques disponibles

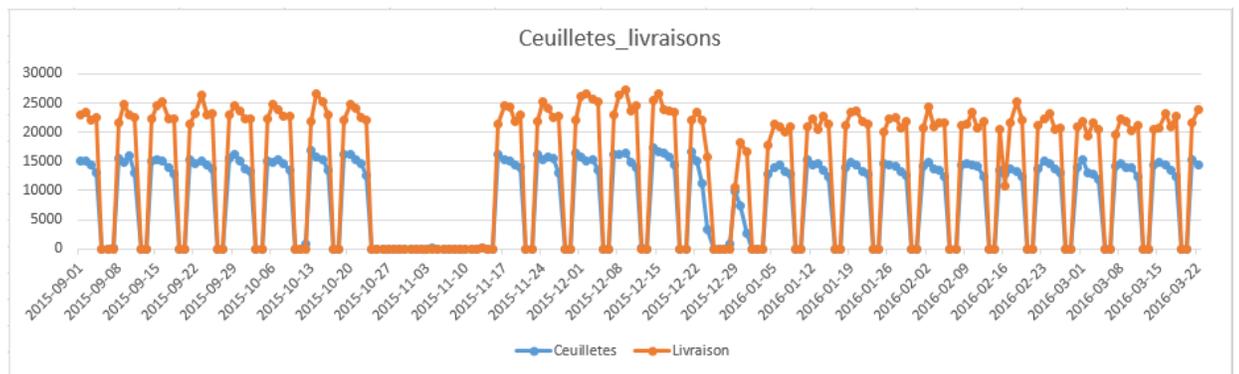


Figure 5.3 : Évolution du volume de cueillettes et de livraisons

nière consiste à choisir, en partant du terminal, le client le plus proche et de l'ajouter à la tournée. Cette opération est répétée jusqu'à ce que tous les clients aient été visités (Cordeau, Gendreau, Laporte, Potvin et Semet [24]). Nous affectons alors le même coût de transport aux clients inclus dans la même tournée. Ce coût correspond au coût total de la tournée divisé par le nombre de client servis. Il est clair que ce coût est une approximation du coût de transport réel, mais il permet au modèle d'affecter le client au terminal le plus prometteur en terme de coûts.

5.1.3 Autres données

Outre les données relatives aux historiques de cueillettes et de livraisons, nous avons collecté plusieurs autres informations nécessaires aux modèles. Les points essentiels à retenir de cette opération de collecte et de calcul de données sont les suivants :

- Les capacités utilisés sur le réseau sont mesurées en nombre de pièces. Une pièce correspond à un colis de taille standard utilisé par Purolator. Il se peut qu'il y ait d'autres colis de taille plus ou moins grande, mais leur quantité reste négligeable.
- Les coûts de transport et de traitement des colis au hub et aux terminaux sont exprimés en coût unitaire par pièce.
- Toutes les données qui apparaissent dans nos modèles ont été ramenées à une valeur journalière.
- Le coût de transformation du hub est estimé par l'entreprise, puis amorti sur une période de 10 ans.

- La formule utilisée pour le calcul du coût de transport est la suivante :

$$\begin{aligned}
 & (\text{Distance en KM}) \times (\text{Coût d'équipement en \$ par KM}) \\
 & + (\text{Temps de transit} + \text{temps de préparation Pré/Post voyage de 5.79 minutes}) \\
 & \times (\text{Coût de main d'oeuvre en \$ par heure})
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Le temps de transit est calculé en considérant une vitesse de 50 km/h pour les camions assurant des liaisons entre les installations (hub et terminaux), et de 30 km/h pour les camions assurant les cueillettes et les livraisons.

- Les camions n'effectuent qu'un seul voyage par journée entre le hub et les terminaux. La capacité de transport est alors calculée en fonction du nombre de camions disponibles sur chaque lien hub-terminal.

5.1.4 Environnement

Les modèles développés ont été expérimentés sur les machines du CIRRELT (Intel Core 2Duo CPU de 2.4GHz, 2GB RAM). Le solveur de programmation linéaire en nombres entiers (MIP) utilisé est ILOG CPLEX 12.4.0.

Les méthodes utilisées pour le formatage des données et le calcul des coûts de transport ont été implémentées en C++. Aussi, nous avons utilisé la librairie *Concert Technology* pour faire appel aux composantes du solveur CPLEX.

5.2 Tests effectués

Nous présentons dans cette section les différents modèles et scénarios que nous avons testés. Nous commençons par le premier modèle afin d'évaluer la pertinence de transférer le hub en hub-terminal, et de transférer l'activité et l'emplacement de certains

terminaux. Nous nous intéressons ensuite aux deuxième et troisième modèles afin d'étudier l'impact des mouvements intra-terminal et inter-terminal sur le réseau.

5.2.1 Sans modification des déplacements sur le réseau

Tester le modèle sans aucune contrainte additionnelle permet d'avoir une idée sur la configuration optimale du réseau. Néanmoins, cette configuration peut ne pas être réalisable ou difficile à mettre en place (si, par exemple, le modèle suggère de fermer deux terminaux, cette solution n'est peut être pas acceptable par l'entreprise). Afin de mieux répondre aux questionnements de Purolator, nous testons deux autres scénarios : le premier a pour but d'évaluer l'impact de fermer le terminal de Saint-Laurent, alors que le deuxième scénario étudie la possibilité d'ouvrir un nouveau terminal au centre-ville de Montréal.

5.2.1.1 Scénario sans contraintes additionnelles (1^{er} scénario)

Le coût journalier moyen (valeur de la fonction objectif) obtenu par le modèle est de 21 529 \$. Le coût journalier initial étant de 23 075 \$, la solution obtenue permet une réduction du coût total de l'ordre de 6.7%, ce qui correspond à 1 546 \$ par jour, ou 389 592 \$ par année. Les principales décisions prises par le modèle sont la transformation du hub en hub-terminal et la fermeture des terminaux d'Anjou et de Saint-Laurent, et ce, dans 100% des cas (des journées testés). Afin de mieux illustrer les résultats, nous étudions la répartition des clients aux différents terminaux avant et après l'optimisation. Nous pouvons voir à la droite de la figure 5.4 la répartition initiale des clients, et à la gauche de la figure, la nouvelle répartition. Nous remarquons que le modèle a choisi de fermer les deux terminaux d'Anjou et de Saint-Laurent, et d'affecter leurs clients (respectivement représentés en bleu et en jaune à droite de la figure 5.4), au terminal de ville Saint-Pierre et au hub-terminal (respectivement représentés en jaune et en vert à

gauche de la figure 5.4).

Les détails des coûts fournis dans le tableau 5.I montrent que le modèle a privilégié le gain obtenu en fermant deux terminaux, même si cela engendre des coûts de transport plus élevés. Ce choix s'explique par le gain conséquent de fermeture du terminal d'Anjou qui est de 3 832 \$ par jour (contrairement aux deux autres, ce terminal est loué par Purolator).

5.2.1.2 2^e scénario

La configuration précédente permet de réduire les coûts journaliers, mais cette solution n'est pas alignée avec la stratégie de l'entreprise, car la concentration des activités sur deux installations a pour conséquence d'augmenter les distances parcourues par les camions et n'est pas adaptée aux perspectives de croissance future. Nous forçons alors le modèle dans les scénarios suivants à garder le terminal d'Anjou ouvert.

Dans 100 % des cas, le modèle choisit de fermer le terminal de Saint-Laurent et de transformer le hub. Le coût journalier moyen est de 22 085 \$ par jour avec un gain de 4.3 % par rapport au coût initial. La figure 5.5 montre la nouvelle affectation des clients aux terminaux et au hub-terminal. L'analyse des coûts du tableau 5.II montre que cette configuration réduit les coûts de transport par rapport à la configuration précédente, mais

	État initial (\$)	1 ^{er} Scénario (\$)
Coût de transport terminaux-clients	12 361	14 670
Coût de transport clients-terminaux	9 950	1 1136
Coût de transport terminaux-hub	238	337
Coût de transport hub-terminaux	383	504
Gain journalier de fermeture des terminaux	0	5 163

Tableau 5.I : Comparaison des coûts journaliers moyens du 1^{er} scénario

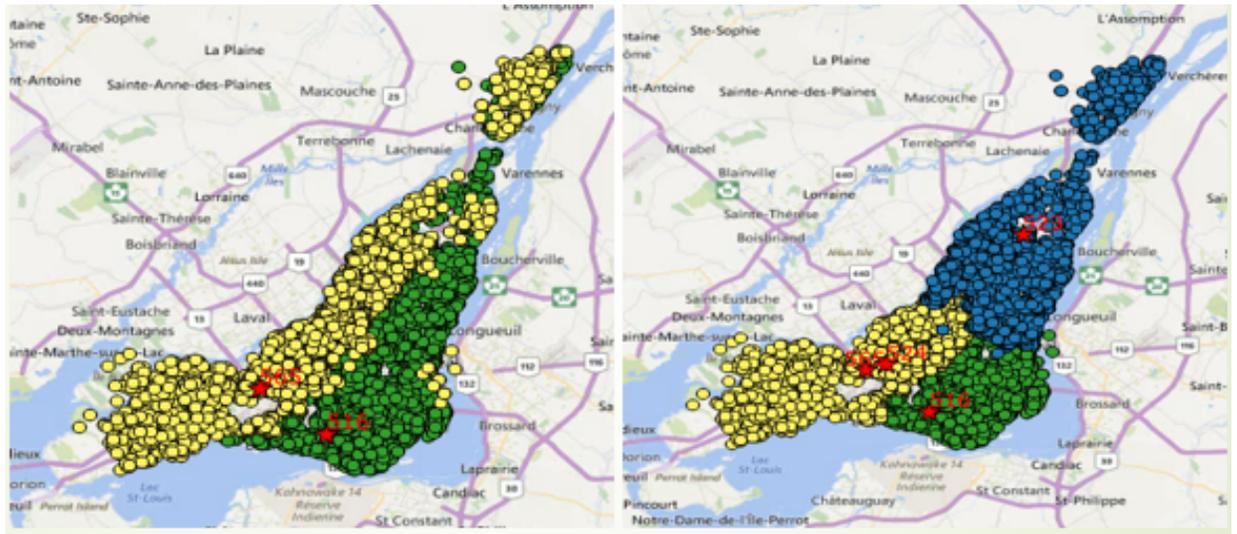


Figure 5.4 : Évolution de l'affectation des clients aux terminaux (1^{er} scénario)

que le gain cumulé par la fermeture des terminaux est moindre.

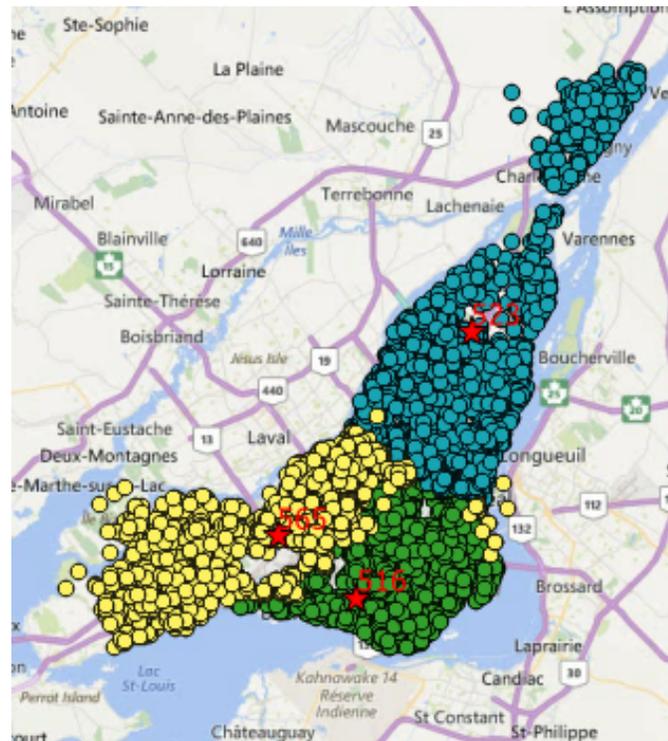


Figure 5.5 : Affectation des clients aux terminaux (2^e scénario)

5.2.1.3 3^e scénario

Après avoir examiné dans les 1^{er} et 2^e scénarios la possibilité de transformer le hub en hub-terminal et d'y transférer les activités du terminal de Saint-Laurent, nous examinons dans ce 3^e scénario l'intérêt d'ouvrir un nouveau terminal dans le centre-ville de Montréal. Ce scénario répond à la problématique relevée dans le chapitre 2 : le terminal de ville Saint-Pierre qui dessert le centre-ville de Montréal est éloigné de sa zone de couverture. Bien que la possibilité d'ouvrir un nouveau terminal au centre-ville n'est pas réalisable à cause des coûts élevés d'implantation dans cette zone, ce scénario servira à évaluer l'intérêt de transférer les opérations de consolidation et de tri au centre ville (par exemple, en utilisant des petits centres de distribution urbains).

La localisation du nouveau terminal (libellé "UNIV" sur le graphe 5.6) a été choisie en tenant compte des préférences de l'entreprise et de la densité de la demande dans cette zone (comme le montre la figure 2.2).

La solution obtenue permet de réduire de 22 % le coût total, à savoir 5 057 \$ par jour ou encore 1.274 million de \$ par année. Les résultats montrent que dans 100 % des cas, le modèle choisit de fermer le terminal de Saint-Laurent et de convertir le hub en hub-terminal comme pour les scénarios précédents, en plus de fermer le terminal de ville Saint-Pierre et d'ouvrir le terminal "UNIV". En examinant la nouvelle répartition présentée à la figure (5.7), nous remarquons que 55% des clients sont désormais affectés au nouveau terminal "UNIV". Ceci s'explique par la grande densité de clients dans la zone du centre-ville. Cette nouvelle configuration permet également de réduire les coûts de transport par rapport à l'état initial (le tableau 5.II montre les détails des coûts pour les trois scénarios).

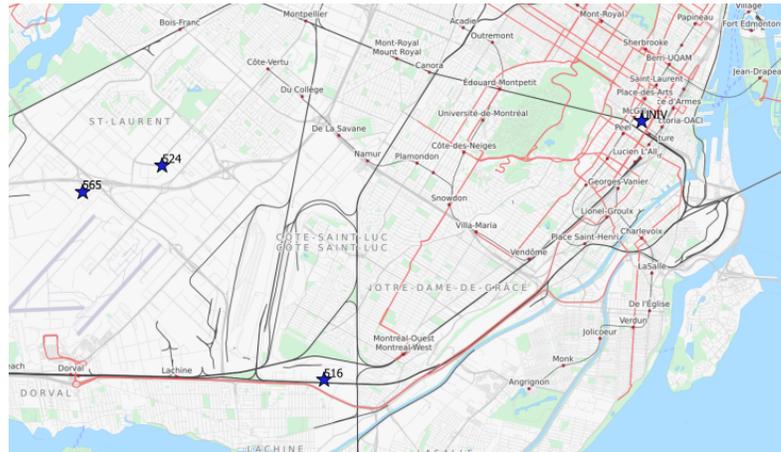


Figure 5.6 : Localisation du nouveau terminal au centre-ville

	État initial (\$)	1 ^{er} scénario (\$)	2 ^e scénario (\$)	3 ^e scénario (\$)
Coût de transport terminaux-clients	12 361	14 670	12 451	11 071
Coût de transport clients-terminaux	9 950	11 136	10 024	7 031
Coût de transport terminaux-hub	238	337	355	388
Coût de transport hub-terminaux	383	504	540	577
Gain journalier de fermeture des terminaux	0	5 163	1 485	2 659

Tableau 5.II : Comparaison des coûts journaliers moyens des trois scénarios

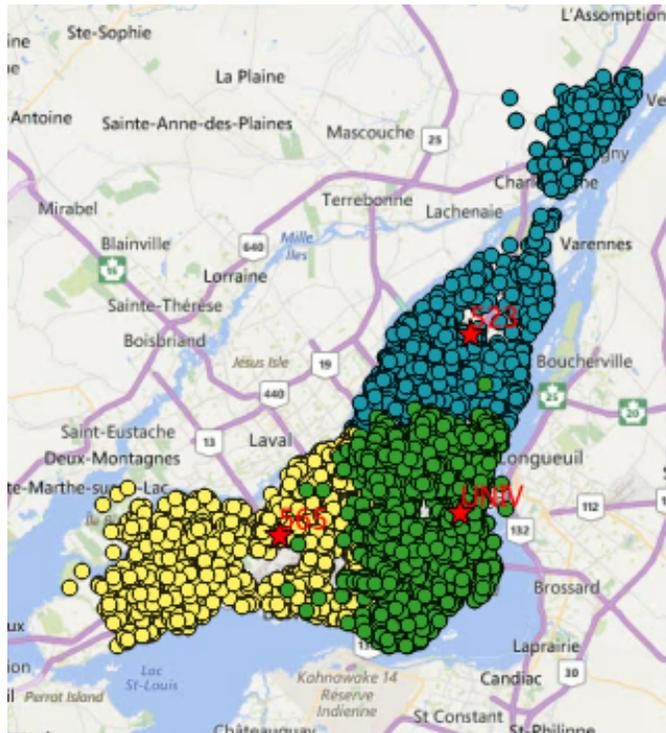


Figure 5.7 : Affectation des clients aux terminaux (3^e scénario)

5.2.2 Avec modification des déplacements sur le réseau

Nous testons les scénarios précédents, en ajoutant cette fois successivement les possibilités de mouvements intra-terminal, puis inter-terminaux. Nous détaillons dans cette section les résultats de ces tests.

5.2.2.1 Avec mouvements intra-terminal

Les résultats obtenus sont décrits au tableau 5.III. Nous remarquons que la possibilité de traiter les colis aux terminaux permet de gagner un à deux points de pourcentage sur le coût total par rapport aux scénarios sans mouvement intra-terminal. Afin de mieux interpréter ces résultats, il est nécessaire d'analyser en détail la nature des déplacements sur le réseau. Par exemple, nous pouvons voir sur le tableau 5.IV que les terminaux traitent entre 4.5% et 9.8% de leurs colis localement au lieu de les transférer au hub. Ces

faibles pourcentages s'expliquent par le fait que jusqu'à 80% des commandes traitées sont collectées ou livrées à l'extérieur de l'île de Montréal, et doivent donc obligatoirement transiter par le hub.

5.2.2.2 Avec mouvements inter-terminaux

Le même constat est dressé lorsqu'on autorise les colis à transiter directement entre les terminaux. Le tableau 5.III montre que l'on arrive à diminuer le coût total dans le 2^e scénario de 3.1%, et ce, par rapport à la configuration avec mouvements intra-terminal. Nous pouvons également voir sur le tableau 5.V que le pourcentage de mouvements intra-terminal reste inchangé par rapport au scénario précédent, et que désormais, dans le 2^e scénario, une partie des colis est acheminée directement d'un terminal à un autre. Il n'est pas possible d'avoir de mouvements inter-terminaux dans le premier scénario, car cette configuration ne comporte qu'un seul terminal ouvert en plus du hub-terminal. Aussi, le modèle a choisi de ne considérer aucun voyage direct entre terminaux dans le 3^e scénario, car la quantité à transporter dans ce cas ne justifie pas l'usage d'un camion dédié.

	Sans mouvements intra-terminal (%)	Avec mouvements intra-terminal (%)	Avec mouvements intra-terminal et inter-terminaux (%)
1 ^{er} scénario	6.7	7.7	7.7
2 ^e scénario	4.3	5.6	8.7
3 ^e scénario	22	24	24

Tableau 5.III : Gains obtenus en réduisant le coût total

	Anjou (%)	Ville Saint-Pierre (%)	“UNIV” (%)
1 ^{er} scénario	0 (fermé)	6.2	0 (fermé)
2 ^e scénario	9	4.5	0 (fermé)
3 ^e scénario	7.2	0 (fermé)	9.8

Tableau 5.IV : Pourcentages de colis “intra-terminal”

	Anjou	Ville Saint-Pierre	“UNIV”
1 ^{er} scénario (intra)	0	6.2	0
1 ^{er} scénario (intra+inter)	0	6.2	0
2 ^e scénario (intra)	9	4.5	0
2 ^e scénario (intra+inter)	11.5	5.5	0
3 ^e scénario (intra)	7.2	0	9.8
3 ^e scénario (intra+inter)	7.2	0	9.8

Tableau 5.V : Pourcentages de colis “intra-terminal” et “inter-terminaux”

5.3 Analyse des résultats et conclusions

Les différents scénarios que nous avons testés, et les différentes façons de déplacer les colis sur le réseau que nous avons envisagées, nous permettent de tirer plusieurs constats quant à la configuration actuelle du réseau de Purolator sur l’île de Montréal. D’abord, la localisation des terminaux n’est pas adaptée à la répartition de la demande. En effet, les résultats des scénarios 1 et 2 mettent en évidence le gain potentiel de la fermeture du terminal de Saint-Laurent (6.7% et 4.3% respectivement), le hub dans ces scénarios étant transformé afin de gérer également les activités du terminal fermé. Ensuite, le terminal de ville Saint-Pierre est mal positionné par rapport aux clients qu’il dessert, ce qui engendre des coûts de transport considérables pour l’entreprise. La figure 5.8 montre qu’il est possible de diminuer considérablement le coût total (22% en moyenne), en choisissant, dans le 3^e scénario, d’ouvrir un terminal près du centre ville de Montréal et de fermer celui de ville Saint-Pierre. Enfin, les terminaux couvrent des

zones assez larges et il est alors possible qu'un client souhaite expédier un colis vers un client de la même zone. Les résultats des tests montrent que parfois jusqu'à 9% des colis peuvent être traités localement aux terminaux, permettant ainsi de réduire les coûts de transport.

À la lumière de ces résultats, plusieurs recommandations peuvent être formulées afin que l'entreprise puisse réduire ses dépenses. D'abord, le hub de Montréal, entièrement automatisé, pourrait être utilisé en tant que terminal, ce qui permettrait de fermer le terminal voisin de Saint-Laurent. Également, Purolator devrait envisager une meilleure gestion des livraisons et des cueillettes au centre-ville. Bien que l'installation d'un terminal dans cette zone soit difficile compte tenu des contraintes opérationnelles, il pourrait être envisageable, par exemple, d'opérer avec de petits centres de tri urbains et d'utiliser les réseaux de transports collectifs au lieu des camions traditionnels. L'installation par l'entreprise de mécanismes de tri dans les terminaux est également recommandé, ce qui permettrait à ces derniers de traiter une partie des colis sans les envoyer au hub. L'ajout de voyages directs entre les terminaux, bien que permettant de réduire les coûts dans certains cas, n'est pas recommandé dans le réseau actuel, car la nature des livraisons ne justifie pas l'utilisation de tels voyages. Néanmoins, il est possible que ces déplacements deviennent rentables à plus grande échelle.

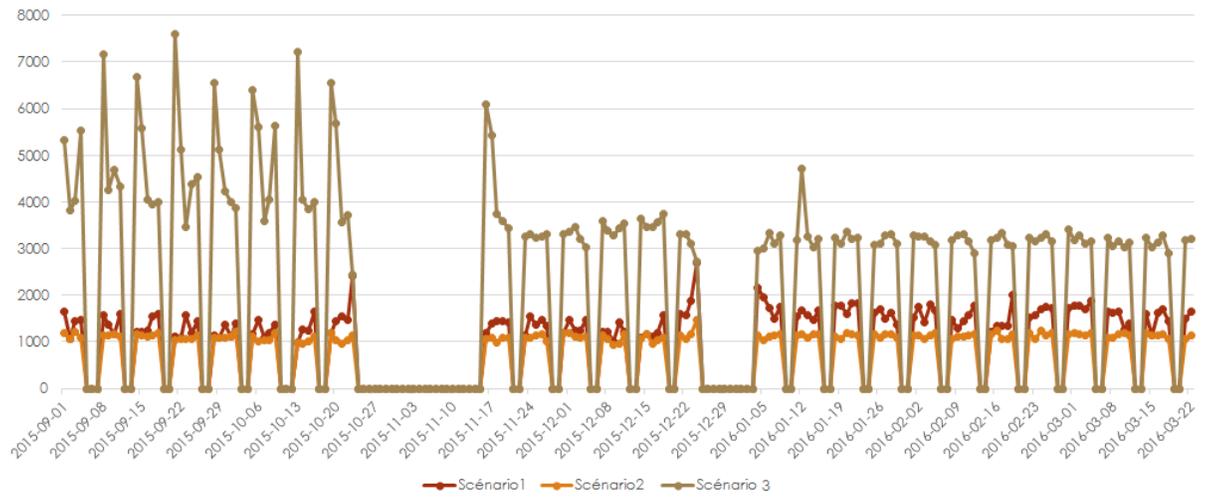


Figure 5.8 : Gains journaliers sur la période étudiée pour les différents scénarios

CHAPITRE 6

CONCLUSION

Les problèmes de localisation en général, et les problèmes de conception de réseaux « *hub-and-spoke* » en particulier, reviennent souvent dans diverses applications liées aux domaines du transport et des télécommunications. Ces problèmes sont d'autant plus complexes lorsque des décisions sur les tournées de véhicules doivent être prises simultanément, notamment dans le contexte de la livraison de courrier rapide. Ils font partie d'une classe de problèmes où les décisions stratégiques et opérationnelles sont confrontées, et doivent être prises de façon à trouver les meilleurs compromis et réduire les coûts globaux.

Dans ce mémoire, nous avons étudié le réseau de distribution d'une entreprise de livraison de courrier rapide sur l'île de Montréal. Nous avons proposé trois modèles de programmation mixte en nombre entiers, afin de représenter la configuration actuelle du réseau de l'entreprise, et d'étudier les façons possibles de l'améliorer. En particulier, nous avons proposé des solutions afin de réduire le coût total en reconfigurant les terminaux et les déplacements sur le réseau.

Afin de résoudre ces problèmes de localisation-tournées, nous avons développé une méthode itérative qui alterne entre le calcul des tournées de véhicules et la localisation des terminaux. La phase de calcul des tournées est basée sur une méthode heuristique, tandis que des modèles de programmation mixte en nombre entiers sont utilisés pour résoudre des problèmes de localisation-affectation. Ce mode opératoire nous a permis de résoudre ces modèles dans un temps raisonnable en utilisant le solveur CPLEX (moins d'une minute).

Ce projet étant réalisé, d'autres travaux peuvent améliorer davantage les résultats ob-

tenus. En particulier, deux autres projets s'inscrivant dans le cadre du partenariat avec Purolator sont en cours. Le premier a pour but de développer des solutions de logistique urbaine ou « *city logistics* », afin d'améliorer les opérations de cueillettes et de livraisons dans le centre-ville de Montréal. Le deuxième projet vise à étendre les modèles de localisation-tournées développés, aux perspectives de livraison au même jour ou « *same-day delivery* ».

References

- [1] Oxford Economics. *The Impact of the Express Delivery Industry on the Global Economy*. Oxford, England, 2009.
- [2] Aykin T. Lagrangian relaxation based approaches to capacitated hub-and-spoke network design problem. *European Journal of Operational Research*, 79(3) :501–523, 1994.
- [3] O’Kelly M. E. Miller H. J. The hub network design problem : A review and synthesis. *Journal of Transport Geography*, 2(1) :649–672, 1994.
- [4] Alumur S. Kara B. Y. Network hub location problems : The state of the art. *European Journal of Operational Research*, 190(1) :1–21, 2008.
- [5] Ben Ayed O. Parcel distribution network design problem. *Operational Research*, 13(2) :211–232, 2013a.
- [6] Kuby M. J. Gray R. G. The hub network design problem with stopovers and feeders : The case of Federal Express. *Transportation Research A*, 27(1) :1–12, 1993.
- [7] Wasner M. Zäpfel G. An integrated multi-depot hub location vehicle routing model for network planning of parcel service. *International Journal of Production Economics*, 90(3) :403–419, 2004.
- [8] Thomadsen T. Larsen J. A hub location problem with fully interconnected backbone and access networks. *Computers and Operations Research*, 34(8) :2520–2531, 2007.
- [9] Yaman H. The hierarchical hub median problem with single assignment. *Transportation Research B*, 43(6) :643–658, 2009.
- [10] Crainic T. G. Long-haul freight transportation. In *Handbook of Transportation Science*, editor, *Hall, Randolph W.*, pages 451–516. Springer US, 2003.
- [11] Barnhart C. Shen S. Logistics service network design for time-critical delivery. *Practice and Theory of Automated Timetabling V, Lecture Notes in Computer Science*, 3616 :86–105, 2005.

- [12] Kara B. Y. Tansel B. C. The latest arrival hub location problem. *Management Science*, 47(10) :1408–1420, 2001.
- [13] Yaman H. Kara B. Y. Tansel B. Ç. The latest arrival hub location problem for cargo delivery systems with stopovers. *Transportation Research B*, 41(8) :906–919, 2007.
- [14] Hamzaoui S. Ben Ayed O. Parcel distribution timetabling problem. *Operations Management Research*, 4(3) :138–149, 2011.
- [15] Wong R. T. Vehicle routing for small package delivery and pickup services. In *The Vehicle Routing Problem : Latest Advances and New Challenges*, editors, Golden B., Raghavan S. and Wasil E., pages 475–485. Springer US, 2008.
- [16] Groër C. Golden B. Wasil E. The consistent vehicle routing problem. *Manufacturing and Service Operations Management*, 11(4) :630–643, 2009.
- [17] Salhi S. Rand G. K. The effect of ignoring routes when locating depots. *European Journal of Operational Research*, 39(2) :1–150, 1989.
- [18] Nagy G. Salhi S. Location-routing : Issues, models and methods. *European Journal of Operational Research*, 177(2) :649–672, 2007.
- [19] Prodhon C. Prins C. A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research*, 238(1) :1–17, 2014.
- [20] Drexl M. Schneider M. A survey of variants and extensions of the location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 241(2) :283–308, 2015.
- [21] Schwardt M. Fischer K. Combined location-routing problems—a neural network approach. *Annals of Operations Research*, 167(1) :253–269, 2009.
- [22] Manzour-al-Ajdad S. Torabi S. Salhi S. A hierarchical algorithm for the planar single-facility location routing problem. *Computers and Operations Research*, 39(2) :461–470, 2012.
- [23] Lin C. Kwok R. Multi-objective metaheuristics for allocation-routing problem with multiple use of vehicles on real data and simulated data. *European Journal of Opera-*

tional Research, 175(3) :1833–1849, 2006.

- [24] Cordeau J. F. Gendreau M. Laporte G. Potvin J. Y. Semet F. A guide to vehicle routing heuristics. *Journal of the Operational Research Society*, 53(5) :512–522, 2002.