

HEC MONTRÉAL

Mise en place d'un service régulier d'autobus à Salaberry-de-Valleyfield

par

Katie Hébert

**Sciences de la gestion
Logistique**

*Mémoire présenté en vue de l'obtention
du grade de maîtrise ès sciences
(M. Sc.)*

mai 2013
© Katie Hébert, 2013

Sommaire

Ce mémoire porte sur la mise en place d'un service régulier d'autobus dans la municipalité de Salaberry-de-Valleyfield. Étant donné le modèle d'opération actuel assuré par une entreprise privée qui offre le service par voiture taxi, il fallait proposer des trajets réalisables qui seraient opérés par un service d'autobus régulier. Plusieurs éléments doivent être pris en compte dans ce type de problème. La localisation géographique des origines et des destinations, la fréquence de passage désirée, la durée souhaitée du trajet ou encore la distance de marche. L'élément clé de toute proposition est toutefois de savoir si l'utilisateur verra son besoin de déplacement comblé par le service mis en place.

L'évaluation de la rentabilité du projet a exigé l'analyse du seuil de couverture de la demande nécessaire pour couvrir les frais d'opération projetés de l'autobus. Ensuite, les paires origine/destination de tous les déplacements effectués pendant une période de 15 mois ont été regroupées dans une matrice des flux. Puis les données ont été téléchargées dans un outil qui utilise les technologies SIG pour permettre une représentation des flux. Suite à ces analyses, différents trajets ont été proposés, évalués et comparés afin de permettre à l'entreprise de faire un choix éclairé comme bien d'autres entreprises de transport en commun.

Abstract

This thesis aims at presenting the case of the creation of a regular transit service by bus in the municipality of Salaberry-de-Valleyfield. Given the current operating system which offers a service by taxi car, the proposition had to introduce feasible routes to be operated by a regular bus service. Many elements must be considered in the analysis of this type of problem. The geographical location of origins and destinations, the passage frequency required, the expected duration of the path or the walking distance are some elements that were considered in our analysis. The key element of any proposition is to determine whether or not user demand will be covered by the new implemented service.

In order to analyse the profitability of the project, a break-even analysis was used to determine the demands that had to be covered to offset the bus operation costs. The origin/destination pairs of every demand for a period of 15 months were transformed into a flow matrix. The data were uploaded in a geographical information system to allow visual flow representation. Several analyses were conducted and various routes were then proposed, evaluated and compared to allow the company to make the best possible decision.

Table des matières

Sommaire	ii
Abstract	iii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	vii
Remerciements.....	viii
1. Introduction.....	1
1.1 Présentation du contexte.....	1
1.2 Présentation de l'entreprise	2
1.3 Présentation du problème	3
1.4 Approche de résolution préconisée	4
1.5 Organisation du mémoire	5
2. Fonctionnement des opérations	6
2.1 Opérations	6
2.2 Données	8
2.3 Arrêts.....	9
2.4 Demande.....	11
3. Revue de la littérature	13
3.1 Problèmes de couverture.....	13
3.2 Élaboration des trajets	15
3.3 Identification des variables	16
4. Méthodologie	19
4.1 Analyse du point mort.....	19
4.2 Représentation des flux	21
4.3 QGIS	22
4.4 Modélisation pour résolution exacte : variables et paramètres généraux	26
4.5 Calcul de la distance.....	28
5. Analyse et résultats	31
5.1 Flux	31
5.2 Trajets.....	32
5.2.1 Nord-sud	33
5.2.2 Satisfaction de la demande pour les trajets nord-sud	37
5.2.3 Est-ouest	43

5.2.4 Satisfaction de la demande pour les trajets est-ouest	46
5.3 Analyse comparative des trajets	47
6. Conclusion	53
Bibliographie	56
A Exemples d’affichage QGIS	ix
B Liste des arrêts du trajet NS1	xi
C Présentation du trajet NS2.....	xiv
D Liste des arrêts du trajet NS2	xvi
E Liste des arrêts du trajet NS3	xix
F Liste des arrêts communs aux trajets EO1 et EO2	xxii
G Seconde partie de la liste des arrêts du trajet EO1.....	xxiv
H Présentation de la seconde partie du trajet EO2.....	xxvi
I Seconde partie de la liste des arrêts du trajet EO2	xxviii

Liste des figures

Figure 1.1	Carte de la municipalité de Salaberry-de-Valleyfield	3
Figure 2.1	Échantillon de la carte remise aux usagers	10
Figure 2.2	Graphiques des statistiques d'utilisation du service par heure	12
Figure 4.1	Deux premières couches QGIS – Territoire couvert et arrêts actuels du réseau	23
Figure 4.2	Exemple d'affichage de QGIS - Secteur Valleyfield avec fréquence de plus de 17	24
Figure 4.3	Carte répertoriant les arrêts les plus utilisés à l'embarquement	25
Figure 5.1	Affichage des flux de déplacements présentant les corridors densément utilisés	32
Figure 5.2	Première partie du trajet NS1	35
Figure 5.3	Deuxième partie du trajet NS1	35
Figure 5.4	Trajet NS3	37
Figure 5.5	Pourcentage de couverture en fonction de l'accessibilité pour les trajets nord-sud	40
Figure 5.6	Arrêts communs aux deux propositions de trajet est-ouest	44
Figure 5.7	Seconde partie des arrêts du trajet EO1	45
Figure 5.8	Pourcentage de couverture en fonction de l'accessibilité pour les trajets est-ouest	47

Liste des tableaux

Tableau 2.1	Heures possibles de réservations pour les usagers de Taxibus	7
Tableau 2.2	Nombre d'arrêts par secteur et sous-secteur	11
Tableau 2.3	Statistiques d'utilisation du service par heure	12
Tableau 4.1	Coûts projetés d'opérations du véhicule pour Taxibus	20
Tableau 4.2	Coûts de taxis payés entre janvier 2011 et avril 2012	21
Tableau 4.3	Liste des arrêts les plus fréquemment utilisés	26
Tableau 5.1	Demandes de déplacement couvertes par les trajets nord-sud	42
Tableau 5.2	Demandes de déplacement couvertes par les trajets est-ouest	45
Tableau 5.3	Pourcentage de couverture de la demande en fonction de l'accessibilité et coûts reliés pour les trajets nord-sud	49
Tableau 5.4	Pourcentage de couverture de la demande en fonction de l'accessibilité et coûts reliés pour les trajets est-ouest	50
Tableau 5.5	Couverture des trajets nord-sud entre 500 et 600 mètres et coûts correspondants	51

Remerciements

Je remercie tout d'abord mes directeurs de recherche, Jean-François Cordeau et Gilbert Laporte. Ils ont été patients, patients et encore patients! Ils ont été d'un support extraordinaire et d'une compréhension au-delà de mes espérances. Merci aussi pour m'avoir « sauvé la vie » à plusieurs reprises! Merci au CRSNG qui m'a permis de sauter tête première dans ce projet sans regarder en arrière.

Pour m'avoir poussée et soutenue, merci à Hélène Giroux et Claire Poitras. À Hélène pour son écoute et son support indéfectible. À Claire Poitras qui n'a jamais considéré mes envies d'abandonner comme admissibles. À Steve Lynch qui a été un « research buddy » dont je ne me serais pas passé! À Lyne Larivée et toute l'équipe de chez Taxibus pour leur offre d'étude qui a motivé mes recherches. Votre engouement pour mes travaux et son utilisation future ont aidé la continuation de ce projet.

Pour mes parents, le mot « merci » n'est plus assez fort pour exprimer ma reconnaissance, mais c'est le seul que je connaisse. Isabelle Bou qui a insisté sur la nécessité de finir ce qu'on commence parce que les fantômes, ça nous hante. Ma sœur Sandra et ma famille entière, parce que chez nous on est tissés serrés et qu'à chaque fois que j'ai eu besoin de vous, vous avez répondu présent. Élixa qui par son sourire et sa disponibilité embellit ma vie! Gabrielle qui a partagé mes nombreux états d'âme... Martin qui est un super papa de nos trois anges.

Dire merci c'est aussi adresser des remerciements pour le futur. Mes enfants comprendront un jour la raison qui m'a amenée à reprendre des études après leurs naissances. Ils comprendront tous ces moments où je n'ai pas été aussi disponible qu'ils l'auraient souhaité. À mes enfants, Mathys, Nathan et Emma, merci d'être aussi vivants et de mettre du bonheur dans mon quotidien. Votre joie de vivre me donne le goût d'être meilleure qu'hier, de continuer à faire de mon mieux pour être la mère que vous méritez. « *On ne voit bien qu'avec les yeux du cœur, l'essentiel est invisible pour les yeux...* » (St-Exupéry 1943)

Finalement, à mon chum Patrick qui est le chum le plus extraordinaire de la Terre. Sans tes actions quotidiennes et ton amour dans ma vie, je ne serais pas la même.

Chapitre 1

Introduction

1.1 Présentation du contexte

À plusieurs endroits dans le monde, le transport en commun est devenu une infrastructure indispensable à la mobilité de la population. Le transport public en milieu urbain tel que mentionné par Mauttone et Urquhart (2009) « est reconnu pour réduire la congestion routière, améliorer les conditions environnementales urbaines ainsi que contribuer à l'inclusion sociale de ses habitants ». Le développement du transport en commun a aussi un impact positif sur le développement urbain ainsi que sur la valeur foncière des bâtiments situés à proximité (CCMM 2010). Il est indéniable pour une ville que le fait de se doter d'un service de transport en commun performant a un impact positif multifactoriel, dont la contribution à l'activité économique de la région (CCMM 2010). Murray et Davis (2001) ont affirmé que « le transport en commun continue d'être un important service public dans les régions urbaines. » Implicitement, le développement du transport en commun mettra en opposition deux objectifs. Le premier objectif vient des utilisateurs qui désirent une fréquence de passage élevée et une multitude de trajets. Le second objectif vient des opérateurs de réseaux de transport qui veulent surtout offrir des liaisons rentables. Les compromis émergents sont ceux qui permettront la mise en place d'un réseau de transport en commun à la fois utile et rentable pour les deux parties prenantes.

L'utilisateur du service sera satisfait ou non du trajet ou de la fréquence de passage et de ce fait prend aussi en compte d'autres facteurs afin de juger de la qualité du

service qu'il reçoit. L'élément qui retient l'attention dans le cas de ce mémoire est la distance devant être parcourue pour se rendre à un arrêt. Le passager désire procéder à l'embarquement près de son lieu de départ et descendre à l'arrêt le plus près de sa destination, et ce dans le meilleur délai possible. Il y a de multiples manières pour une municipalité d'offrir un service de transport en commun. Le premier type est la forme la plus répandue en milieu urbain soit la mise en place de trajets d'autobus, de métro ou de trains. Il existe aussi d'autres types de transport en commun, dont celui à l'étude dans ce mémoire. À Salaberry-de-Valleyfield, le transport en commun est présentement assuré par une entreprise qui offre un service de transport en voiture taxi fonctionnant avec un service de réservation. Les usagers bénéficient ainsi d'un service très personnalisé, mais partagé. La demande est croissante depuis quelques années et a récemment atteint un niveau qui amène une prise de conscience quant à la rentabilité du service actuel. Dans une vision à plus long terme, le questionnement sur l'efficacité d'un service régulier d'autobus pour remplacer une partie des opérations actuelles s'est imposé de lui-même.

1.2 Présentation de l'entreprise

Fondée en 2002 (Carrefour du taxi 2012), l'entreprise Taxibus de Salaberry-de-Valleyfield, ci-après appelée Taxibus, offre un service de transport en commun par taxi. Depuis les fusions des villes québécoises d'avril 2002 (ville de Salaberry 2013), le secteur géographique desservi par la nouvelle ville de Salaberry-de-Valleyfield inclut les municipalités de Salaberry-de-Valleyfield, de Saint-Timothée et de Grande-Île. Le fonctionnement du service consiste à appeler pour réserver un service à une heure précise parmi les options offertes par l'entreprise. Pour un coût très abordable, une voiture vient prendre l'utilisateur à son origine et le transporte jusqu'à son lieu de destination. Plusieurs usagers partagent parfois le même véhicule.

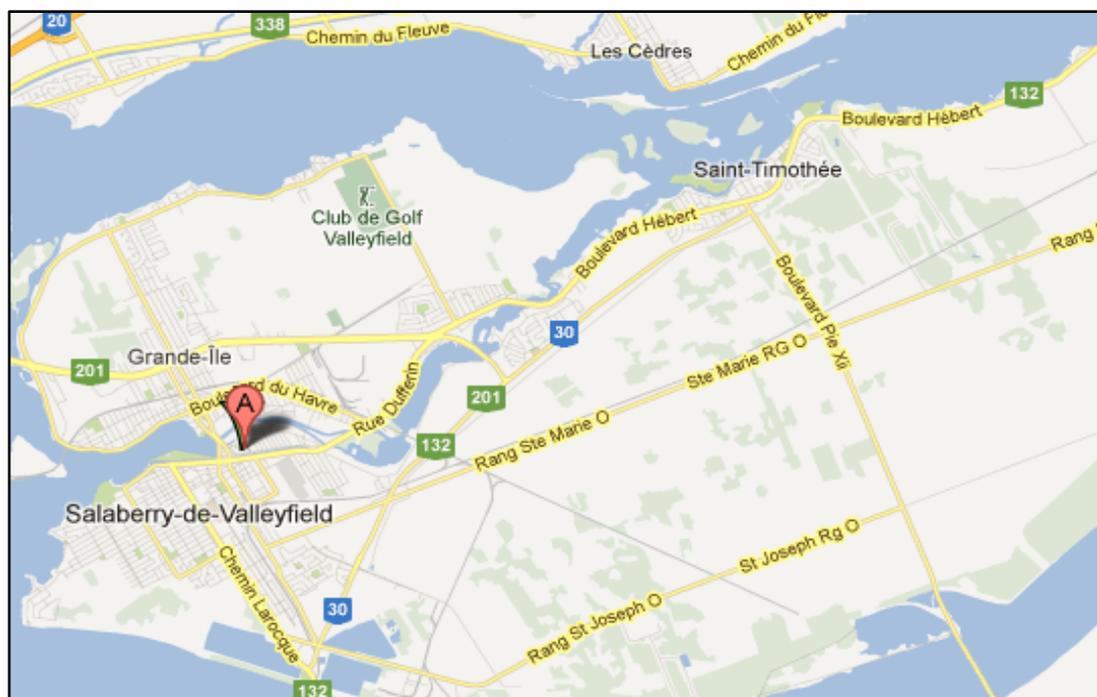


Figure 1.1 – Carte de la municipalité de Salaberry-de-Valleyfield

Pour bien saisir l'ampleur des activités de Taxibus, il est utile de mentionner qu'en 2011, l'entreprise a effectué 53,790 déplacements sur son territoire, ce qui signifie qu'elle a couvert près de 4,500 déplacements par mois. Plus récemment, pour la période couverte par les données fournies par l'entreprise, soit du 3 janvier 2011 au 16 avril 2012, il y a eu environ 70,000 déplacements.

1.3 Présentation du problème

Comme tout opérateur, l'entreprise Taxibus doit assurer un service au meilleur coût possible tout en fournissant un service satisfaisant aux yeux des usagers. Toutefois, le service de transport en commun sur réservation est de plus en plus dispendieux à opérer, entre autres à cause de la hausse de la demande. L'entreprise offre actuellement un service hautement personnalisé : il y a 378 origines et autant de destinations possibles sur tout le territoire. L'entreprise est consciente de cette situation et envisage la possibilité de demander à ses usagers de marcher une plus grande distance afin de bénéficier d'un service régulier d'autobus. Par contre, cette distance devrait respecter les conventions habituellement établies par la majorité

des municipalités afin de minimiser l'impact du changement de service sur les usagers.

Le but de ce mémoire est d'étudier la possibilité d'implanter un service régulier d'autobus de remplacement ou complémentaire au système de Taxibus actuel. Spécifiquement, nous tenterons de répondre aux deux questions suivantes :

- Serait-il rentable d'opérer un service régulier de transport par autobus dans la municipalité de Salaberry-de-Valleyfield?

- Si oui, quels trajets celui-ci devrait-il suivre?

Pour répondre adéquatement à ces questions, il faudra analyser le seuil de rentabilité d'un tel service. S'il est établi que la rentabilité peut être atteinte, il faudra modéliser les trajets possibles étant donné les demandes connues dans le réseau actuel, en tenant compte de diverses contraintes. Finalement, une analyse comparative des différents scénarios validera la rentabilité d'un ou de plusieurs des scénarios.

1.4 Approche de résolution préconisée

Afin de répondre à la première question, une analyse du seuil de rentabilité sera effectuée. Une fois le point mort identifié, la matrice des flux sera représentée graphiquement, ce qui nous permettra d'identifier visuellement les corridors densément utilisés sur le territoire afin de mettre en place des trajets qui offrent la meilleure couverture de la demande. Un logiciel gratuit nommé QGIS sera utilisé pour cette étape d'analyse. Ce logiciel est en licence libre et est assez performant pour traiter toutes les données fournies par l'entreprise. L'élaboration des différents trajets proposés sera réalisée en tenant compte de ces corridors ainsi que de contraintes propres à la situation de l'entreprise. Au total, cinq trajets seront proposés et comparés entre eux pour permettre à l'entreprise de choisir la meilleure option. Cette élaboration sera basée sur les concepts de couverture de la demande tout en minimisant la distance de marche pour les usagers. Étant donné la relative simplicité du problème à l'étude, tous les calculs et analyses sont réalisés à l'aide du chiffrier Excel en combinaison avec l'outil Google Maps.

1.5 Organisation du mémoire

Nous avons déjà fait dans ce chapitre une présentation très brève de l'entreprise et de la problématique considérée. Le deuxième chapitre présentera plus en détail l'entreprise et son fonctionnement interne ainsi que les informations auxquelles nous avons eu accès. Le troisième chapitre contiendra la revue de la littérature scientifique sur les problèmes de couverture maximale ainsi que sur les problèmes d'élaboration de trajets d'autobus. Dans le quatrième chapitre, la méthodologie utilisée afin de résoudre ce problème sera présentée plus en détail. Le chapitre cinq exposera les différentes analyses et trajets proposés ainsi qu'une comparaison des différentes options. Finalement, la conclusion et les limites de cette analyse seront formulées dans le sixième et dernier chapitre.

Chapitre 2

Fonctionnement des opérations

2.1 Opérations

Dans le cadre des opérations quotidiennes actuelles, le service de déplacement est effectué par une voiture taxi plutôt que par un autobus. Pour profiter de cette offre de transport, l'utilisateur de Taxibus doit être membre du service. Il doit d'abord acheter une carte de membre au coût de 5,00 \$ et payer chaque déplacement effectué avec le service de Taxibus. La distance entre l'origine et la destination est le seul facteur de variation dans le coût unitaire d'utilisation du service. Afin d'établir le montant à payer, l'entreprise utilise une matrice des distances. Si la distance calculée est inférieure à cinq kilomètres, le coût est de 4 \$. Pour une course entre cinq et 10 kilomètres le coût est établi à 5,25 \$ et si celle-ci est supérieure à 10 kilomètres, le coût maximum est de 6,25 \$. L'utilisateur peut aussi acheter une carte mensuelle au coût de 95,00 \$ lui donnant un droit d'accès illimité pendant le mois courant.

Le fonctionnement opérationnel consiste à demander aux membres de réserver leur service de transport entre un point d'origine et un point de destination. Le passager doit choisir ses points de départ et d'arrivée parmi les arrêts mis en place à travers la ville. Pour ce faire, l'utilisateur doit appeler le service de réservations téléphoniques. Il communique le jour, l'heure ainsi que l'origine et l'arrivée choisies pour son déplacement. Il doit choisir parmi les heures de départ offertes dans la grille horaire du transporteur. La politique en place demande à l'utilisateur de se présenter à l'arrêt choisi pour le départ 10 minutes avant l'heure de la réservation. Une voiture vient le chercher dans les quinze minutes suivantes. Il est possible que plusieurs passagers

montent à bord du même véhicule. Les usagers voyageant le même jour à la même heure et avec des trajets similaires (à l'origine et à la destination) pourront être assignés à la même voiture. Les clients seront donc invités à prendre place dans un ordre spécifié. Ils descendront l'un après l'autre en suivant le trajet retenu par la répartitrice. Il se peut qu'un passager monte à bord le premier et soit le dernier à quitter le véhicule. Il y a donc pour certains passagers une attente avant l'embarquement et pendant la présence à bord du véhicule.

Pour l'utilisateur de Taxibus, la réservation doit être faite plus d'une heure avant le moment désiré pour son départ. Les possibilités d'heures de réservation sont présentées dans le tableau 2.1.

Lundi au vendredi			
6 h 30	7 h 00	7 h 30	8 h 00
8 h 30	9 h 00	10 h 00	11 h 00
12 h 10	13 h 00	14 h 00	15 h 10
15 h 40	16 h 10	16 h 40	17 h 10
17 h 40	18 h 10	19 h 10	
Samedi			
7 h 30	8 h 00	8 h 30	9 h 00
10 h 00	11 h 00	12 h 10	13 h 00
14 h 00	15 h 10	16 h 10	16 h 40
17 h 10	17 h 40		
Jeudi et vendredi en soirée			
	20 h 10	21 h 10	

Tableau 2.1 : Heures possibles de réservations pour les usagers de Taxibus

Du lundi au vendredi, il existe un minimum de 19 possibilités de réservation de départ. Les jeudis et vendredi soir, l'offre de service est bonifiée de deux départs possibles supplémentaires. Pour les samedis, les heures de départ offertes sont réduites à 14 possibilités et il n'y a pas de service le dimanche.

L'entreprise est présentement liée à la compagnie locale de taxis pour offrir ses services. Les routes peuvent donc avoir jusqu'à six usagers chacune dans le cas d'une affectation à une fourgonnette. Par contre, l'entreprise confirme qu'elle a

typiquement un taux de jumelage des passagers avoisinant deux personnes par véhicule. La procédure interne de réception des appels précise qu'une fois l'information du client entrée dans le système de réservation, la répartitrice doit créer les trajets. Dans l'éventualité où les usagers ont des origines ou des destinations éloignées les unes des autres, la répartitrice les assignera à différents véhicules pour ne pas créer des trajets trop longs. La notion de longueur est toutefois tributaire de la répartitrice en poste et n'est pas clairement définie par une distance précise dans le cadre actuel des opérations. Une fois les routes formées, l'information est envoyée par télécopie à la compagnie de taxi environ 30 minutes avant le moment de départ prévu. Les détails acheminés contiennent le nombre de véhicules nécessaires pour chaque heure de départ, la route à suivre pour chaque véhicule, les numéros des usagers, l'origine et la destination de chacun des passagers ainsi que les prix payés par ceux-ci. Les frais doivent être versés par les usagers lors de l'embarquement et être remis au conducteur. Si l'utilisateur possède un laissez-passer mensuel, il n'a aucun frais à payer à l'utilisation.

Le service ainsi offert est fortement personnalisé puisque l'utilisateur peut obtenir un déplacement entre l'origine et la destination désirées à l'intérieur de la liste des 378 arrêts. La politique en place dans l'entreprise stipule que la distance de marche entre deux arrêts ne peut être supérieure à 500 mètres. L'impact principal est une offre de service qui couvre globalement le territoire en minimisant les distances devant être parcourues à pied par les usagers.

2.2 Données

L'entreprise possède une base de données précise et mise à jour sur les services de transport réalisés au cours des dernières années. Les données utilisées dans le cadre de ce projet de recherche sont celles qui couvrent la période du 3 janvier 2011 au 16 avril 2012. Étant donné que l'horaire d'opération de Taxibus s'étale sur six jours par semaine, les données fournies contenaient 391 jours d'opération.

Pour la période étudiée, l'entreprise a fourni une liste de 70,244 déplacements répertoriés pour lesquels les informations suivantes sont disponibles : l'arrêt d'origine, l'arrêt de destination, le numéro de l'utilisateur, la date et l'heure du déplacement. De ces données, 0,5% ont été rejetées pour diverses raisons, mais

principalement à cause d'erreurs d'entrée (numéro d'arrêt inexistant, heure inexistante, champ vide pour l'une des informations).

Il est à noter que l'information concernant le numéro des usagers n'a pas été utilisée dans les analyses effectuées dans le cadre de ce mémoire. Comme les informations telles que les noms et les adresses appartiennent au domaine de la vie privée, l'accès à celles-ci aurait été complexe et n'aurait pas été d'une grande utilité. Afin d'éviter l'utilisation de ces données nominatives, l'hypothèse retenue pour les calculs présentés dans ce mémoire est que l'origine choisie par l'utilisateur pour un transport dans le passé constitue son lieu de départ. Cet arrêt peut être à proximité de sa résidence ou non, mais aucun élément ne nous permet de valider cette information.

2.3 Arrêts

Une liste descriptive de l'emplacement des arrêts ainsi qu'une carte des arrêts existants sur tout le territoire sont remises à tout nouvel usager du service. Les documents répertorient 378 arrêts distribués dans trois secteurs : Grande-Île, Valleyfield et Saint-Timothée. Un échantillon de la carte peut être consulté à la figure 2.1.

L'analyse des données disponibles a démontré que des 378 arrêts répertoriés, 25 n'avaient pas été utilisés pendant la période à l'étude. Il y a donc 353 arrêts actifs sur le réseau depuis janvier 2011. Cette réalité n'a aucun impact pour l'entreprise puisqu'il n'y a aucuns frais lié à l'entretien des arrêts.

La répartition des arrêts sur le territoire a à l'origine été établie en fonction des centres d'intérêt de la ville (Carrefour du taxi 2012). Dans le secteur de Valleyfield, la proximité des arrêts est telle que la distance inter-arrêts est inférieure à la norme habituellement utilisée par les villes qui est de 400 mètres (Murray et coll. 1998). La carte des arrêts est aussi modifiée d'une année à l'autre puisque les membres peuvent demander l'ajout de nouveaux arrêts. Ainsi, les clients peuvent en tout temps faire des demandes d'ajout d'arrêts sur le réseau actuel. Pour ce faire, ils formulent une demande auprès des responsables de Taxibus qui étudient l'emplacement de l'arrêt demandé. Si l'emplacement désiré se trouve à une distance

inférieure à 500 mètres d'un arrêt déjà en place, la demande est refusée. Dans le cas contraire, la demande est acceptée et l'entreprise ajoute ce nouvel arrêt à son réseau. C'est en partie ce qui explique que dans certains secteurs le nombre d'arrêts soit faible alors que dans d'autres, il y a une multitude d'arrêts dans un très court rayon.



Figure 2.1 : Échantillon de la carte remise aux usagers

Les trois secteurs de la municipalité sont subdivisés en sous-secteurs qui incluent des nombres différents d'arrêts, tel que présenté au tableau 2.2.

Nombre d'arrêts par secteur		
Valleyfield	Secteur 100	23
	Secteur 200	53
	Secteur 300	52
	Secteur 400	26
	Secteur 500	19
	Secteur 600	34
Grande Île	Secteur 1000	45
St-Timothée	Secteur 2000	126
Total		378

Tableau 2.2 : Nombre d'arrêts par secteur et sous-secteur

2.4 Demande

Afin de permettre le développement d'un modèle, il est important de comprendre les habitudes de fréquentation du service par les usagers.

Le tableau 2.3 et la figure 2.2 mettent en évidence la période de demande la plus forte qui se manifeste à 7 h 30 le matin où 7,917 déplacements ont eu lieu, soit un peu plus de 11% des départs. L'heure de forte demande du matin n'a pas d'équivalent en fin de journée, contrairement à ce qu'on pourrait penser. Le départ de 15 h 10 est celui qui s'approche le plus de la demande de pointe du matin avec légèrement plus de 8% des demandes. Cette analyse permet aussi de constater que 53,21% des demandes ont lieu entre 6 h 30 et 12 h 10. Il n'est donc pas exclu de penser à mettre en place un service régulier d'autobus pour répondre à ces demandes et de conserver les opérations actuelles pour le reste de la journée. Les départs de 20 h 10 et 21 h 10 sont significativement moins nombreux, mais ceci s'explique par l'offre en soirée qui n'a lieu que les jeudis et vendredis.

Nombre d'embarquements par heure			Nombre d'embarquements par heure		
Heure	Total	%	Heure	Total	%
6 h 30	3 578	5,12	15 h 10	5 631	8,06
7 h 00	2 748	3,93	15 h 40	2 995	4,29
7 h 30	7 917	11,33	16 h 10	4 864	6,96
8 h 00	5 019	7,18	16 h 40	3 347	4,79
8 h 30	4 822	6,90	17 h 10	3 155	4,51
9 h 00	3 504	5,01	17 h 40	1 717	2,46
10 h 00	2 846	4,07	18 h 10	1 470	2,10
11 h 00	2 866	4,10	19 h 10	1 453	2,08
12 h 10	3 891	5,57	20 h 10	409	0,59
13 h 00	3 625	5,19	21 h 10	528	0,76
14 h 00	3 509	5,02	Total	69 894	100,00

Tableau 2.3 : Statistiques d'utilisation du service par heure

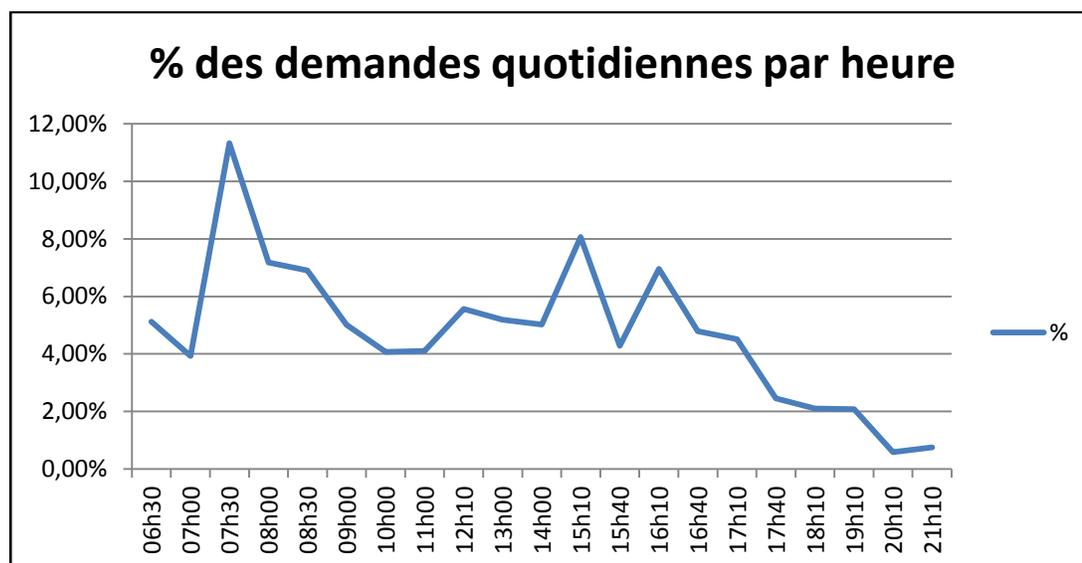


Figure 2.2 : Utilisation du service par heure

Chapitre 3

Revue de la littérature

Le problème à l'étude dans le cadre de ce projet consiste à proposer différents trajets d'autobus pouvant être mis en place. Le but ultime est toutefois de proposer un ou des trajets qui répondront à la demande des usagers de Taxibus. Afin de comparer toutes les propositions entre elles, la couverture de la demande sera le premier élément mesuré.

3.1 Problèmes de couverture

Les travaux de recherche traitant de la couverture de la demande sont mieux connus dans la littérature scientifique sous le nom de problème de couverture ou « location set covering problem » (LSCP), lequel a été longuement étudié. La « couverture » dans ce type de problème « assume qu'une demande en particulier sera couverte si l'infrastructure est localisée à une distance maximale S de la demande » tel que défini par Current et coll. (1985), la valeur de S étant un paramètre propre au problème étudié. Dans les problèmes de conception de trajets de trains, de métro ou d'autobus, cette distance de couverture S est habituellement établie à 400 mètres ou moins. Dans la majorité des articles scientifiques traitant de déplacements utilisant le transport en commun dans un milieu urbain ou semi-urbain (Murray 2001, Murray et Davis 2001, Vuchic 2004), cette norme est utilisée comme référence. Une distance de 400 mètres est une distance confortable à parcourir par une personne dans des conditions normales (Murray et coll. 1998). Les différentes

hypothèses retenues à toutes les étapes de développement du modèle influencent grandement les pistes de solutions et par le fait même les trajets proposés.

Le meilleur modèle doit donc tenter de couvrir la plus grande proportion possible de la demande tout en minimisant d'autres critères dont la durée du trajet. Cette variante du problème a été étudiée sous le nom de « problème de couverture maximale avec le plus court chemin ». Matisziw et coll. (2006) ont inclus ces deux objectifs dans leur modèle qui utilise à la fois un SIG ainsi qu'un modèle d'optimisation. Le problème de l'expansion du réseau actuel de la ville de Columbus est modélisé en utilisant le double objectif tout en mettant à profit les nouvelles possibilités des SIG. C'est aussi de cette manière que le problème de l'entreprise sera abordé. Les propositions de trajets prendront en compte la couverture de la demande tout en proposant une durée qui optimisera l'utilisation du véhicule.

Dans ce cadre théorique, la couverture totale peut être atteinte, mais dans la réalité il n'est pas toujours économiquement possible de s'offrir un nombre de véhicules suffisant pour couvrir la totalité de la demande. Dans ce cas, il faut considérer la meilleure couverture possible étant donné le domaine des solutions réalisables. Dans le cas de Taxibus, l'hypothèse de base qu'il faut considérer dans la faisabilité de la solution proposée est le nombre d'unités à localiser, dans ce cas des arrêts, ce qui influence directement le nombre de véhicules requis pour assurer le service. Church et ReVelle (1974) ont proposé un modèle utilisant un algorithme glouton afin de résoudre un problème de localisation d'infrastructures d'urgence (pompiers et ambulances), la distance entre les demandes potentielles et le nombre d'infrastructures devant être minimisée tout en offrant la meilleure couverture possible. Ils ont considéré dans le développement de leur modèle une hypothèse quant au nombre d'infrastructures à localiser liée à la réalité des décideurs plutôt qu'au développement d'un modèle purement théorique.

En ce qui a trait au développement des trajets, sa mise en place est inspirée des travaux de recherche sur le développement des réseaux de transport en commun.

3.2 Élaboration des trajets

La situation de Taxibus consiste à construire de A à Z un réseau ou du moins les bases de celui-ci en milieu semi-urbain. Ce type de problème, qui consiste à élaborer des trajets ou réseaux de transport, est connu dans la littérature scientifique récente comme un problème de conception de réseau de transport ou « transit network design problem (TNDP) ». L'élément-clé de ces problèmes « consiste à déterminer un circuit routier entre deux terminaux qui visite une suite d'arrêts, étant donné une demande et certaines contraintes et objectifs » (Guihaire et Hao 2008, Miandoabchi 2012).

Vuchic (2004) propose plusieurs modèles très complets et complexes qui sont à la base des propositions faites dans le cadre de ce projet. Que ce soit pour la localisation des lignes tenant compte des origines et destinations des demandes, la fréquence des horaires de passages, la distance entre deux arrêts consécutifs ou la distance d'accès aux arrêts, tous ces éléments peuvent être considérés pour le cas de Valleyfield. La mise en place d'un seul ou de deux trajets se veut assez simple et certaines hypothèses de base présentées dans les modèles de l'auteur ont été retenues dans l'élaboration des trajets. Par contre, certains des calculs proposés étaient irréalisables, car ils auraient nécessité la réalisation de sondages auprès des usagers et cette possibilité ne faisait pas partie des options de ce mandat.

Parmi les objectifs pris en compte dans la résolution, notons les intérêts des usagers ainsi que ceux des opérateurs. Ceder et Wilson (1986) ont présenté un algorithme simplifié dans le cadre théorique de la mise en place d'un réseau d'autobus qui permet pendant la résolution de considérer à la fois les objectifs des usagers et ceux des opérateurs. Certains modèles mettent une emphase plus grande sur l'une ou l'autre des parties prenantes. Guihaire et Hao (2008) ont proposé une recension des premiers articles traitant des différentes variantes de ce type de problème. La période couverte va de 1925 jusqu'à 2007 et présente une banque d'articles classée selon les objectifs, les contraintes, les applications et les spécificités des modèles proposés.

Plusieurs travaux récents prennent aussi en considération dans la conception d'un trajet d'autobus des outils faisant appel à des systèmes d'information géographique (SIG). Leur utilisation permet de mettre en commun des éléments qui favorisent une

prise de décision multidimensionnelle (Kwan 1998, Zeng et al. 2010). Dans le cadre de ce projet, les arrêts existants ont été répertoriés dans le même outil visuel que les rues de la ville, les origines et les destinations des demandes, ainsi que les fréquences d'utilisation de ces arrêts. En quelques minutes, le logiciel de SIG permet d'ajouter, d'enlever ou de modifier un ou plusieurs des éléments désirés. De tels outils permettent une visualisation des flux et des trajets proposés.

3.3 Identification des variables

Afin de construire des modèles de résolution performants, plusieurs variables sont utilisées dans la mise en place des trajets. Le parcours suivi par l'autobus, la durée du trajet, la localisation des arrêts et l'espacement entre ceux-ci ainsi que la fréquence de passage sont tous des éléments devant être considérés dans l'élaboration d'une solution. Chaque modèle considérera de manière séquentielle ou simultanée plusieurs éléments dans l'élaboration de la solution. Szeto et Wu (2010) ont proposé un modèle qui tente de créer un réseau d'autobus réalisable conjugué à une fréquence de passage acceptable pour les usagers. Pour ce faire, ils ont utilisé un algorithme génétique pour la création du réseau d'autobus. Une fois le réseau créé, une heuristique tente de gérer la fréquence de passage sur les trajets créés précédemment en plus de tenter de respecter les différentes contraintes. Cette résolution a été possible en utilisant l'hypothèse que la flotte de véhicules était fixe.

Si le modèle considère d'abord l'élaboration du trajet en lien avec la couverture de la demande, un fois le trajet défini la fréquence et l'horaire de passage de l'autobus seront des éléments permettant d'analyser l'accessibilité au service. Tormos et coll. (2008) ont précisé qu'un horaire périodique est beaucoup plus facile à retenir pour les usagers. Il est donc important dans l'analyse de la faisabilité des trajets de tenir compte de la longueur de ceux-ci et de l'impact que cet élément aura sur la facilité de mémoriser les horaires de passage aux différents arrêts. La durée totale du trajet ainsi que son nombre d'arrêts font aussi partie des éléments pouvant influencer les opérations quotidiennes des opérateurs. En voulant minimiser la distance de marche pour les usagers, on ajoute des arrêts sur un trajet donné avec la conséquence directe d'augmenter la durée du trajet. Cet impact vient diminuer « l'accessibilité » du service tel que défini par Murray et Wu (2003) qui ont proposé un modèle basé

sur le problème de la p -médiane qui quantifie le compromis à réaliser entre l'espacement des arrêts et la durée du trajet.

Outre l'accessibilité au service, la notion d'équité fait aussi partie des critères pouvant influencer certaines décisions publiques liées au transport en commun. Étant donné que certains quartiers d'une même ville peuvent bénéficier davantage de la présence d'un service régulier d'autobus, cette information est factorisée pour être prise en compte dans le développement du réseau proposé. Plusieurs facteurs socio-démographiques et économiques ont été considérés dans le modèle développé par Murray et Davis (2001) afin de proposer un réseau pour la région sud-est du Queensland en Australie. Un index formé de multiples facteurs décisionnels a été construit par une fonction linéaire pondérée afin de quantifier l'impact de certains critères par rapport aux autres. Le résultat est une proposition de réseau urbain qui prend en considération des aspects humains ou politiques et non simplement mathématiques.

Les travaux portant sur le TNDP utilisent différentes valeurs de paramètres dans la fonction objectif, lesquels reflètent les coûts des usagers et ceux des opérateurs. Wirasinghe et Ghoneim (1981), Ceder et Wilson (1986) ainsi que Fan et coll. (2006) ont utilisé une modélisation avec une fonction objectif à plusieurs paramètres. La minimisation se fait à la fois pour la fonction de coût des usagers et la fonction de coût pour l'opérateur. Les coûts de l'opérateur incluent les frais d'acquisition et d'opération des autobus, les frais de main-d'œuvre pour les conducteurs ainsi qu'un facteur de coûts lié à la fréquence de passage de l'autobus.

Les coûts des usagers incluent d'abord le temps d'attente à l'origine entre l'heure de départ souhaitée et l'heure offerte. Le temps passé à bord du véhicule et le temps écoulé entre le débarquement et l'arrivée à destination sont aussi pris en compte dans le coût pour le passager. Les temps de transferts entre les différentes lignes d'un même parcours font aussi partie de ce coût. Dans un monde idéal, un passager monterait à bord du véhicule devant son point d'origine et en descendrait devant sa destination sans aucun arrêt entre ces deux points. Le modèle de Fan et coll. (2006) a la particularité d'ajouter aux deux paramètres présentés, une variable à minimiser qui tient compte de la demande non satisfaite par le modèle. Leur modélisation

basée sur un algorithme génétique rend ce modèle plus complet que les autres cités précédemment.

Zhao et Zeng (2008) ont quant à eux développé un modèle qui ne tient compte que de la fonction de coûts des passagers. La taille de la flotte de véhicules, la demande ainsi que le réseau des rues empruntables pour les autobus dans cette région sont utilisés comme intrants au modèle. L'hypothèse de base est que les coûts pour l'opérateur sont fixes, peu importe l'utilisation qui sera faite des véhicules. Le modèle cherche donc à obtenir le meilleur réseau possible pour les usagers.

Parmi tous les éléments présentés dans ce chapitre, la couverture de la demande et la durée du trajet sont les deux éléments qui ont été retenus pour l'évaluation des trajets proposés.

Chapitre 4

Méthodologie

Cette section du mémoire présente les différents éléments méthodologiques ayant permis l'analyse de la rentabilité ainsi que la création des cinq circuits d'autobus.

4.1 Analyse du point mort

L'analyse initiale consiste à identifier quel pourcentage de la demande doit être couvert par le service d'autobus afin de rentabiliser ses opérations. Cette valeur est communément appelée « point mort ». Elle indique à partir de quel moment, dans ce cas un pourcentage de couverture, la demande desservie couvre les frais d'exploitation de l'autobus. D'après les informations fournies par l'entreprise ainsi que les compléments identifiés, les frais d'exploitation du véhicule s'élèveront à 124,453 \$ par année pour les six prochaines années tel que présenté au tableau 4.1. Le point mort est donc le pourcentage de couverture qui permet des économies de frais de taxis correspondant à ce montant.

Pour la période étudiée, les coûts d'opération de Taxibus pour desservir le réseau au complet ont été de 530,381 \$. Le détail des coûts actuels d'opération mensuels est présenté dans le tableau 4.2. Un calcul simple de ratio des coûts d'opérations projetés du véhicule sur les coûts actuels d'opérations nous permet d'affirmer qu'un parcours satisfaisant 23,46% de la demande permet de couvrir les frais d'opération du véhicule. Pour toute couverture supplémentaire à ce point mort, l'entreprise réalisera des économies par rapport aux coûts de taxis.

Coûts projetés d'exploitation du véhicule	
	Par année
Achat du véhicule	16 046 \$
Salaire	59 956 \$
Avantages Sociaux	
RRQ 4,95%	2 967 \$
Financement services de santé 2,80%	1 678 \$
RQAP 0,718 %	430 \$
Commission des normes du travail 0,1%	60 \$
CSST 7,5%	4 497 \$
Vacances 4%	2 398 \$
Jours fériés 4,8%	2 878 \$
Salaire total	74 863 \$
Immatriculation	1 018 \$
Assurances	1 731 \$
Essence (prix décembre 2012)	25 980 \$
Coût entretien/réparations (30% du paiement mensuel)	4 815 \$
Total annuel	124 453 \$

Tableau 4.1 : Coûts projetés d'opération du véhicule pour Taxibus

Sommaire des coûts de taxis du 3 janvier 2011 au 16 avril 2012					
Mois	# Transport	km	Coût brut (\$)	Perçus (\$)	Coût net (\$)
Janvier 2011	4 911	14 087	33 322	13 852	19 470
Février 2011	5 340	15 124	35 800	12 928	22 872
Mars 2011	5 898	17 504	40 693	15 300	25 392
Avril 2011	4 972	15 386	35 576	12 619	22 957
Mai 2011	5 241	16 282	37 409	13 362	24 046
Juin 2011	4 024	12 774	29 693	10 641	19 052
Juillet 2011	3 166	11 054	25 575	10 516	15 058
Août 2011	3 513	11 731	27 568	11 002	16 566
Septembre 2011	4 441	14 659	32 787	12 558	20 230
Octobre 2011	4 289	14 299	32 828	12 340	20 488
Novembre 2011	4 791	15 900	36 639	13 045	23 594
Décembre 2011	4 173	14 134	32 550	12 865	19 685
Janvier 2012	4 412	15 339	35 022	13 742	21 281
Février 2012	4 801	15 768	38 063	13 371	24 692
Mars 2012	4 825	16 306	39 391	13 966	25 425
Avril 2012	2 157	7 255	17 466	7 218	10 248
Total	70 954	227 602	530 382	199 325	331 056

Tableau 4.2 : Coûts de taxis payés entre janvier 2011 et avril 2012

4.2 Représentation des flux

À la suite de l'analyse du seuil de rentabilité du projet, les données de l'entreprise devaient être analysées en profondeur. Le second élément pertinent dans la cadre de ce mémoire a été de représenter graphiquement les flux de déplacements. La représentation des flux a comme utilité de mettre en évidence l'existence d'un point ou d'un corridor à circulation dense. Cet élément est un facteur clé dans le développement d'un trajet d'autobus afin de maximiser la couverture. Un corridor densément utilisé devrait servir de base à l'élaboration d'un éventuel circuit d'autobus.

Comme l'entreprise a desservi 353 arrêts pendant la période pertinente et que chacun sert à la fois à l'embarquement ou au débarquement de passagers, la matrice des flux contient plus de 120,000 possibilités de combinaisons d'origine et destination différentes. Le résultat est une matrice ayant 353 données sur l'axe vertical et autant sur l'axe horizontal. Les données ont été classifiées avec le numéro d'arrêt à l'origine sur l'axe vertical, le numéro d'arrêt à la destination sur l'axe horizontal et la fréquence d'utilisation de cette paire pendant la période étudiée. Cette matrice a été créée dans Excel afin de permettre une souplesse dans la modification de celle-ci selon les besoins de représentation graphique. Elle a aussi été utilisée comme information d'entrée dans un outil de représentation graphique développé avec des technologies SIG.

4.3 QGIS

Plusieurs logiciels permettent une représentation efficace des flux, mais rares sont ceux qui sont libres de frais de licence. Le logiciel QGIS (*Quantum Geographic Information System*) est offert sous licence publique générale (GPL). Ce logiciel gratuit fait partie des projets de la fondation Open Source Geospatial (OSGeo) (Quantum GIS 2012). Le logiciel QGIS a donc été retenu comme outil de présentation de la matrice des flux et l'extension *Flowmapper* a été utilisée afin de l'optimiser.

Le programme fonctionne en téléchargeant des « couches » d'informations telles que des routes, des informations topographiques ou, comme dans le cadre de ce projet, des arrêts. Un exemple de l'information téléchargée est présenté à la figure 4.1.

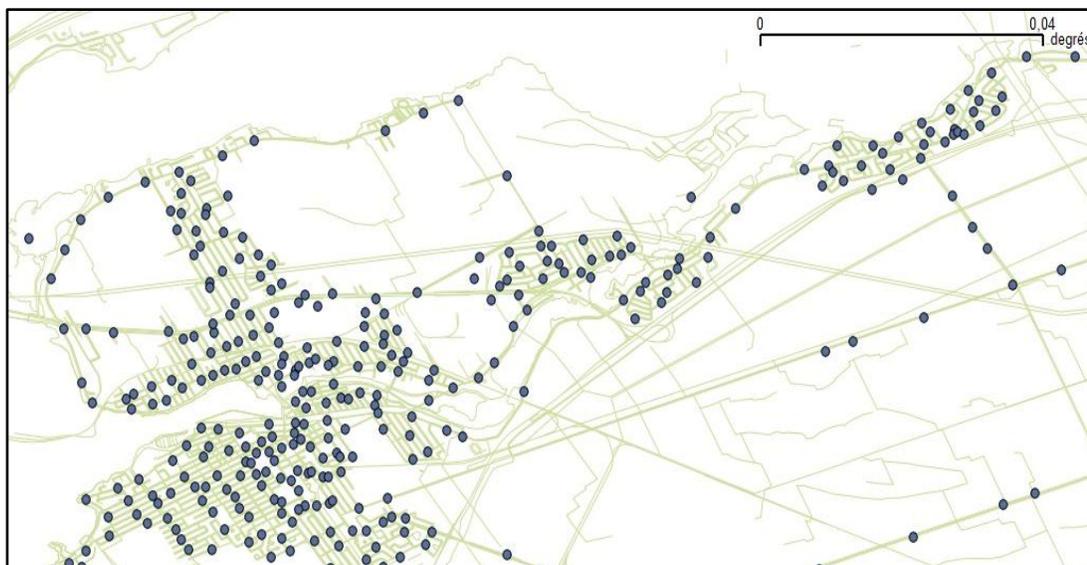


Figure 4.1 : Deux premières couches QGIS – Territoire couvert et arrêts actuels du réseau

Le nombre de déplacements effectués (69,894) pendant la période à l'étude rendait le téléchargement complet visuellement inutile. Il est impossible de tirer une quelconque conclusion en utilisant la totalité des flux répertoriés. L'option retenue a été de diviser les données en différents segments. Afin de conserver l'information sous une forme utile à l'analyse, l'heure de départ ainsi que la fréquence d'utilisation d'une même paire O/D ont été retenues comme critères. Une liste des demandes passées a été créée pour chaque heure de départ. Il y a 21 possibilités d'heure de départ pour l'horaire hebdomadaire d'opérations de Taxibus. Afin de faciliter l'identification des paires O/D les plus importantes, une légende a été mise en place pour l'affichage des informations.

Chacune des heures a été redivisée en trois segments en fonction de la fréquence d'utilisation. Les paires O/D ayant été utilisées entre une et quatre fois ont été mises en jaune et en turquoise. Les paires ayant une fréquence variant entre 5 et 17 fois pendant la période à l'étude apparaissent en bleu et finalement, les paires utilisées plus de 17 fois apparaissent en vert. La légende inclut aussi un trait de plus en plus large et une couleur de plus en plus foncée en fonction de la valeur qu'elle représente. De plus, l'arrêt servant d'origine pour un flux donné apparaît en rouge. Le trait unissant une paire O/D est aussi orienté à l'aide d'une flèche à son point de destination. La figure 4.2 présente un exemple de la fréquence supérieure à 17 pour une heure précise. D'autres exemples d'affichage sont présentés à l'annexe A. La

troisième couche ajoutée fut donc celle triée par heure et fréquence provenant de la matrice des flux créée précédemment. Cette classification a rendu possible l'analyse visuelle des flux de déplacements.

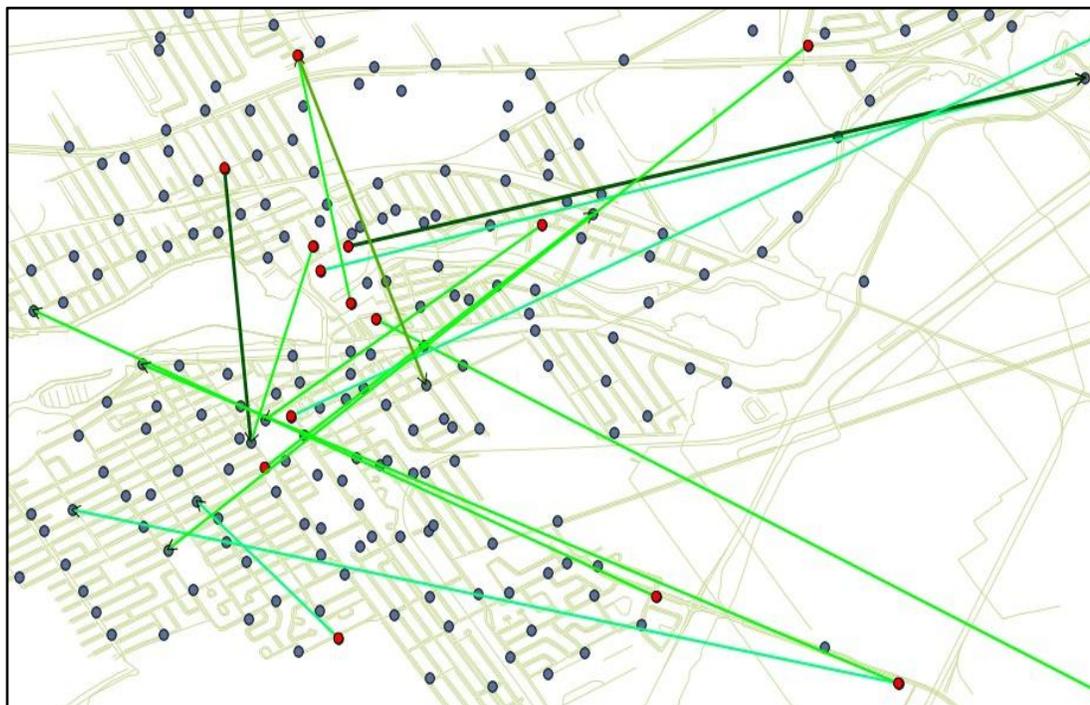


Figure 4.2 : Exemple d'affichage QGIS - secteur Valleyfield avec fréquence de plus de 17

Dans le même outil de représentation visuelle, une autre couche a été créée puis téléchargée : la fréquence d'utilisation des arrêts. Pour cette nouvelle couche, la légende utilisée est fonction de l'importance de la fréquence d'utilisation. Les arrêts sont tous représentés par un point bleu qui devient de plus en plus foncé et grossit à mesure que la fréquence d'utilisation augmente. La figure 4.3 présente un exemple du rendu de QGIS répertoriant les arrêts les plus utilisés lors de l'embarquement.

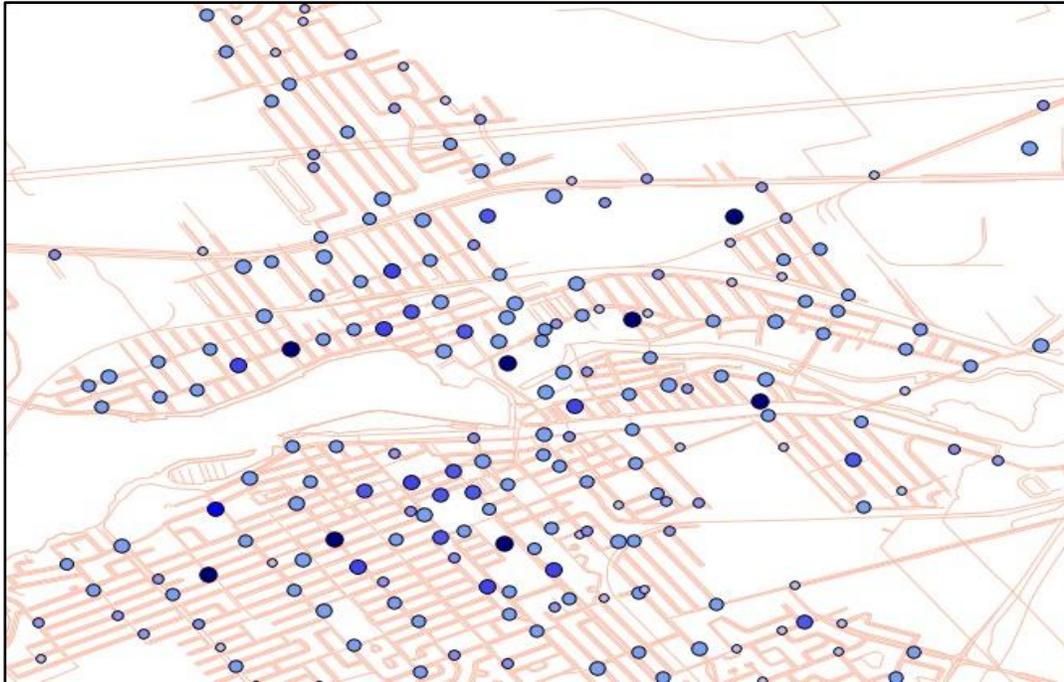


Figure 4.3 : Carte répertoriant les arrêts les plus utilisés à l'embarquement

Le troisième élément méthodologique utilisé afin de répondre aux questions de recherche a été de développer des trajets en utilisant Google Maps et Excel. Sur la base des informations propres au problème à l'étude ainsi que certaines contraintes présentées par l'entreprise, ils devaient pouvoir être réalisables et comparables entre eux.

Tout d'abord, la liste des arrêts actuels à forte utilisation a été prise en compte. Il ne s'agissait pas de les desservir tous avec les trajets proposés, mais de tenir compte de leur emplacement lors de l'élaboration des routes et de les inclure si cela est possible et pertinent. Le tableau 4.3 présente les arrêts les plus utilisés pendant la période à l'étude.

Ensuite, tel que mentionné dans la revue de la littérature, la durée des trajets est un des éléments qui ont été considérés pour l'initialisation. Le second élément considéré a été la fréquence de passage. Vuchic (2004) précise que « l'intervalle entre deux passages d'un véhicule devant un même point dans la même direction (*headway*) constitue l'un des éléments opérationnels à la base de tout système de transport ». « Les passagers préfèrent des passages rapprochés dans le temps afin de minimiser leur temps d'attente » (Murray 2001). Ces éléments ont donc tous

deux été pris en compte lors de l'élaboration des trajets proposés. Un trajet assez court permettrait à Taxibus d'offrir une fréquence de passage intéressante même si l'entreprise désirait acquérir un seul véhicule pour le moment. L'entreprise souhaitait optimiser l'utilisation du véhicule et la cible d'un trajet qui serait parcouru en 30 minutes a été évoquée par les responsables.

Numéro d'arrêt	Nombre d'embarquements	Nombre de débarquements	Total
248	1897	2772	4 669
260	1572	2649	4 221
206	1474	1498	2 972
414	1121	1667	2 788
335	1321	1113	2 434
354	1224	1058	2 282
622	896	1226	2 122
606	935	1168	2 103
118	1246	729	1 975
259	1090	884	1 974

Tableau 4.3 : Liste des arrêts les plus fréquemment utilisés

Bien que la résolution préconisée dans ce mémoire soit de type heuristique, ce type de problème peut être résolu de manière exacte avec un modèle de couverture maximale. La section qui suit présente la forme générale du modèle qui pourrait être utilisée afin de résoudre ce problème de manière exacte.

4.4 Modélisation pour résolution exacte : variables et paramètres généraux

Tout d'abord, définissons l'ensemble des origines existantes comme étant l'ensemble I . L'ensemble J sera celui qui contient les destinations déjà en place. Ces deux ensembles sont égaux et contiennent chacun 353 éléments $\{1, \dots, 353\}$. Une paire (i, j) est considérée différente de la paire (j, i) puisque les liens sont orientés.

De plus, $i \neq j$ puisqu'un usager ne peut effectuer un trajet d'une origine vers une destination coïncidant avec son origine. Les flux de passagers seront associés aux différentes paires (i, j) . À chaque paire (i, j) on associe une demande d_{ij} qui représente le pourcentage de déplacements ayant été effectués sur cette paire durant la période à l'étude.

Tous les trajets créés dans le cadre du projet feront partie de l'ensemble K qui inclut cinq éléments $\{1, 2, 3, 4, 5\}$. Tous les arrêts proposés dans les nouveaux trajets feront partie de l'ensemble $M = \{1, \dots, m\}$. Un paramètre v sera utilisé dans la validation de la couverture d'un arrêt par un trajet donné. La valeur de v représente la distance entre l'arrêt actuel d'origine i ou de destination j , et un arrêt $m \in M$ du trajet k . Le paramètre v peut prendre une valeur pouvant atteindre 13,100 par multiple de 100, ce qui donne lieu à l'ensemble $\{0, 100, 200, \dots, 13\,100\}$.

La variable x_{ijk} est binaire et prend la valeur 1 si le trajet k couvre à la fois l'origine i et la destination j . Elle prend la valeur 0 sinon. Pour un transport donné, l'origine $i \in I$ et la destination $j \in J$ seront considérées comme couvertes si le trajet $k \in K$ contient un arrêt m situé à une distance inférieure à la valeur du paramètre v . La fonction objectif tente donc de maximiser la couverture d'un trajet :

$$\text{Max} \sum_i \sum_j \sum_k d_{ij} x_{ijk}$$

Cette fonction objectif devrait être optimisée en respectant certaines contraintes. En plus de celles déjà énoncées, le trajet doit être réalisable avec un seul véhicule. La durée du trajet doit aussi être limitée à moins de 40 minutes dans un premier temps. Dans les différentes itérations, ce critère devrait être réduit jusqu'à 30 minutes puisque c'est l'une des demandes de l'opérateur. Par contre, afin de ne pas mettre de côté de très bonnes solutions, voire même l'optimum, la barre des 40 minutes est acceptable pour initier l'analyse. Le trajet proposé doit obligatoirement passer par le terminus de Valleyfield.

La somme des demandes couvertes doit être égale ou supérieure à 23,46% puisque c'est à partir de ce pourcentage que les frais d'opération du véhicule sont couverts. De plus, une demande couverte par un arrêt m ne peut être couverte qu'une seule

fois par trajet. Bien que la couverture double soit possible en réalité, le modèle ne doit pas additionner une demande couverte par deux arrêts d'un même trajet.

Le modèle présenté ci-haut ne tient pas compte de la capacité du véhicule ni de l'heure de passage de l'autobus. Pour ce faire, il faudrait inclure une variable qui est mise à jour à chaque arrêt du trajet et qui indique le nombre de passagers à bord du véhicule à cet arrêt à cette heure précise. Cette variable doit prendre en compte, les passagers qui montent à bord du véhicule et ceux qui en descendent. Il faudrait aussi modifier la valeur de d_{ij} pour d_{ijr} afin que la demande soit liée à une heure r .

Le dernier élément méthodologique d'importance dans la mise en place des trajets est le calcul de distance entre les arrêts actuels et les arrêts proposés. Il importe donc de préciser comment le calcul de celle-ci a été effectué.

4.5 Calcul de la distance

Plusieurs modèles existent pour calculer la distance entre deux points. Les plus connus sont des modèles servant à mesurer des distances dans un plan. L'une des possibilités est un calcul « à vol d'oiseau » aussi appelé distance euclidienne (Arcgis 2012, Mathworld 2013). Il s'agit de calculer la distance directe entre deux points, sans tenir compte des obstacles ou des routes.

Dans le cas de calculs de distance entre deux points situés sur une sphère, le calcul doit être effectué différemment (Mathworld 2013). Le fait que la Terre soit ronde implique que le calcul de la distance entre les arrêts doit être adapté. La distance entre deux points sera différente dépendant si ceux-ci sont à l'équateur ou au pôle. Il faut utiliser une formule qui prend en compte la sphéricité de la Terre ainsi que la latitude et la longitude à laquelle les points se trouvent. Bien que la Terre ne soit pas parfaitement sphérique, les calculs de distances utilisant les coordonnées géographiques émettent l'hypothèse qu'elle l'est, à l'exception des régions montagneuses pour lesquelles d'autres informations doivent être prises en compte (Wikipédia 2012). La formule à utiliser dans le cas de Taxibus est connue sous le nom de « formule du grand cercle. »

« La distance du grand cercle, plus généralement appelée distance orthodromique ou simplement orthodromie, est la plus petite distance entre deux points sur une sphère. Comme la Terre est

approximativement une sphère, la distance du grand cercle est souvent utilisée pour trouver la distance entre deux coordonnées (en connaissant leur longitude et leur latitude) sur une carte » (Wikipédia 2012, Wolfram Math World 2013).

Pour utiliser cette formule, il faut connaître les latitudes et longitudes en radians pour tous les points concernés. Les données recueillies sur les arrêts actuels du réseau de Taxibus sont exprimées en degrés de latitude et longitude plutôt qu'en radians. Afin de permettre le calcul des distances en se basant sur l'information déjà disponible, il a fallu trouver une formule permettant le calcul en degrés. Une autre formule dérivée de la formule du grand cercle et appelée « *Haversine formula* » permet d'effectuer ce calcul avec précision. Elle a été mise au point afin d'utiliser les coordonnées géographiques en degrés de latitude et de longitude plutôt qu'en radians. C'est donc cette formule qui a été retenue afin de calculer la distance entre les arrêts actuels du réseau et les arrêts proposés. La forme générale de la formule est présentée ici-bas (Wikipédia 2012) :

$$d = 2r \arcsin \left(\sqrt{\text{hav}(\phi_2 - \phi_1) + \cos(\phi_1) \cos(\phi_2) \text{hav}(\lambda_2 - \lambda_1)} \right)$$

$$= 2r \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos(\phi_1) \cos(\phi_2) \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right)$$

- d : distance entre les deux points (en utilisant la distance du grand cercle)
- r : rayon de la Terre
- ϕ_1, ϕ_2 : latitude du point 1 et latitude du point 2
- λ_1, λ_2 : longitude du point 1 et longitude du point 2.

La distance pertinente dans le cas présent est une distance entre deux coordonnées géographiques dont la latitude et la longitude en degrés sont connues. La valeur de 6370,97328 km a été utilisée comme rayon moyen de la Terre (Pearson SC 2012, Wikipédia 2012).

Pour vulgariser la formule présentée ci-haut, il s'agit de considérer les deux points comme étant tous les deux sur un « grand cercle » qui fait le tour de la terre. La formule considère le calcul de la distance existante entre ces cercles puis la position

de chacun des points sur leur cercle respectif. Finalement, en utilisant le rayon de la Terre on peut calculer la distance entre ces deux points sur la sphère en utilisant des notions de trigonométrie sphérique (Wikipédia 2013). La nécessité d'utiliser cette formule plutôt que toute autre s'explique par le fait qu'elle est la seule qui tient à la fois compte de la sphéricité de la Terre et des coordonnées des arrêts actuels en degrés plutôt qu'en radians.

En utilisant ces notions, il devient possible de comparer la couverture offerte par les trajets proposés. Pour ce faire, il a été nécessaire de construire quelques parcours qui ont été comparés entre eux à l'aide d'un modèle mathématique inspiré du modèle de couverture présenté plus haut.

Chapitre 5

Analyse et résultats

Ce chapitre présente les analyses et calculs effectués afin de proposer les cinq trajets présentés à l'entreprise. Une analyse de la rentabilité de chacun des trajets est aussi incluse dans ce chapitre afin de permettre une comparaison multidimensionnelle.

5.1 Flux

En analysant attentivement les résultats tirés de QGIS on constate un élément qui servira de pierre angulaire à l'élaboration des trajets. L'élément qui ressort de toutes les combinaisons visualisées est qu'il existe deux corridors densément utilisés. Le premier corridor est orienté nord-sud et va du secteur Grande-Île situé au nord vers le secteur Valleyfield plus au sud. Le second corridor est orienté est-ouest et unit le secteur Valleyfield plus à l'ouest à la partie nord du secteur St-Timothée longeant le boulevard Hébert plus à l'est. La partie plus au sud de la municipalité de St-Timothée, entre les rangs du boulevard Ste-Marie et du boulevard Cadieux ne fait pas partie du corridor densément utilisé. La figure 5.1 présente un des affichages générés par QGIS utilisé afin d'obtenir ces conclusions.

De plus, tel que mentionné précédemment, l'hypothèse ayant été retenue a été que l'origine actuelle de la demande est égale à l'arrêt actuel d'origine et la destination correspond à l'arrêt actuel de destination. Cette hypothèse a comme limite de ne pas tenir compte de leur origine ou de leur destination physique réelle.

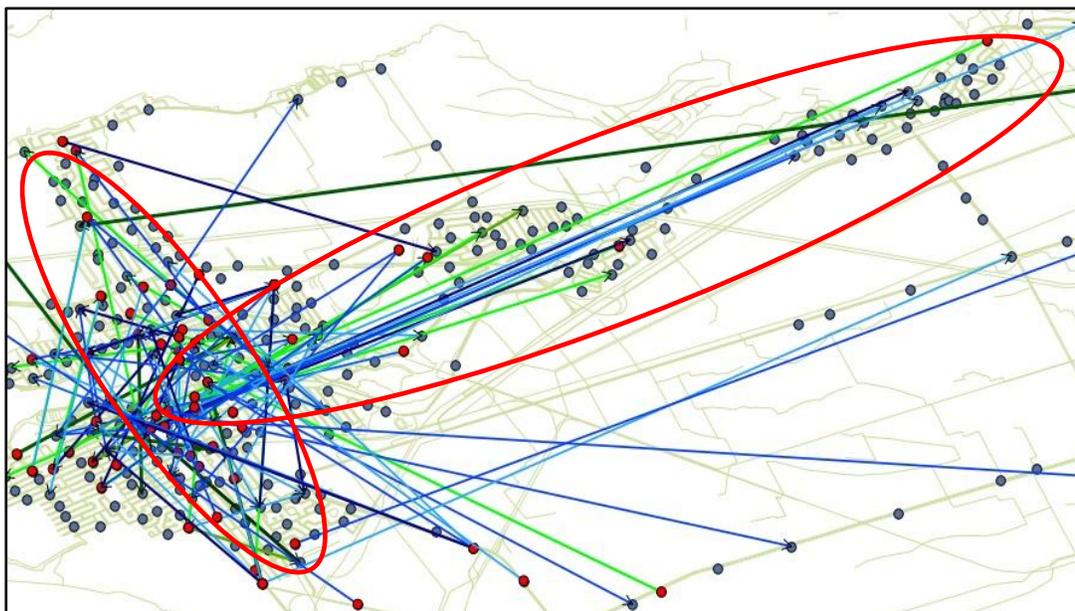


Figure 5.1 : Affichage de flux de déplacement présentant les corridors densément utilisés

5.2 Trajets

L'information sur les deux corridors identifiés à l'aide de QGIS comme étant densément utilisés a été prise en compte dans la construction de trajets. Il a été décidé de proposer trois trajets orientés nord-sud et deux trajets orientés est-ouest. Les deux premiers trajets nord-sud traverseront les secteurs de Grande-Île et Valleyfield. Le troisième trajet ayant la même orientation circulera seulement dans le secteur Valleyfield. Les deux derniers trajets orientés est-ouest circuleront dans les secteurs Valleyfield et St-Timothée. Tous les trajets proposés passent par le terminus de Valleyfield. La connectivité avec le transport intercity a ainsi été prise en compte. Le but de cette contrainte est de permettre aux usagers de transférer sur les circuits offerts par les autres compagnies de transport. Bien que Taxibus opère le réseau local, elle est en constante communication avec les partenaires offrant des services qui amènent les usagers vers les villes voisines. L'orientation qui semble se dessiner pour le futur avec ceux-ci est de rassembler les passagers à un ou deux points de service dans le territoire de Valleyfield afin de permettre à ces entreprises d'entrer et de sortir de la municipalité le plus rapidement possible, l'objectif étant de minimiser les temps de transport menant aux villes environnantes.

Afin de fournir des résultats testés dans des circonstances réelles de circulation, un membre de l'équipe a effectué plusieurs fois les trajets présentés ci-après. Les trajets ont été parcourus à l'heure de pointe du matin, à l'heure du dîner, en fin d'après-midi et à l'heure de pointe du soir. Les distances et le temps présentés pour compléter les parcours ont été testés en ralentissant avant chaque arrêt, en arrêtant complètement le véhicule à chaque fois puis, après l'arrêt complet, un délai de 15 secondes était chronométré avant de reprendre la route en accélérant graduellement. L'arrêt au terminus a été simulé pendant 90 secondes. Il est peu probable que lors d'un trajet donné il y ait une demande à chacun des arrêts du trajet. Par contre, en testant le trajet dans ces conditions, les chercheurs ont la conviction que dans des conditions réelles avec des passagers à bord, les temps calculés seront réalisables. Cette démarche a donc simulé les ralentissements et les accélérations ainsi que les temps d'attente liés aux feux de signalisation et à l'état de la circulation. La vitesse de circulation pendant la simulation était identique à celles des autres véhicules et respectait la limite imposée par la signalisation routière. Les conditions de circulation prévalant lors des essais sur route peuvent avoir influencé les temps enregistrés, mais avec les multiples tournées effectuées, les responsables sont sûrs que les résultats sont réalistes et peuvent servir de base à la planification des opérations. Une exception est toutefois à noter lors d'un essai chronométré dans le secteur Saint-Timothée. Les détails de cet élément sont fournis dans la section est-ouest qui suit.

5.2.1 Nord-sud

Le premier trajet (NS1) orienté nord-sud dessert le secteur de Grande-Île au nord puis se dirige vers le sud en direction de Valleyfield. La première proposition inclut deux détours dans le parcours. Le premier crochet dans le parcours consiste à détourner le trajet de son chemin le plus court par la rue Alexandre pour passer directement à l'intersection des rues Ellen et Danis par la rue Notre-Dame. La bifurcation s'explique par la volonté de passer directement devant un arrêt à forte demande. Cet arrêt présentement répertorié sous le numéro 118 a été identifié comme l'un des dix plus utilisés du réseau. L'entreprise désire ainsi desservir cet arrêt avec la distance de marche la plus faible possible. La seconde bifurcation dans le trajet est elle aussi causée par la présence d'un arrêt à forte utilisation. Celui-ci

est situé au coin des rues Bissonnette et Champlain et est répertorié sous le numéro 354. Ce premier trajet a une longueur de 9,920 mètres et a été parcouru en 34:50 minutes.

Le second trajet orienté nord-sud porte le numéro NS2 et emprunte le chemin le plus direct sans détour. Plutôt que de desservir les deux points de forte demande avec une distance de marche inférieure à 100 mètres, le trajet conserve la trajectoire la plus directe vers le sud. L'autobus continue sur la rue Alexandre dans le premier cas et reste sur le chemin Larocque plutôt que d'emprunter le second détour. Le second trajet étant le plus court des deux options vues jusqu'à maintenant, ses 8,020 mètres ont été parcourus en 30:44 minutes. Les détours amènent une différence de 1,900 mètres pour une durée de 4:06 minutes. La liste complète des arrêts proposés pour chacun des deux trajets peut être consultée aux annexes B et D. Les arrêts sont situés de part et d'autre de la rue, et ce dans les deux directions. Les seules exceptions sont pour les rues à sens unique. Dans ce cas, des rues adjacentes ont été identifiées afin d'offrir sensiblement le même trajet en sens inverse.

Pour la représentation visuelle des trajets, un autre logiciel gratuit a été utilisé. Quelques programmes ont été testés, mais c'est le logiciel Google Maps qui a finalement été retenu. La facilité d'accès et la flexibilité d'utilisation en font un outil parfait pour ce projet. De plus, les cartes peuvent être partagées gratuitement avec un autre utilisateur. L'entreprise peut ainsi avoir accès en tout temps et facilement aux cartes déjà créées. La seule contrainte d'utilisation est qu'un nombre maximal de destinations peut être ajouté à un trajet. Dans le cas des trajets créés pour ce projet, le nombre d'arrêts excède la capacité maximale de Google Maps. Le trajet a donc été scindé en deux en utilisant le passage au terminus comme coupure afin de permettre une représentation complète dans le même outil. L'emplacement des arrêts du trajet nord-sud 1 peut être visualisé sur les figures 5.2 et 5.3. Tous les arrêts sont identifiés par un marqueur bleu. Les détours demandés par l'entreprise sont entourés d'une forme noire. Pour le trajet nord-sud 2, ces détours sont enlevés pour continuer directement par le chemin le plus court. Le trajet nord-sud 2 complet peut-être consulté à l'annexe C.

Lors de la présentation des résultats préliminaires, la question de la possibilité d'enlever le détour lors de la circulation en direction sud-nord a été proposée. Une analyse plus approfondie des fréquences d'utilisation ainsi que la provenance des déplacements des arrêts couverts par les détours a permis d'affirmer que lors des voyages sud-nord, dans le détour passant par Ellen et Danis, très peu d'usagers vont monter à bord afin de se diriger vers le secteur Grande-Île, mais plusieurs usagers descendront à ces arrêts. Il est donc nécessaire de visiter le détour dans les deux sens du parcours.

Pour ce qui est du détour par les rues Bissonnette et Montcalm, il n'est pas nécessaire de le visiter dans les deux sens. Étant donné que le trajet est court autour de l'hôpital et prend moins de cinq minutes (chemin Larocque/Champagne/St-Thomas/Salaberry), il est réaliste de proposer de ne faire ce détour qu'en direction sud. Donc, après la boucle autour de l'hôpital, l'autobus pourrait reprendre à droite sur le chemin Larocque plutôt que de refaire le détour en sens inverse. Il est vrai que cette modification a la conséquence que certains usagers devront être à bord plus longtemps, mais il y a tout de même un gain de temps pour l'entreprise.

Le troisième trajet proposé (NS3) se limite à visiter le secteur de Valleyfield seulement. Le trajet ne dépasse pas la rue Notre-Dame au nord et va jusqu'à l'arrêt actuel identifié par le numéro 607 devant Inter Metal sur le chemin Larocque. Il reprend ensuite le chemin Jacques-Cartier et remonte vers le nord en tournant à gauche sur boul. Ste-Marie puis en reprenant le chemin St-Thomas comme pour les autres trajets nord-sud. Ce troisième trajet est présenté à la figure 5.4 et la liste complète des arrêts peut être consultée à l'annexe E.

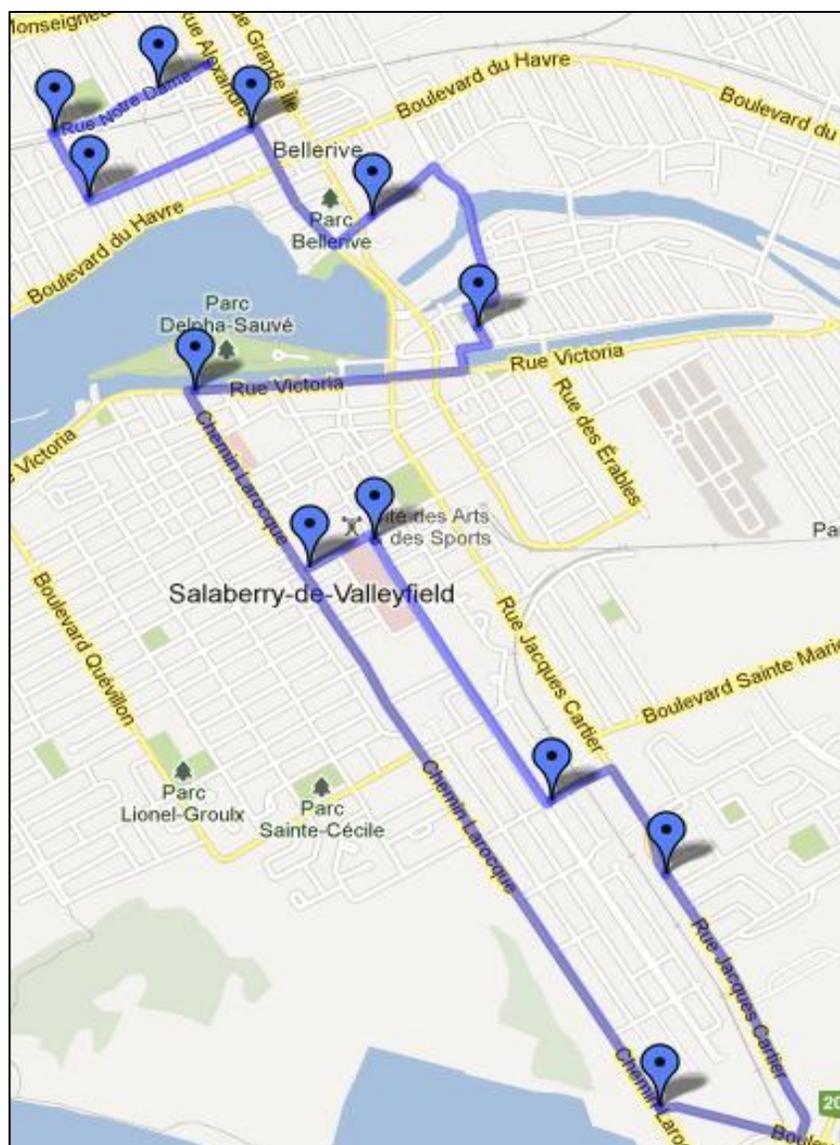


Figure 5.4 : Trajet NS3

5.2.2 Satisfaction de la demande pour les trajets nord-sud

À la suite de l'élaboration des trois trajets orientés nord-sud, il est nécessaire de comparer les demandes des usagers satisfaites par l'un ou l'autre de ces trajets. Le service actuellement offert comble 100% des demandes de manière exacte puisque chaque usager peut choisir le moment, l'origine et la destination parmi les options offertes par Taxibus. Tel qu'établi précédemment, une couverture de 23,46% de la demande suffirait toutefois à couvrir les frais d'opérations du véhicule et constituerait

un compromis acceptable pour les dirigeants de Taxibus. La mise en place d'un service d'autobus avec un circuit régulier ne peut assurément offrir le même niveau de service. L'opérateur en est conscient et est prêt à considérer une option financièrement viable qui répondrait tout de même aux besoins des usagers. Pour ce faire, la couverture des demandes a été analysée en utilisant les différents trajets proposés.

Le premier critère considéré a été la distance d'éloignement. En utilisant la formule « *Haversine* » décrite précédemment pour calculer la distance entre deux points d'une sphère, il a été possible de valider si un arrêt actuel est couvert ou non par un arrêt des trajets proposés. Les coordonnées géographiques des arrêts déjà en place ont été utilisées ainsi que celles des nouveaux arrêts proposés. Cinq distances de couverture différentes ont été initialement testées : 100, 200, 300, 400 et 500 mètres. Vuchic (2004) définit « la distance de couverture primaire à l'intérieur de 400 mètres et moins pour les villes de petites et moyennes tailles. Cette distance représente une marche d'environ cinq minutes. La couverture secondaire s'étend de cette distance jusqu'à 800 mètres. Entre 400 et 800 mètres l'intérêt des usagers pour le service de transport en commun par autobus diminue jusqu'à atteindre presque zéro ». La distance de marche étant trop importante aux yeux des usagers, ils se tournent vers des moyens de transport alternatif et délaissent le service offert.

Afin de tenir compte de cette information, une matrice binaire a été créée pour valider la couverture des arrêts actuels par les arrêts proposés sur les différents trajets. Le but de ces calculs est d'identifier si dans les premiers 500 mètres, la couverture d'au moins 23,46% des demandes est atteinte. Dans l'affirmative, les frais d'opérations du véhicule seraient couverts et il serait donc rentable de mettre en place un trajet d'autobus.

Dans les faits, une demande couverte à une distance donnée est obligatoirement couverte par les distances d'éloignement supérieures. Donc, dès qu'une demande est couverte, elle est aussi incluse dans les données de couverture des distances suivantes. Pour chaque arrêt actuel couvert par un arrêt proposé, le test de validation renvoyait une valeur positive. Suite à la mise en place de la matrice, l'étape de validation suivante était d'identifier si les demandes de déplacement d'une origine à une destination précises étaient couvertes.

Dans la littérature scientifique, la double couverture est nécessaire afin de considérer qu'une demande est desservie correctement. La couverture simple à l'une ou l'autre des extrémités ne satisfera pas l'utilisateur. L'analyse a donc testé trois critères de validation : la demande est couverte à l'origine, la demande est couverte à la destination ou elle est couverte aux deux extrémités. Ce projet a donc utilisé les mêmes critères de validation que les travaux sur le sujet et a considéré la couverture d'une demande de déplacement satisfaite seulement si l'origine et la destination sont toutes deux couvertes.

La comparaison de couverture entre les trajets a utilisé le pourcentage des demandes qui sont couvertes en fonction des distances retenues. Donc, pour chaque 100 mètres d'éloignement supplémentaire, le gain net en pourcentage en couverture a été calculé. Un tableau sommaire de couverture de 100 à 500 mètres est présenté au tableau 5.1. Afin de valider le modèle utilisé, le calcul a été fait jusqu'à l'obtention de la couverture totale des demandes. Dans le cas des trajets nord-sud, la couverture totale est atteinte à 13,1 km pour les trois trajets, ce qui signifie qu'en mettant en place les trajets proposés, il faudrait demander à tous les usagers de marcher au maximum cette distance pour l'un ou l'autre des trajets afin de considérer qu'ils sont desservis par celui-ci. Bien entendu, le projet étudié n'était pas de couvrir 100% de la demande avec un seul trajet.

Une analyse préliminaire montre que déjà à 100 mètres, les trajets NS1 et NS3 couvrent presque la même proportion des demandes aux deux extrémités. Le trajet NS2 est celui qui offre la moins bonne couverture avec deux fois moins de demandes couvertes. Cet écart entre les trajets NS1 et NS3 par rapport au trajet NS2 s'atténue toutefois à mesure que la distance s'accroît.

Si le critère des 400 mètres, le plus couramment utilisé dans les travaux scientifiques, est analysé plus en détail, la proportion des demandes couvertes dépasse les 20% pour deux des trois trajets. Par contre, aucun des trajets n'atteint la couverture nécessaire à égaler les frais d'opération du véhicule. Le trajet NS1, couvre quatre fois plus de demande à cette distance qu'à 100 mètres. Le trajet NS2 quant à lui ne couvre même pas 13% des demandes à 400 mètres. Pour la couverture simple, il est tout de même intéressant de noter que le trajet NS1 couvre environ 50% des demandes à l'origine ou à la destination tout comme le trajet NS3.

La performance du trajet NS2 est moins impressionnante avec environ 40% des demandes couvertes à l'une ou l'autre des extrémités.

En utilisant le critère des 500 mètres tel qu'utilisé par l'entreprise, les résultats démontrent qu'avec le trajet NS1, une augmentation de 3% des demandes de déplacements sont couvertes à l'origine ou à la destination. Pour la double couverture l'augmentation est de 2% pour ce trajet par rapport au critère des 400 mètres et atteint 22,82%. Toujours selon le même critère, le trajet NS2 couvre 45% des demandes à l'origine, presque 50% à la destination, mais seulement 18% aux deux extrémités. Le trajet 3 couvre 50% des demandes à l'origine, presque 54% des requêtes à la destination et 23% sont couvertes à la fois à l'origine et à la destination.

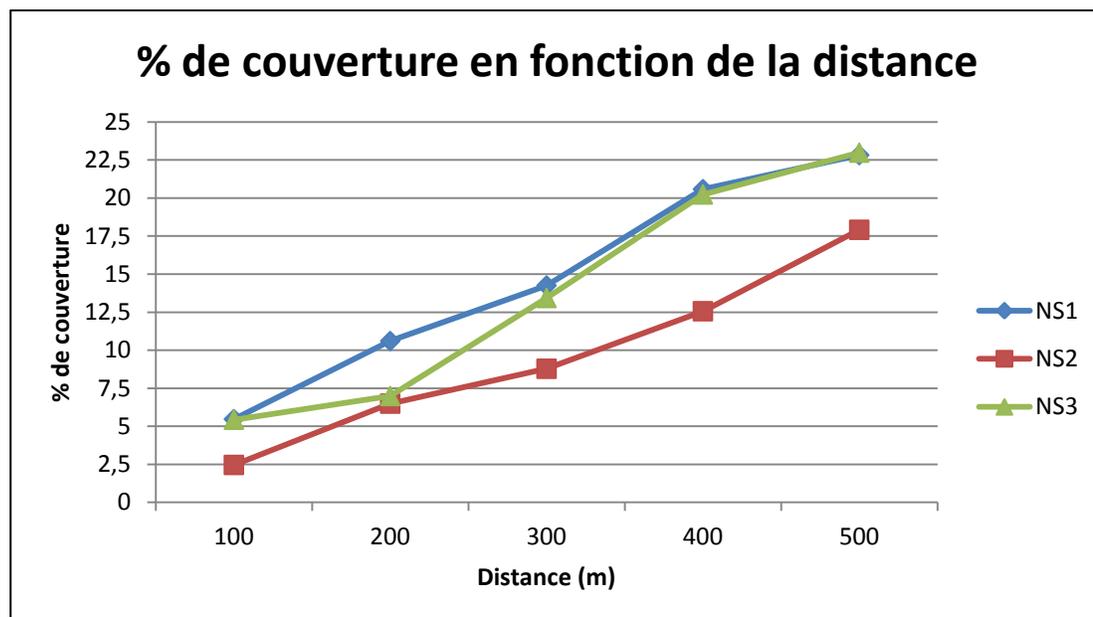


Figure 5.5 : Pourcentage de couverture en fonction de l'accessibilité pour les trajets nord-sud

Une simple analyse visuelle de la figure 5.5 permet de constater que le trajet NS3 permet d'obtenir une augmentation importante de la couverture entre 200 et 300 mètres. À partir de cette distance la performance de couverture est comparable à celle du trajet NS1.

Afin de permettre une analyse plus exhaustive, il est nécessaire de considérer toutes les options possibles. C'est pour cette raison que l'exploration du second corridor est-ouest a aussi été mise en place. Pour ce deuxième axe densément utilisé, deux trajets supplémentaires ont été proposés.

Demandes couvertes par les trajets orientés nord-sud											
Nombre de déplacements						% de la demande couverte					
	ORIGINE						ORIGINE				
	< 100 m	< 200 m	< 300m	< 400m	< 500m		< 100 m	< 200 m	< 300m	< 400m	< 500m
NS1	14 421	22 664	27 566	33 884	35 570	NS1	20,63	32,43	39,44	48,48	50,89
NS2	10 603	17 992	22 066	26 862	31 552	NS2	15,17	25,74	31,57	38,43	45,14
NS3	13 760	18 946	26 090	32 869	34 775	NS3	19,69	27,11	37,33	47,03	49,75
	DESTINATION						DESTINATION				
	< 100 m	< 200 m	< 300m	< 400m	< 500m		< 100 m	< 200 m	< 300m	< 400m	< 500m
NS1	16 316	24 317	28 383	35 006	37 651	NS1	23,34	34,79	40,61	50,08	53,87
NS2	12 973	20 342	24 270	29 939	34 859	NS2	18,56	29,10	34,72	42,83	49,87
NS3	15 051	20 100	27 474	34 492	37 185	NS3	21,53	28,76	39,31	49,35	53,20
	ORIGINE ET DESTINATION						ORIGINE ET DESTINATION				
	< 100 m	< 200 m	< 300m	< 400m	< 500m		< 100 m	< 200 m	< 300m	< 400m	< 500m
NS1	3 822	7 407	9 960	14 386	15 949	NS1	5,47	10,60	14,25	20,58	22,82
NS2	1 716	4 536	6 140	8 776	12 518	NS2	2,46	6,49	8,78	12,56	17,91
NS3	3 797	4 889	9 389	14 141	16 060	NS3	5,43	6,99	13,43	20,23	22,98

Tableau 5.1 : Demandes de déplacement couvertes par les trajets nord-sud

5.2.3 Est-ouest

Les deux trajets orientés est-ouest desservent le secteur de Saint-Timothée puis se dirigent vers le terminus de Valleyfield. La première proposition EO1 part de l'intersection du boulevard Hébert et de l'extrémité est de la rue Saint-Laurent puis continue sur le boulevard Hébert jusqu'à la rue Léger. Le parcours emprunte ensuite la rue Léger jusqu'à la rue Masson puis reprend le boulevard Hébert jusqu'au chemin du Golf. À l'intersection suivante, le trajet EO1 prend l'embranchement le plus au sud en suivant la continuité du boulevard Hébert puis roule jusqu'au rond-point pour reprendre la première rue sur la gauche qui porte le nom de rue Hébert. Le trajet se termine moins d'un kilomètre plus loin en entrant dans le terminus. Ce premier trajet a une longueur de 9,380 mètres et a été parcouru en 23 minutes et 15 secondes.

Les conditions menant à ce résultat sont des conditions particulières de circulation telles que mentionnées précédemment. Lors de tous les autres passages du membre de l'équipe dans ce secteur, la circulation était chaque fois plus dense que lors de la prise des chronométrages. Bien que le trajet ait été chronométré deux fois, les conditions de circulation étaient comparables et ont mené aux résultats présentés. Il n'est pas exclu que la durée réelle du parcours soit plus longue si la circulation est plus dense, mais nous n'avons pas été en mesure de documenter une situation différente.

Le second trajet orienté est-ouest porte le numéro EO2 et emprunte un chemin légèrement différent. Il suit un parcours identique au trajet EO1 dans le secteur Saint-Timothée, mais emprunte la direction la plus au nord dans l'embranchement situé tout de suite après l'arrêt situé à l'intersection du boulevard Hébert et du chemin du Golf. Le trajet EO2 emprunte le boulevard Monseigneur-Langlois qu'il suit jusqu'à la rue Fabre située juste avant le centre commercial. Il continue ensuite jusqu'à la rue Dufferin, puis descend la rue St-Charles jusqu'à la rue Alphonse-Desjardins qui mène au terminus de Valleyfield. Le second trajet n'est pas significativement plus long avec ses 10,970 mètres, mais a été parcouru en 29 minutes et 31 secondes soit environ six minutes de plus. Les phases des feux de circulation très longues à au moins deux intersections expliquent en partie la différence dans la durée des trajets. La liste complète des arrêts proposés pour chacun des deux trajets peut être consultée aux annexes F, G et I. Le trajet EO1 est

présenté aux figures 5.6 et 5.7. Les arrêts du trajet EO2 ne faisant pas partie des arrêts communs aux deux trajets peuvent être vus à l'annexe H.

À la suite de l'élaboration de ces deux autres trajets orientés est-ouest, il est nécessaire de comparer les demandes des usagers satisfaites par l'un ou l'autre de ceux-ci tel que réalisé pour les trajets nord-sud. Une analyse basée sur les mêmes critères que pour les trajets nord-sud a donc été réalisée pour les trajets est-ouest. Les résultats sont présentés au tableau 5.3.

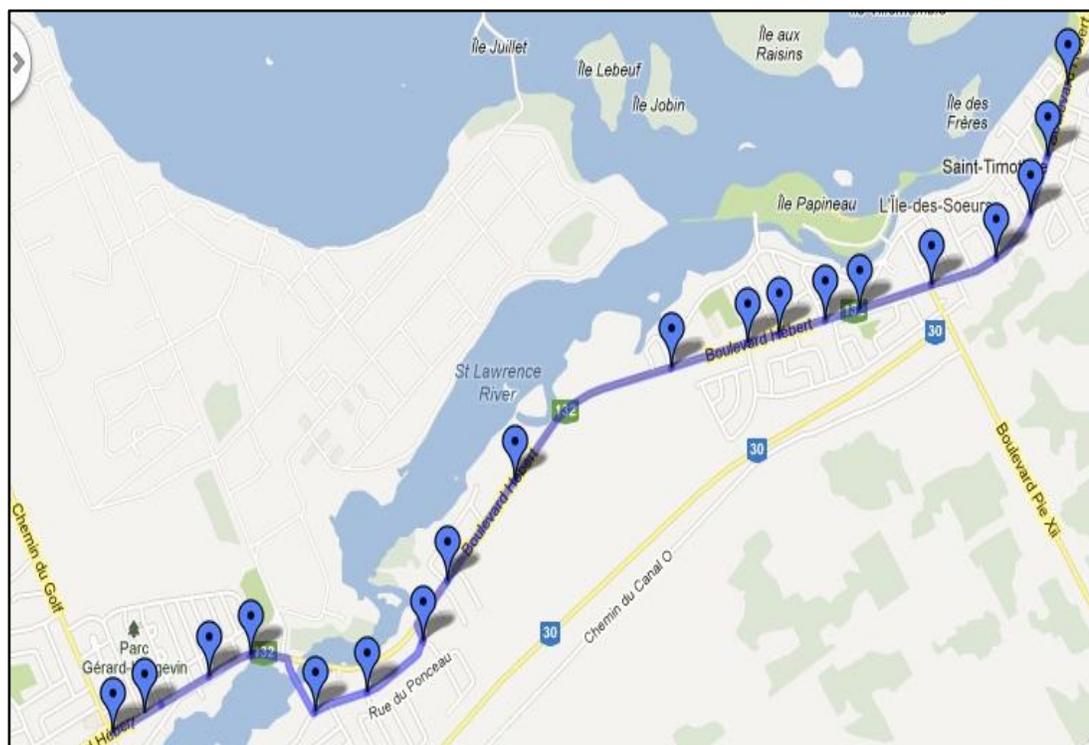


Figure 5.6 : Arrêts communs aux deux propositions de trajet est-ouest



Figure 5.7 : Seconde partie des arrêts du trajet EO1

Demandes couvertes par les trajets orientés est-ouest											
Nombre de déplacements						% de la demande couverte					
	ORIGINE						ORIGINE				
	<100 m	<200 m	<300m	<400 m	<500m		<100 m	<200 m	<300 m	<400 m	<500m
EO1	5 885	9 598	12 363	14 549	17 530	EO1	8,42	13,73	17,69	20,82	25,08
EO2	4 654	7 460	10 508	11 773	14 794	EO2	6,66	10,67	15,03	16,84	21,17
	DESTINATION						DESTINATION				
	<100 m	<200 m	<300m	<400 m	<500m		<100 m	<200 m	<300 m	<400 m	<500m
EO1	5 428	9 878	12 295	14 123	17 578	EO1	7,77	14,13	17,59	20,21	25,15
EO2	4 043	6 467	10 357	11 193	15 312	EO2	5,78	9,25	14,82	16,01	21,91
	ORIGINE ET DESTINATION						ORIGINE ET DESTINATION				
	<100 m	<200 m	<300m	<400 m	<500m		<100 m	<200 m	<300 m	<400 m	<500m
EO1	884	1 228	1 861	2 149	3 618	EO1	1,26	1,76	2,66	3,07	5,18
EO2	212	522	1 025	1 186	1 899	EO2	0,30	0,75	1,47	1,70	2,72

Tableau 5.2 : Demandes de déplacement couvertes par les trajets est-ouest

5.2.4 Satisfaction de la demande pour les trajets est-ouest

Le premier élément qui retient l'attention en analysant les trajets est-ouest est que les demandes satisfaites sont très faibles pour les deux trajets. Si on considère les 100 premiers mètres de couverture, moins de 2% des demandes seront couvertes aux deux extrémités. La couverture simple est de moins de 10% à l'origine ou à la destination pour chacun des trajets.

Si le critère d'éloignement des 400 mètres est analysé plus en détail, la proportion des demandes couvertes est légèrement meilleure mais même avec 5% des demandes couvertes aux deux extrémités le trajet EO1 est très loin de la rentabilité espérée. Le trajet EO2 offre une moins bonne couverture avec moins de 3% des demandes satisfaites.

En utilisant le critère des 500 mètres considéré par l'entreprise, les résultats démontrent qu'avec le trajet EO1, environ 25% des demandes de déplacement sont couvertes à l'origine ou à la destination, mais seulement 5% sont couvertes aux deux extrémités. Toujours selon le même critère, le trajet EO2 couvre quant à lui 21% des demandes à l'origine ainsi que la même proportion à la destination et seulement 2,72% aux deux extrémités. La figure 5.8 permet de constater que les gains de couvertures en fonction de l'augmentation de la distance sont comparables entre ces deux trajets. On note aussi que le trajet EO1 offre la meilleure performance des deux options orientés est-ouest, mais la mise en place de ce trajet résulterait tout de même en un déficit d'opération. Le point mort n'est pas atteint avec les distances analysées en première instance pour les trajets est-ouest.

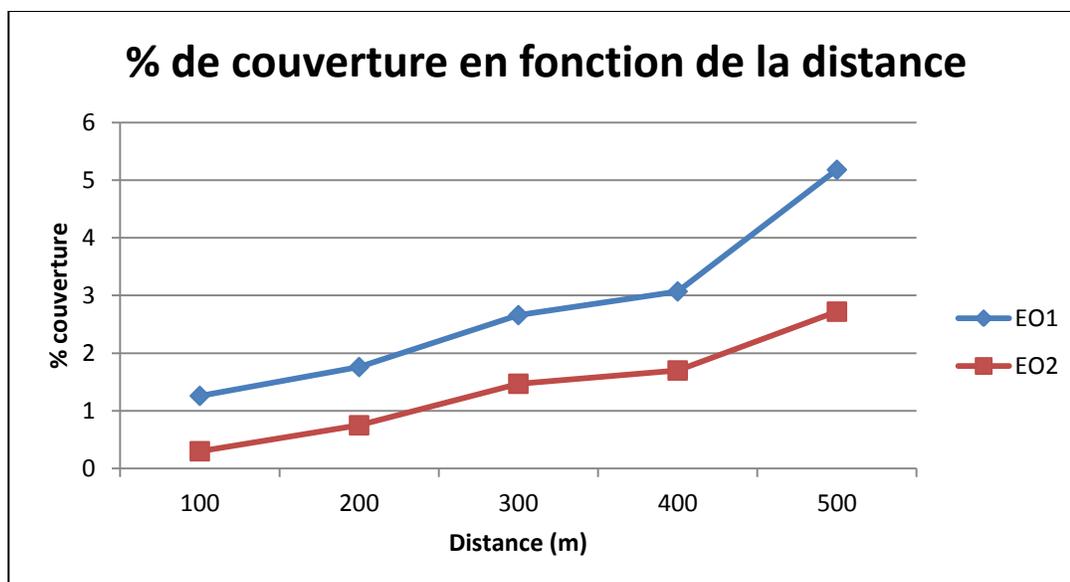


Figure 5.8 : Pourcentage de couverture en fonction de l'accessibilité pour les trajets est-ouest

5.3 Analyse comparative des trajets

Un des éléments discutés avec les membres du Conseil d'administration de Taxibus est la possibilité d'offrir un horaire simple à retenir pour les usagers. Cet élément est aussi un critère discuté lors de la revue de la littérature. La proposition d'un trajet pouvant être parcouru en 30 minutes a donc été à la source de plusieurs discussions et ce critère a influencé le choix des cinq trajets proposés précédemment. Deux des cinq trajets soumis (les trajets est-ouest) ont été chronométrés sous la barre des 30 minutes. Les trajets nord-sud ont tous été parcourus en plus de 30 minutes. Le trajet NS2 peut par contre être considéré comme réalisable en 30 minutes à cause d'un dépassement de 44 secondes. Pour ce qui est des deux autres trajets nord-sud, NS1 et NS3, ils dépassent la barre des 30 minutes de manière plus importante. Par contre, le trajet NS1 couvre 16 arrêts actuels de plus que le trajet NS2. Le trajet NS3 offre quant à lui un gain de couverture de la demande malgré le dépassement de la longueur et de la durée du trajet.

La dernière partie de l'analyse consiste à identifier pour chaque trajet, à partir de quelle distance la couverture des demandes génère assez d'économies sur les

coûts de taxis pour couvrir les coûts d'opérations du véhicule présentés au chapitre 4.

Les calculs présentés dans les tableaux 5.3 et 5.4 ont été effectués avec les coûts bruts, c'est-à-dire excluant la contribution des usagers. Le premier présente les pourcentages de couverture et les coûts reliés pour les trajets nord-sud et le second pour les trajets est-ouest. Les coûts sont présentés pour les distances variant entre 100 et 2,000 mètres de distance. La raison qui a motivé le choix des calculs avec les coûts avant perception est que l'équipe de recherche ne dispose pas des détails de partage entre les différentes parties impliquées (Taxibus compagnie de taxis). D'après les discussions ayant eu lieu, il n'y a pas de décision claire sur ce partage à ce jour. Actuellement, toutes les perceptions réalisées auprès des usagers servent à payer les frais de la compagnie de taxis. La mise en place d'un circuit régulier suscite une interrogation sur le partage des frais perçus. Par exemple, une règle claire devra statuer si un usager se procurant un laissez-passer mensuel a droit aux deux services, au service de Taxibus ou seulement au service régulier d'autobus. La décision des différents tarifs dépendant du moyen de transport dont l'utilisateur bénéficie devra aussi être analysée. Ce sont là des questions auxquelles il est impossible de répondre dans le cadre de cette analyse, la portée de ceux-ci allant bien au-delà du simple calcul mathématique. La mise en place d'un service régulier peut faire l'objet d'un incitatif au transport en commun interurbain qui influencera le coût du droit de passage. Il peut aussi s'agir d'une décision politique. Pour cette raison, les calculs comparatifs présentés ont utilisé strictement les coûts bruts.

Distance (mètres)	% de couverture			Diminution des frais de taxis (\$)			Balance des coûts d'opérations de l'autobus (\$)		
	NS1	NS2	NS3	NS1	NS2	NS3	NS1	NS2	NS3
100	5,47 %	2,46 %	5,43 %	29 003	13 022	28 813	95 451	111 432	95 641
200	10,60 %	6,49 %	6,99 %	56 207	34 421	37 100	68 247	90 033	87 354
300	14,25 %	8,78 %	13,43 %	75 580	46 593	71 247	48 873	77 861	53 206
400	20,58 %	12,56 %	20,23 %	109 166	66 596	107 307	15 287	57 858	17 146
500	22,82 %	17,91 %	22,98 %	121 027	94 991	121 869	3 427	29 462	2 584
600	30,81 %	23,78 %	32,29 %	163 423	126 126	171 247	(38 970)	(1 673)	(46 793)
700	33,23 %	25,85 %	35,75 %	176 270	137 092	189 588	(51 817)	(12 638)	(65 134)
800	39,21 %	34,40 %	42,34 %	207 959	182 462	224 555	(83 506)	(58 009)	(100 102)
900	41,89 %	36,03 %	45,86 %	222 157	191 113	243 223	(97 704)	(66 660)	(118 769)
1000	43,47 %	39,65 %	48,20 %	230 558	210 281	255 660	(106 104)	(85 828)	(131 206)
1100	45,55 %	41,86 %	49,07 %	241 599	222 021	260 266	(117 145)	(97 567)	(135 812)
1200	53,17 %	51,71 %	56,17 %	281 984	274 282	297 912	(157 530)	(149 828)	(173 458)
1300	54,99 %	53,80 %	57,69 %	291 682	285 361	305 963	(167 228)	(160 907)	(181 510)
1400	56,64 %	55,50 %	59,20 %	300 416	294 376	313 992	(175 963)	(169 922)	(189 538)
1500	59,74 %	58,86 %	60,50 %	316 853	312 201	320 882	(192 399)	(187 747)	(196 428)
1600	64,65 %	64,31 %	60,62 %	342 903	341 097	321 497	(218 450)	(216 644)	(197 043)
1700	64,92 %	64,58 %	61,06 %	344 307	342 501	323 826	(219 854)	(218 048)	(199 373)
1800	64,96 %	64,93 %	61,12 %	344 558	344 353	324 168	(220 104)	(219 899)	(199 714)
1900	65,50 %	65,50 %	61,90 %	347 411	347 396	328 281	(222 957)	(222 942)	(203 827)
2000	65,83 %	65,50 %	62,29 %	349 141	347 396	330 367	(224 687)	(222 942)	(205 914)

Tableau 5.3 : Pourcentage de couverture de la demande en fonction de l'accessibilité et coûts reliés pour les trajets nord-sud

Distance (mètres)	% de couverture		Diminution des frais de taxis (\$)		Balance des coûts d'opérations de l'autobus (\$)	
	EO1	EO2	EO1	EO2	EO1	EO2
100	1,26 %	0,30 %	6 708	1 609	117 746	122 845
200	1,76 %	0,75 %	9 319	3 961	115 135	120 493
300	2,66 %	1,47 %	14 122	7 778	110 332	116 676
400	3,07 %	1,70 %	16 307	9 000	108 146	115 454
500	5,18 %	2,72 %	27 455	14 410	96 999	110 043
600	8,25 %	4,96 %	43 755	26 324	80 699	98 130
700	12,50 %	6,16 %	66 322	32 645	58 131	91 808
800	16,17 %	6,82 %	85 756	36 159	38 697	88 295
900	18,39 %	9,44 %	97 541	50 045	26 913	74 408
1000	24,15 %	10,78 %	128 099	57 171	(3 646)	67 283
1100	26,20 %	13,76 %	138 951	73 000	(14 497)	51 454
1200	28,62 %	16,79 %	151 805	89 034	(27 352)	35 419
1300	40,66 %	19,40 %	215 662	102 914	(91 208)	21 540
1400	45,31 %	19,59 %	240 331	103 908	(115 878)	20 546
1500	52,47 %	21,41 %	278 288	113 568	(153 835)	10 886
1600	57,23 %	24,30 %	303 527	128 873	(179 074)	(4 420)
1700	63,91 %	26,59 %	338 965	141 045	(214 511)	(16 591)
1800	66,30 %	31,26 %	351 645	165 821	(227 192)	(41 367)
1900	70,42 %	37,60 %	373 500	199 445	(249 046)	(74 992)
2000	72,13 %	42,97 %	382 560	227 917	(258 107)	(103 463)

Tableau 5.4 : Pourcentage de couverture de la demande en fonction de l'accessibilité et coûts reliés pour les trajets est-ouest

Étant donné la situation réelle ainsi que les demandes liées aux arrêts actuels, il a été possible d'identifier à quelle distance la couverture de la demande atteignait les 23,46% pour générer des économies des frais de taxis plus grandes que les coûts d'opération de l'autobus. Tel que mis en évidence dans le tableau 5.4, cette valeur se trouve entre 500 et 600 mètres d'éloignement pour les trois trajets nord-sud. Cette couverture est atteinte à 1,0 km pour le trajet EO1 et à 1,6 km pour le trajet EO2.

Étant donné que les trajets nord-sud sont les plus intéressants du point de vue monétaire, les couvertures plus précises entre 500 et 600 mètres ont été calculées et sont présentées dans le tableau 5.5.

Distance (m)	% de couverture de la demande			Diminution des frais de taxis (\$)			Balance des coûts d'opérations de l'autobus (\$)		
	NS1	NS2	NS3	NS1	NS2	NS3	NS1	NS2	NS3
500	22,82	17,91	22,98	121 027	94 991	121 870	3 427	29 462	2 584
525	24,83	18,52	25,71	131 711	98 209	136 340	(7 258)	26 245	(11 887)
550	26,44	19,68	28,33	140 218	104 371	150 242	(15 764)	20 083	(25 789)
575	28,00	23,15	28,54	148 489	122 795	151 381	(24 036)	1 659	(26 927)
600	30,81	23,78	32,29	163 423	126 126	171 247	(38 970)	(1 673)	(46 793)

Tableau 5.5 : Couverture des trajets nord-sud entre 500 et 600 mètres et coûts correspondants

Le tableau 5.5 met en évidence qu'avec une norme de distance de 525 mètres, les trajets NS1 et NS3 couvrent une partie assez grande des demandes pour générer des économies sur les frais de taxis qui payent les frais d'exploitation de l'autobus. Pour le trajet NS2, le troisième meilleur choix en ce qui a trait à la couverture, le point mort se trouve à 600 mètres de distance. Comme l'atteinte de la couverture minimale de 23,46% de la demande n'est pas atteinte avant 1000 mètres pour les trajets orientés est-ouest, l'analyse plus détaillée n'était pas pertinente.

Après l'analyse de ces informations, on constate que l'implantation du trajet NS1 est celle qui serait la plus avantageuse pour répondre au compromis de couverture de la

demande, de longueur de trajet ainsi que d'économies générées. Bien que le trajet NS3 offre une augmentation de la couverture incrémentale comparable au trajet NS1, la durée et la longueur constituent un inconvénient important. Comme la différence entre ces deux trajets est assez faible en ce qui a trait aux économies monétaires, le gain de temps et de distance fait pencher la balance du côté du trajet NS1.

Le trajet proposé couvre 123 arrêts actuels à 525 mètres et 136 arrêts à 600 mètres. Toutes les demandes de transport à l'origine ou à la destination provenant de ces arrêts pourraient toutes être desservies par le trajet. Pour ce qui est de l'établissement de l'horaire de passage, le trajet 1 a été chronométré à 34 minutes et 50 secondes. Par contre, comme mentionné plus tôt dans ce rapport, le détour par les rues Bissonnette et Montcalm peut être retiré du trajet en direction nord, ce qui a pour effet de diminuer le temps de celui-ci d'environ deux minutes, ce qui n'est pas suffisant pour offrir un intervalle de passage identique chaque heure puisque l'aller-retour ne peut-être effectué à l'intérieur d'une heure. Dans les faits, l'entreprise bénéficiera d'une planification plus conservatrice pour le début des opérations en utilisant les temps chronométrés dans le cadre de ce projet.

Chapitre 6

Conclusion

Les étapes d'analyse de la mise en place d'un service régulier d'autobus pour la municipalité de Salaberry-de-Valleyfield ont été présentées dans les chapitres de ce mémoire. Les opérations actuelles ont été présentées de concert avec les données concernant les demandes des usagers desservies sur une période de 15 mois. Le calcul du point mort a été le premier élément d'analyse permettant l'identification du minimum de demandes devant être couvertes. Afin de rentabiliser le service régulier d'autobus, 23,46% des demandes doivent être satisfaites à la fois à l'origine et à la destination. La représentation visuelle à l'aide de QGIS a permis la mise en lumière de deux corridors densément utilisés. Ensuite, le calcul de la distance entre les arrêts a nécessité l'utilisation de la « *Haversine formula* » afin de prendre en compte la sphéricité de la Terre. À la suite de ces analyses, cinq trajets ont été développés, analysés et comparés afin d'identifier la meilleure proposition pour l'opérateur mais aussi pour les usagers du service de Taxibus. L'impact réel de l'implantation d'un service régulier est difficile à évaluer avec précision en partie à cause de la différence entre les modes de fonctionnement passé et futur.

Certains usagers actuels du service pourraient être découragés par le fait qu'ils n'obtiennent plus le service hautement personnalisé qu'ils recevaient. Les distances de marche pour se rendre à l'arrêt ainsi que pour atteindre la destination pourraient avoir un impact sur l'achalandage futur. À l'inverse, les citoyens qui n'utilisent pas actuellement le service à cause de la nécessité de réserver le service pourraient commencer à le fréquenter occasionnellement ou régulièrement. Il en est de même des utilisateurs qui montent actuellement à bord des véhicules d'autres entreprises de transport qui passent

dans la ville. L'intérêt de celles desservant la municipalité de Valleyfield pour le transport interurbain à ne faire qu'un ou deux arrêts dans la ville pourrait exercer des pressions sur l'entreprise locale et ainsi influencer la demande future. Les autorités pourraient confier à Taxibus l'entière responsabilité d'amener les passagers à des points de transfert par exemple. Ces diverses options ne peuvent malheureusement pas être quantifiées pour le moment.

À la suite de cette analyse, l'entreprise sera à même de constater que l'achat d'un véhicule de type minibus serait un bon investissement pour une utilisation sur le trajet NS1 ou NS3. Par contre, son utilisation sur les deux trajets est-ouest ne serait pas rentable sous la forme proposée actuellement en tenant compte des demandes présentes.

L'implantation d'un circuit ou d'un autre devra aussi prendre en considération les usagers étant desservis à l'origine ou à la destination seulement. L'élaboration de nouvelles règles sera nécessaire afin d'établir la manière dont ceux-ci seront pris en charge par le système. Il n'est pas exclu d'assigner des voitures taxis au terminus lors des passages de l'autobus afin de transporter les usagers n'étant desservis qu'à l'origine vers leur destination finale. La même proposition pourrait être mise en place afin d'aller chercher les usagers qui ne sont desservis qu'à la destination afin de les transporter vers des arrêts de transit pour les faire passer sur le circuit régulier. L'idée principale est que les tous les arrêts actuels couverts par le circuit retenu soient remplacés par les arrêts proposés pour le circuit mis en place. Ce changement obligera ainsi les usagers à modifier leurs habitudes et maximisera le retour sur investissement.

Des résistances importantes au changement sont à prévoir chez les usagers. Il y a un certain gain en liberté pour les usagers quant à l'accès au service sans réservation, mais il y a aussi une perte de personnalisation du service. L'entreprise aura avantage à présenter tous les avantages de ce projet pour la municipalité et les usagers sur la place publique. La mise en place d'un des parcours nord-sud apporte un gain financier non négligeable pour l'exploitant qui peut justifier une période d'acclimatation pour les usagers.

Dans un projet de recherche futur, il serait intéressant d'explorer la piste de l'analyse complète de l'entreprise en incorporant les coûts d'exploitation du service de transport adapté, le but étant de valider que l'utilisation proposée dans ce rapport soit la meilleure

pour l'entreprise de manière globale. Il serait aussi possible de modéliser le réseau et de rechercher la solution optimale à ce problème. Quoi qu'il en soit, la proposition présentée dans ce rapport apporte une économie des coûts d'opérations qui justifie la mise en place d'un service régulier.

Bibliographie

- ARCGIS (2012). « Bibliothèque professionnelle : Présentation de l'analyse de la distance euclidienne » [réf. 16 octobre 2012].
<http://help.arcgis.com/fr/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//009z0000001t000000>
- CARREFOUR DU TAXI (2012). « Les campivallensiens ont adoptés le taxibus » [réf. 7 décembre]. <http://www.carrefourdutaxi.ca/fr/dossier-de-presse>
- CEDER, A. et WILSON, N.H.M. (1986). « Bus Network Design », *Transportation Research Part B*, vol. 20, p.331-344.
- CHAMBRE DE COMMERCE DU MONTRÉAL MÉTROPOLITAIN (2010). « Le transport en commun au cœur du développement économique de Montréal » [réf. du 7 décembre 2012].
http://www.ccm.ca/documents/etudes/2010_2011/10_11_26_ccmm_etude-transport_fr.pdf
- CHURCH, R.L. et REVELLE, C. S. (1974). « The Maximal Covering Location Problem », *Regional Science*, vol. 32, p. 101–118.
- CURRENT, J.R., REVELLE, C.S. et COHON, J.L. (1985). « The Maximum Covering/ Shortest Path Problem: A Multiobjective Network Design and Routing Formulation », *European Journal of Operational Research*, vol. 21, p. 189-199.
- FAN, W. et MACHEMEHL, R.B. (2006). « Optimal Transit Route Network Design Problem with Variable Transit Demand: Genetic Algorithm Approach », *Journal of Transportation Engineering*, vol.132, p. 40-51.
- GUIHAIRE, V. et HAO, J.K. (2008). « Transit Network Design and Scheduling: A Global Review », *Transportation Research Part A*, vol. 42, p. 1251-1273.

- KWAN, M.-P. (1998). « Space-Time and Integral Measures of Individual Accessibility: A Comparative Analysis Using a Point-Based Framework », *Geographical Analysis*, vol. 30, p.191-216.
- MATISZIW, T.C., MURRAY, A.T. et KIM, C. (2006). « Strategic Route Extension in Transit Networks », *European Journal of Operational Research*, vol. 171, p. 661-673.
- MAUTONNE, A. et URQUHART, M.E. (2009). « A Route Set Construction Algorithm for the Transit Network Design Problem », *Computers & Operations Research*, vol.36, p. 2440-2449.
- MIANDOABCHI, E., ZANJIRANI FARAHANI, R., DULLAERT, W. et SZETO, W.Y. (2012). « Hybrid Evolutionary Metaheuristics for Concurrent Multi-Objective Design of Urban Road and Public Transit Networks », *Networks and Spatial Economics*, vol. 12, p. 441-480.
- MURRAY, A. (2001). « Strategic Analysis of Public Transportation Coverage », *Socio-Economic Planning Science*, vol. 35, p.175-188.
- MURRAY, A. et DAVIS, R. (2001). « Equity in Regional Service Provision », *Journal of Regional Science*, vol. 41, p.577-600.
- MURRAY, A., DAVIS, R., STIMSON, R. et FERREIRA, L. (1998). « Public Transportation Access », *Transportation Research part D: Transport and environment*, vol. 3, p. 319-328.
- MURRAY, A. T. et WU, X. (2003). « Accessibility Tradeoffs in Public Transit Planning », *Geographical Systems*, vol. 5, p. 93-107.
- PEARSON SOFTWARE CONSULTING LLC (2012). « Latitude, Longitude and Great Circles » [réf. 16 octobre 2012]. <http://www.cpearson.com/excel/latlong.aspx>
- QUANTUM GIS (2012) « Système d'Information Géographique » Projet de l'Open Source Geospatial Foundation [réf. du 9 août 2012] <http://www.qgis.org/fr.html>
- SZETO, W.Y. et WU, Y. (2011). « A Simultaneous Bus Route Design and Frequency Setting Problem for Tin Shui Wai, Hong Kong », *European Journal of Operational Research*, vol. 209, p. 141-155.

- TORMOS, P. et coll. (2008). « A Genetic Algorithm for Railway Scheduling Problems », *Studies in Computational Intelligence*, vol. 128, p.255-276.
- VILLE DE VALLEYFIELD, (2013). [réf. du 20 janvier 2013]
<http://ville.valleyfield.qc.ca/citoyens/biblio-culture-et-histoire/histoire/histoire-de-grande-ile>
- VUCHIC, V. (2004). « Urban Transit: Operations, Planning and Economics», Wiley, New York, 644 pages.
- WIRASINGHE, S.C. et GHONEIM, N.S. (1981) « Spacing of Bus-Stops for Many to Many Travel Demand », *Transportation Science*, vol. 15, p. 210-221.
- WIKIPÉDIA, L'ENCYCLOPÉDIE LIBRE (2012). « Distances » [réf. du 8 décembre 2012]. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Distance_\(math%C3%A9matiques\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Distance_(math%C3%A9matiques))
- WIKIPÉDIA, L'ENCYCLOPÉDIE LIBRE (2012). « Distance du Grand Cercle » [réf. du 8 décembre 2012]. http://fr.wikipedia.org/wiki/Distance_du_grand_cercle
- WIKIPÉDIA, L'ENCYCLOPÉDIE LIBRE (2012). « Haversine Formula » [réf. du 8 décembre 2012]. http://en.wikipedia.org/wiki/Haversine_formula
- WIKIPÉDIA, L'ENCYCLOPÉDIE LIBRE (2012). « Organisation des Municipalités du Québec » [réf. du 7 décembre 2012].
http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9organisation_des_municipalit%C3%A9s_du_Qu%C3%A9bec
- WIKIPEDIA, L'ENCYCLOPÉDIE LIBRE (2012). « Terre » [réf. du 10 août 2012]
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Terre>
- WOLFRAM MATHWORLD, Wolfram Mathematica (2013). [réf. du 16 janvier 2013]
<http://mathworld.wolfram.com/Distance.html>
- WOLFRAM MATHWORLD, Wolfram Mathematica (2013). [réf. du 16 janvier 2013]
<http://mathworld.wolfram.com/GreatCircle.html>
- ZENG, W., CHANG, X. et LV, J. (2010). « Design of Data Model for Urban Transport GIS », *Journal of Geographic Information System*, vol. 2 , p. 106-112.

ZHAO, F. et ZENG, X. (2008). « Optimization of Transit Route Network, Vehicle Headways and Timetables for large-scale transit networks», *European Journal of Operational Research*, vol. 186, p. 841-855.

ANNEXES

Annexe A

Exemples d'affichage QGIS

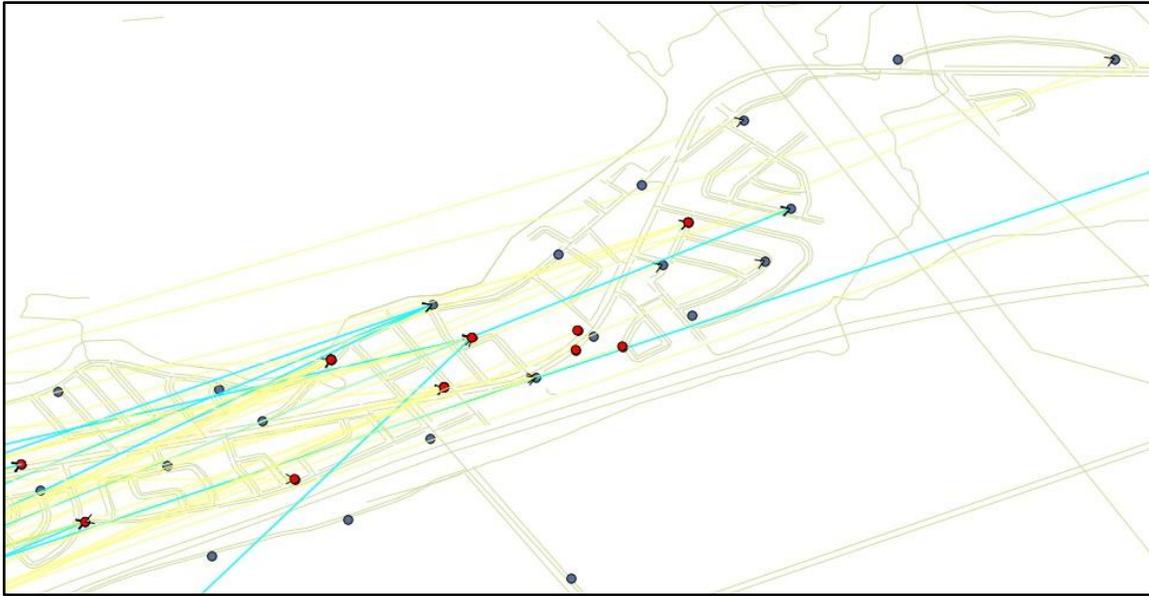


Figure A.1 : Exemple de flux dans secteur St-Timothée avec fréquence entre 1 et 4 à 6h30

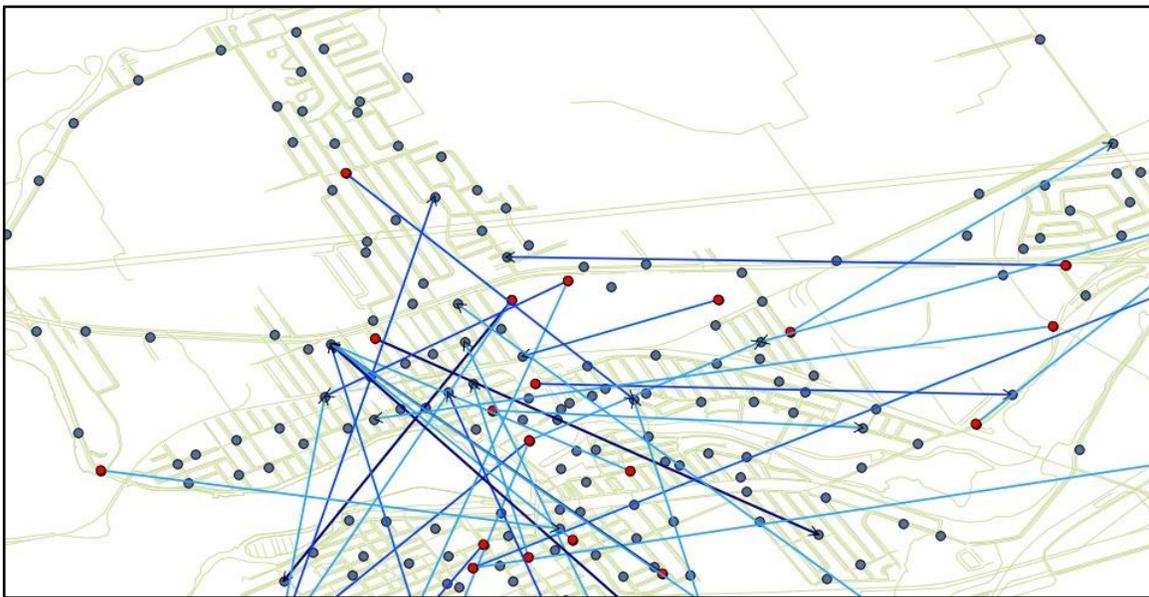


Figure A.2 : Exemple de flux dans le secteur Valleyfield avec fréquence entre 5 et 17 à 18h10

Annexe B

Liste des arrêts du trajet NS1

Trajet NS1 – Partie 1					
				Coordonnées	
Arrive à l'arrêt (mm:ss)	Emplacement de l'arrêt	Distance depuis dernier arrêt (m)	Localisation de l'arrêt	Latitude	Longitude
00:00	Joannette/Bord-de-l'eau	n/d	Devant le casse-croûte	45.286769	-74.145441
00:37	Bord-de-l'eau/Grande-Ile	260	Légèrement avant l'intersection	45.285791	-74.148155
01:45	Grande-Ile/Aumais	500	Avant l'intersection	45.282002	-74.146138
02:25	Grande-Ile/Bellerive	250	À l'emplacement actuel de l'arrêt 1026	45.279926	-74.144728
03:05	Grande-Ile/Dubois	250	Avant l'intersection	45.277857	-74.143322
03:40	Grande-Ile/Nicolas	170	À l'emplacement actuel de l'arrêt 1030	45.276551	-74.142362
04:34	Grande-Ile/Michaud	350	À l'emplacement actuel de l'arrêt 1032	45.273618	-74.140256
05:32	Grande-Ile/Mgr Langlois	450	À l'emplacement actuel de l'arrêt 1036	45.269858	-74.137467
09:21	Alexandre	350	Dans l'espace vert	45.26808	-74.138333
09:57	Alexandre/Notre-Dame	220	Avant l'intersection	45.266311	-74.137091
10:30	Notre-Dame/St-Philippe	150	Avant l'intersection	45.265622	-74.138526
11:34	Notre-Dame/Ellen	400	Avant l'intersection	45.26411	-74.143279
12:25	Ellen/Danis	270	Avant l'intersection	45.261969	-74.141898
13:14	Danis/Edmond	300	Avant l'intersection devant église	45.263009	-74.138714
14:07	Danis/Alexandre	290	À l'emplacement actuel de l'arrêt 138	45.264172	-74.135439
15:36	Alexandre/Anderson	290	À l'emplacement actuel de l'arrêt 144	45.261997	-74.133728
17:04	Dufferin	400	Devant le centre d'achats (abribus)	45.261535	-74.130571
17:56	Dufferin/Maden	210	Avant l'intersection à la fin du stationnement du Canadian Tire	45.262686	-74.12853
19:23	Buntin/Sullivan	350	À l'intersection des rues	45.260611	-74.126505
20:25	Terminus	350	Dans le terminus	45.257936	-74.126789

Tableau B.1 : Information sur la première partie des arrêts du trajet NS1

Trajet NS1 – Partie 2					
				Coordonnées	
Arrivée à l'arrêt (mm:ss)	Emplacement de l'arrêt	Distance depuis dernier arrêt (m)	Localisation de l'arrêt	Latitude	Longitude
23:20	Victoria/Académie	280	À l'emplacement actuel de l'arrêt 428	45.256745	-74.128355
24:26	Victoria/Nicholson	300	À l'emplacement actuel de l'arrêt 420	45.256507	-74.131708
25:14	Victoria/De la Fabrique	380	Avant l'intersection	45.256275	-74.136088
25:59	Ch. Laroque/Ellice	200	À côté du commerce de meubles	45.255667	-74.13759
26:49	Ch. Laroque/Du Marché	250	Avant l'intersection	45.253612	-74.135836
27:24	Ch. Laroque/Champlain	150	Avant l'intersection	45.252551	-74.134959
28:29	Champlain/Bissonnette	400	Avant l'intersection	45.250744	-74.139251
29:02	Bissonnette/Montcalm	150	Avant l'intersection	45.249519	-74.138475
30:08	Salaberry/Ch.Larocque	450	Avant le chemin Larocque, juste passé St-François	45.250493	-74.133838
31:16	Ch. Larocque/Des Dominicaines	350	Avant le stationnement de Pneus Lavoie	45.248165	-74.131306
32:14	Champagne/St-Thomas	400	Avant l'intersection	45.247668	-74.127575
33:06	St-Thomas	400	Devant l'entrée principale de l'hôpital	45.250457	-74.129511
33:52	St-Thomas/Salaberry	160	Avant l'intersection	45.251798	-74.130627
34:35	Salaberry/Ch. Larocque	240	Avant l'intersection	45.250952	-74.132931
34:50 Fin de l'itinéraire					
Distance totale parcourue (m)		9 920			

Tableau B.2 : Information sur la seconde partie des arrêts du trajet NS1

Annexe C

Présentation du trajet NS2

Annexe D

Liste des arrêts du trajet NS2

Trajet NS2 – Partie 1					
				Coordonnées	
Arrivée à l'arrêt (mm:ss)	Emplacement de l'arrêt	Distance depuis dernier arrêt (m)	Localisation de l'arrêt	Latitude	Longitude
00:00	Joannette/Bord-de-l'eau	n/d	Devant le casse-croûte	45.286769	-74.145441
00:37	Bord-de-l'eau/Grande-Ile	260	Légèrement avant l'intersection	45.285791	-74.148155
01:45	Grande-Ile/Aumais	500	Avant l'intersection	45.282002	-74.146138
02:25	Grande-Ile/Bellerive	250	À l'emplacement actuel de l'arrêt 1026	45.279926	-74.144728
03:05	Grande-Ile/Dubois	250	Avant l'intersection	45.277857	-74.143322
03:40	Grande-Ile/Nicolas	170	À l'emplacement actuel de l'arrêt 1030	45.276551	-74.142362
04:34	Grande-Ile/Michaud	350	À l'emplacement actuel de l'arrêt 1032	45.273618	-74.140256
05:32	Grande-Ile/Mgr Langlois	450	À l'emplacement actuel de l'arrêt 1036	45.269858	-74.137467
09:21	Alexandre	350	Dans l'espace vert	45.26808	-74.138333
09:57	Alexandre/Notre-Dame	220	Avant l'intersection	45.266311	-74.137091
10:32	Alexandre/Danis	250	Avant l'intersection	45.264333	-74.135461
11:49	Alexandre/Du Havre	160	Avant l'intersection	45.263102	-74.134559
13:40	Alexandre/Anderson	140	Avant l'intersection	45.261997	-74.133728
15:08	Dufferin	400	Devant le centre d'achats (abribus)	45.261535	-74.130571
16:00	Dufferin/Maden	210	Avant l'intersection à la fin du stationnement du Canadian Tire	45.262686	-74.12853
17:27	Buntin/Sullivan	350	À l'intersection des rues	45.260611	-74.126505
18:29	Terminus	350	Dans le terminus	45.257936	-74.126789

Tableau D.1 : Information sur la première partie des arrêts du trajet NS2

Trajet NS2 – Partie 2					
				Coordonnées	
Arrivée à l'arrêt (mm:ss)	Emplacement de l'arrêt	Distance depuis dernier arrêt (m)	Localisation de l'arrêt	Latitude	Longitude
21:24	Victoria/Académie	280	À l'emplacement actuel de l'arrêt 428	45.256745	-74.128355
22:30	Victoria/Nicholson	300	À l'emplacement actuel de l'arrêt 420	45.256507	-74.131708
23:18	Victoria/De la Fabrique	380	Avant l'intersection	45.256275	-74.136088
24:03	Ch. Laroque/Ellice	200	À côté du commerce de meubles	45.255667	-74.13759
24:33	Ch. Laroque/Du Marché	250	Avant l'intersection	45.253612	-74.135836
25:24	Ch. Laroque/Montcalm	300	Avant l'intersection	45.251447	-74.134111
26:28	Ch. Laroque/Édouard	220	Avant l'intersection	45.2498	-74.132684
27:10	Ch. Larocque/Des Dominicaines	230	Avant le stat. de Pneus Lavoie	45.248165	-74.131306
28:08	Champagne/St-Thomas	400	Avant l'intersection	45.247668	-74.127575
29:00	St-Thomas	400	Devant l'entrée principale de l'hôpital	45.250457	-74.129511
29:46	St-Thomas/Salaberry	160	Avant l'intersection	45.251798	-74.130627
30:29	Salaberry/Ch. Larocque	240	Avant l'intersection	45.250952	-74.132931
30:44	Fin de l'itinéraire				
	Distance totale parcourue (m)	8 020			

Tableau D.2 : Information sur la seconde partie des arrêts du trajet NS2

Annexe E

Liste des arrêts du trajet NS3

Trajet NS3 - Partie 1					
				Coordonnées	
Arrivée à l'arrêt (mm:ss)	Emplacement de l'arrêt	Distance depuis dernier arrêt (m)	Localisation de l'arrêt	Latitude	Longitude
00:00	Notre-Dame/St-Philippe	n/d	Avant la rue	45.265622	-74.138526
01:04	Notre-Dame/Ellen	400	Avant la rue	45.26411	-74.143279
01:55	Ellen/Danis	270	Avant la rue	45.261969	-74.141898
02:44	Danis/Edmond	300	Avant la rue devant église	45.263009	-74.138714
03:37	Danis/Alexandre	290	Avant la rue (arrêt 138)	45.264172	-74.135439
05:06	Alexandre/Anderson	290	Avant la rue 144	45.261997	-74.133728
06:34	Dufferin	400	Devant le centre d'achats (abribus)	45.261535	-74.130571
07:26	Dufferin/Maden	210	Avant la rue (fin stat. Ca)	45.262686	-74.12853
08:53	Buntin/Sullivan	350	Au bout de la rue Sullivan	45.260611	-74.126505
09:55	Terminus	350	Dans le terminus	45.257936	-74.126789
12:05	Victoria/Académie	280	Après l'intersection 428	45.256745	-74.128355
13:56	Victoria/Nicholson	300	Avant la rue (arrêt 420)	45.256507	-74.131708
14:44	Victoria/De la Fabrique	380	Avant le stop	45.256275	-74.136088
15:29	Ch. Laroque/Ellice	200	À côté du commerce de meubles	45.255667	-74.13759
16:19	Ch. Laroque/Du Marché	250	Avant la rue	45.253612	-74.135836
16:54	Ch. Laroque/Champlain	150	Avant la rue	45.252551	-74.134959
17:59	Champlain/Bissonnette	400	Avant la rue	45.250744	-74.139251
18:32	Bissonnette/Montcalm	150	Avant la rue	45.249519	-74.138475
19:36	Salaberry/Ch.Larocque	450	Avant le chemin Larocque, juste passé St-François	45.250493	-74.133838

Tableau E.1 : Information sur la première partie des arrêts du trajet NS3

Trajet NS3 - Partie 2					
				Coordonnées	
Arrivée à l'arrêt (mm:ss)	Emplacement de l'arrêt	Distance depuis dernier arrêt (m)	Localisation de l'arrêt	Latitude	Longitude
20:44	Ch. Larocque/Des Dominicaines	350	Avant le stat. de Pneus Lavoie	45.248165	-74.131306
21:46	Ch.Laroque/Taillefer	350	Avant la rue	45.245306	-74.128892
22:55	Ch.Laroque/Boul. Ste-Marie	350	Avant la rue	45.242749	-74.126628
23:38	Ch.Laroque/Trudeau	260	Avant la rue	45.240769	-74.124852
24:15	Ch.Laroque/Marchand	210	Avant la rue	45.239179	-74.123479
25:35	Ch.Laroque/Daoust	350	Avant la rue	45.236629	-74.121226
26:25	Ch.Laroque/Gérard-Cadieux	300	Avant la rue	45.234389	-74.119268
29:22	Jacques-Cartier/Pelletier	950	Avant la rue	45.237555	-74.115669
30:55	Jacques-Cartier/Codebecq	400	Avant la rue	45.240478	-74.118018
32:12	Jacques-Cartier/Trudeau	350	Avant la rue	45.243149	-74.119778
33:01	Boul. Ste-Marie/Jacques-Cartier	220	Avant la rue	45.244731	-74.121344
33:48	Ste-Marie/St-Thomas	230	Avant la rue	45.243719	-74.123715
34:20	St-Thomas/Lionel-Groulx	280	Avant la rue	45.245725	-74.125539
35:02	St-Thomas/Champagne	270	Avant la rue	45.247802	-74.127315
36:36	St-Thomas	400	Devant l'entrée principale de l'hôpital	45.250457	-74.129511
37:04	St-Thomas/Salaberry	160	Avant la rue	45.251798	-74.130627
37:50	Salaberry/Ch. Larocque	240	Avant la rue	45.250952	-74.132931
Fin de l'itinéraire					
Distance totale parcourue (m)		11 090			

Tableau E.2 : Information sur la seconde partie des arrêts du trajet NS3

Annexe F

Liste des arrêts communs aux trajets EO1 et EO2

Arrêts communs aux trajets EO1 et EO2					
				Coordonnées	
Arrivée à l'arrêt (mm:ss)	Emplacement de l'arrêt	Distance depuis dernier arrêt (m)	Localisation de l'arrêt	Latitude	Longitude
00:00	Boul. Hébert/St-Laurent	n/d	Dans l'abribus de CITSO	45.296436	-74.032418
00:42	Boul. Hébert/Jean	300	Devant le dépanneur	45.293819	-74.033628
01:21	Boul. Hébert/Archambault	230	Avant l'intersection	45.291932	-74.03473
02:01	Boul. Hébert/Gougeon	240	Avant l'intersection	45.290415	-74.036758
02:47	Boul. Hébert/Pie XII	300	Avant l'intersection	45.289539	-74.040577
03:46	Boul. Hébert/Jobin	350	Avant l'intersection	45.288746	-74.044901
04:22	Boul. Hébert/5ième avenue	160	Dans l'abribus de CITSO	45.288361	-74.04695
05:02	Boul. Hébert/8ième	220	Juste après la rue, devant le garage d'auto	45.287852	-74.049734
05:36	Boul. Hébert/Des Lilas	150	Avant l'intersection	45.287501	-74.051564
06:23	Boul. Hébert/St-Laurent	350	Avant l'intersection	45.286688	-74.05622
07:33	Boul. Hébert	900	À l'emplacement actuel de l'arrêt 2076 (face 4225)	45.282847	-74.065433
08:38	Boul. Hébert/Racicot	500	Dans l'abribus de CITSO	45.279337	-74.069569
09:38	Rue Léger/De la Coulée	280	Avant l'intersection	45.277285	-74.070986
10:30	Rue Léger/Du Ruisseau	350	Avant l'intersection	45.275543	-74.074306
11:16	Rue Léger/Masson	250	Avant l'intersection	45.274873	-74.07742
12:19	Boul. Hébert/Masson	400	Avant l'intersection (près Kent)	45.276848	-74.081317
13:00	Boul. Hébert/Lapointe	220	Avant l'intersection	45.276081	-74.083831
13:47	Boul. Hébert/Albert	250	À l'emplacement actuel de l'arrêt 2042	45.274747	-74.087653
14:32	Boul. Hébert/Ch. Du Golf	250	Après le feu de signalisation	45.274137	-74.089573

Tableau F.1 : Information sur les arrêts communs aux trajets EO1 et EO2

Annexe G

Seconde partie de la liste des arrêts du trajet EO1

Trajet EO1 – Partie 2					
				Coordonnées	
Arrivée à l'arrêt (mm:ss)	Emplacement de l'arrêt	Distance depuis dernier arrêt (m)	Localisation de l'arrêt	Latitude	Longitude
15:34	Boul. Hébert/Sauvé	650	Avant l'intersection	45.270407	-74.095954
16:00	Boul. Hébert avant Armand	140	Même arrêt que CITSO (devant la cour)	45.269596	-74.096681
17:01	Boul. Hébert	260	Face au 573 - Même arrêt que CITSO	45.267226	-74.097408
18:00	Dufferin/St-Urbain	700	À l'emplacement actuel de l'arrêt 296	45.262052	-74.102308
18:46	Boul. Du Havre/Dufferin	210	Après la rue, devant l'immeuble	45.261363	-74.104486
19:43	Hébert	620	À l'emplacement actuel de l'arrêt 292	45.25824	-74.112072
21:00	Hébert (entre Préfontaine et St-Zénon)	400	À l'emplacement actuel de l'arrêt 259	45.258663	-74.116674
22:00	Hébert/Daniel	350	Avant l'intersection	45.258176	-74.121516
23:15	Terminus	350		45.257936	-74.126789
Fin de l'itinéraire					
Distance totale parcourue (m)		9 380			

Figure G.1 : Information de la seconde partie des arrêts du trajet EO1

Annexe H

Présentation de la seconde partie du trajet EO2

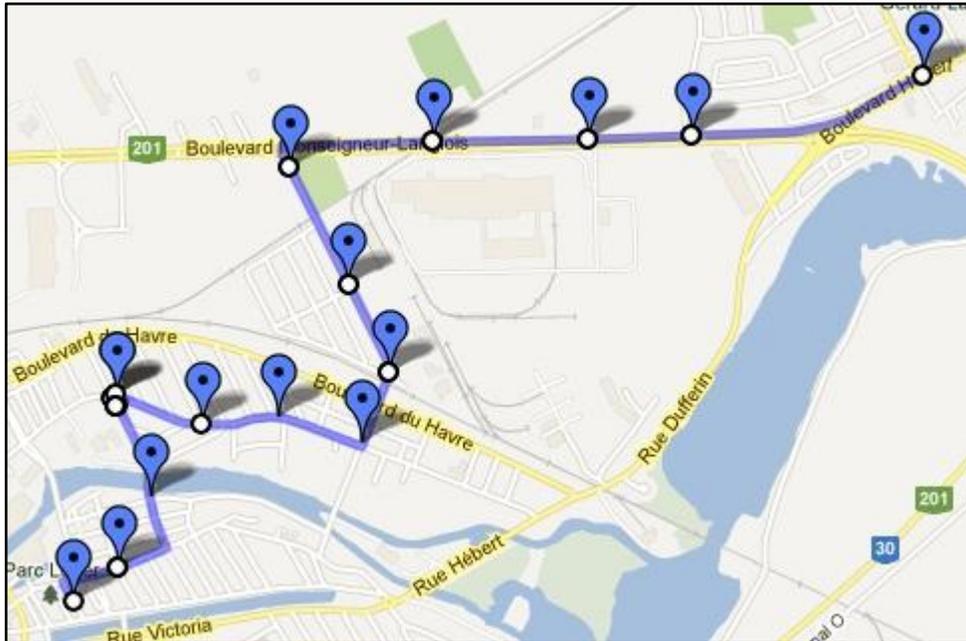


Figure H.1 : Présentation de la seconde partie du trajet EO2

Annexe I

Seconde partie de la liste des arrêts du trajet EO2

Trajet EO2 - Partie 2					
				Coordonnées	
Arrivée à l'arrêt (mm:ss)	Emplacement de l'arrêt	Distance depuis dernier arrêt (m)	Localisation de l'arrêt	Latitude	Longitude
15:34	Boul. Mgr-Langlois	500	Devant le détaillant Volkswagen	45.272429	-74.096842
16:21	Boul. Mgr-Langlois/Landry	350	Avant l'intersection	45.272368	-74.099538
17:09	Boul. Mgr-Langlois	350	Devant Hydro-Québec	45.272282	-74.103325
18:06	Boul. Mgr-Langlois	500	Devant la SPCA - Avant le rail du chemin de fer	45.272176	-74.11061
20:54	Rue Fabre	600	Juste après l'intersection	45.271342	-74.11672
22:01	Rue Fabre/Brunet	450	Avant l'intersection	45.267729	-74.11411
22:52	Rue Fabre/Loy	350	À l'emplacement actuel de l'arrêt 284	45.265071	-74.112474
23:44	Rue Fabre/Dufferin	260	Avant l'intersection	45.262969	-74.113654
24:38	Dufferin/Lowe	300	Avant l'intersection	45.263844	-74.117337
25:20	Dufferin/Black	260	Même arrêt que CITSO	45.263632	-74.120486
26:10	Dufferin/St-Charles	300	Avant l'intersection	45.263757	-74.124026
27:11	St-Charles/Sullivan	400	À l'emplacement actuel de l'arrêt 240	45.261348	-74.122755
27:46	St-Charles/Alphonse-Desjardins	170	Avant l'intersection	45.259854	-74.122092
28:45	Alphonse-Desjardins/Buntin	290	Avant l'intersection	45.258975	-74.125493
29:31	Terminus	190		45.257936	-74.126789
Fin de l'itinéraire					
Distance totale parcourue (m)		10 970			

Figure I.1 : Information de la seconde partie des arrêts du trajet EO2