

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MÉTHODOLOGIE DE CARACTÉRISATION D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT EN
COMMUN

PHILIPPE FORTIN

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)

JUIN 2016

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

MÉTHODOLOGIE DE CARACTÉRISATION D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT EN
COMMUN

présenté par : FORTIN Philippe

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

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

M. CHAPLEAU Robert, Ph. D., président

Mme MORENCY Catherine, Ph. D., membre et directrice de recherche

M. TRÉPANIÉ Martin, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

M. NAZEM Mohsen, Ph. D., membre

REMERCIEMENTS

Dès ses premiers enseignements au baccalauréat, Catherine Morency a fait germer cette idée de me spécialiser en transport. Sa passion contagieuse pour ce domaine a su s'enraciner en moi. Pour cela et mille autres choses, je l'en remercie. Un grand merci à Martin Trépanier qui, avant même de me connaître, m'a fait confiance avec cette idée abstraite d'un projet de recherche qui se voit enfin conclure. Ses conseils auront été une source d'inspiration particulièrement utile.

S'il était possible de scinder mon diplôme en plusieurs parts, je n'hésiterais qu'un instant. Face à cette impossibilité, je me contenterai de partager toute ma reconnaissance à l'ensemble de l'équipe transport de Polytechnique Montréal. Annick Lacombe saura reconnaître l'aide immense qu'elle m'a apportée tant au niveau technique qu'en support moral. Un merci tout particulier à Pierre-Léo Bourbonnais et sa grande patience pour avoir répondu à mes nombreuses questions. Hubert Verreault se mérite aussi une mention pour les conseils techniques, ses encouragements et sa capacité à remplir mes temps libres par une accumulation d'heures de correction. Parce que le temps passé à Poly ne serait pas le même sans eux j'aimerais remercier Alexis Frappier, Jean-Simon Bourdeau, Marc-André Tessier, Philippe Gaudette et finalement Joanie Smith qui est venue agrandir les rangs de notre petite famille.

Le support de ma famille et de mes amis à l'externe ne pourrait passer sous silence tant il a été important pour me garder focalisé sur l'essentiel et me distraire lorsque nécessaire.

Finalement, parce qu'ils encouragent la recherche universitaire et le développement de talents, j'aimerais remercier le groupe Thalès et le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour leur soutien financier, puis la Société de Transport de l'Outaouais et le Conseil Intermunicipal de Transport Chambly-Richelieu-Carignan pour avoir mis à disposition les ensembles de données nécessaires à la réalisation de ce projet.

RÉSUMÉ

Ce mémoire de recherche se positionne dans un contexte où l'on souhaite optimiser les systèmes de transport en commun (TC) qui se situent au centre d'un cocktail de différents modes de transport en une certaine compétition. Afin d'optimiser le service de TC et de le rendre attractif aux yeux des utilisateurs, de nombreuses recherches ont été effectuées au niveau de la demande observée, mais une lacune des connaissances au niveau de l'analyse de l'offre de TC perdure encore. En réponse à cette problématique, l'objectif de cette recherche est de développer un cadre d'analyse permettant le diagnostic systématique d'un réseau de transport en commun à l'aide des données *General Transit Feed Specification* (GTFS).

Afin de clarifier l'objectif principal, trois objectifs spécifiques ont été définis :

- 1) Valoriser l'utilisation des données GTFS ;
- 2) Proposer un ensemble d'indicateurs spatiotemporels pour caractériser une offre de transport en commun ;
- 3) Automatiser la méthode pour faciliter la comparaison ou le suivi de l'évolution dans le temps d'un (ou plusieurs) réseau.

Premièrement, une revue de littérature rappelle l'importance des réseaux de TC en milieu urbain et du rôle structural que ces réseaux peuvent jouer quant au développement de la trame urbaine et de l'influence sur les habitudes de vie des résidents. Elle propose aussi les méthodes actuelles de conception et d'analyse des réseaux. La norme GTFS est aussi présentée, allant de sa syntaxe aux utilisations classiques et innovatrices répertoriées. On y fait un bref survol de l'analyse des données de cartes à puce, afin de montrer les avantages d'enrichir les données GTFS pour caractériser l'offre de service. Finalement, on y présente un large inventaire des indicateurs de performance, classiques, évolués et découlant de la théorie des graphes. On retient principalement que les indicateurs classiques sont statiques et ne peuvent à eux seuls bien cerner l'ensemble des facteurs liés à un réseau de TC.

Deuxièmement, une méthodologie générale a été établie. Celle-ci présente de quelle façon les données GTFS et de cartes à puce ont été validées avant de les importer dans une base de données relationnelle. Trois objets d'analyse ont ensuite été identifiés : l'arrêt, la ligne et le réseau. La

méthode de développement des indicateurs et de leur généralisation pour des fins de comparaison est aussi abordée, avant de glisser quelques pistes sur l'automatisation.

Troisièmement, les éléments techniques liés au développement des indicateurs sont abordés. Quatre indicateurs ont été développés, en mettant d'abord l'emphase sur la notion d'opportunité qui, étant flexible, permet d'en dériver un indicateur de connectivité des arrêts, d'analyse spatiale des opportunités, des opportunités-personnes et une analyse des temps de parcours. Le concept d'accessibilité est aussi présenté et illustré à l'aide d'un exemple simple. Finalement, la compétitivité des modes est abordée avec la mention de l'indicateur de directitude et de vulnérabilité des utilisateurs face aux alternatives.

Quatrièmement, la méthodologie générale est mise à l'épreuve avec une étude de cas portant sur l'instauration du Rapibus sur le réseau de la Société de Transport de l'Outaouais (STO) à l'automne 2013. Cette étude permet de montrer l'utilité, mais aussi les limitations des indicateurs classiques à fournir une vue d'ensemble d'un réseau. Le potentiel d'utilisation de la notion d'opportunité et surtout sa capacité à caractériser de façon systématique un réseau de TC sont ensuite abordés. Les impacts avant et après Rapibus sont aussi évalués en termes de directitude, d'opportunités, d'opportunités-personnes, d'accessibilité réelle et en comparant les temps de parcours des opportunités et sur le réseau. La directitude des trajets évalués de l'enquête OD semble s'être améliorée après l'implantation du service Rapibus, ce qui correspond aussi à la baisse des temps de parcours en moyenne de 2,18 minutes. Toutefois, les opportunités et les opportunités-personnes démontrent une diminution de la proportion des trajets directs (de 38,4% à 34,3%) et une légère augmentation des trajets nécessitant une correspondance (38,8 % à 41,1 %). Une analyse complète incluant des pénalités de correspondance pourrait donner un regard plus critique sur les changements de service liés à cette augmentation.

Finalement, un retour en arrière est fait, portant sur l'exploration effectuée en début de projet. Une synthèse d'une méthodologie axée sur les bases de données orientées graphe est faite. On y liste les avantages et les limitations de cette méthode. Des exemples d'indicateurs orientés graphe y sont présentés dans une étude de cas du réseau du CITCRC. En plus de ceux présentés précédemment, une analyse des vitesses commerciales est proposée. Bien que les vitesses soient relativement faibles sur certains tronçons, l'analyse met en évidence les segments routiers problématiques. En y superposant des données externes (i.e. : trafic, voie réservée pour autobus), une analyse plus

approfondie peut fournir des informations pertinentes à l'optimisation du service et au développement de stratégie de planification. Au final, on explique comment cette exploration a façonné le projet final et guidé plusieurs choix méthodologiques. Les principaux apprentissages s'articulent toutefois autour de la méthode orientée graphe. La méthode et la modélisation se sont avérées efficaces et intuitives. La définition des indicateurs et des analyses basées sur la notion de graphe (notamment les opportunités) a dû être revue lorsque l'algorithme proposé par Neo4j a été abandonné au profit d'un calculateur de trajet plus classique. Au final, c'est cet algorithme qui représente la grande limitation de la méthode utilisée.

En conclusion, ce projet de recherche a permis de valoriser les données GTFS en développant une méthodologie de caractérisation systématique d'un réseau de transport en commun. Cette méthodologie a été généralisée pour permettre de comparer deux états d'un même réseau de TC. La méthode a aussi été automatisée de façon à pouvoir être intégrée dans un outil de gestion et d'analyse de réseaux.

ABSTRACT

This thesis lies in a transit network optimization context. Transit is located in the middle of a large offer of different travel modes, each competing in a certain way with the others. In order to optimize a transit system and make it attractive to users, many researches were conducted, typically involving post-processing of demand-related data. However, there is a shortage of information on travel supply and networks. To address this issue, this research aims to develop an analysis framework to systematically characterize a transit network with the use of GTFS data.

To clarify this rather large objective, three sub-goals were defined:

- 1) Promote the use of GTFS data;
- 2) Develop a set of indicators for the systematic analysis of transit networks;
- 3) Automate the method in order to facilitate the comparison and the monitoring of a transit network;

First, a literature review highlights the importance of TC networks in urban areas and the structural role that networks can play in the development of the urban framework and the impact on residents living habits. It also provides current methods of design and analysis of networks. The General Transit Feed Specification (GTFS) is also presented, from syntax to traditional and innovative identified uses. It also offers a brief overview of the analysis of the smart card data, to show the advantages of enriching GTFS data to characterize the service supply. Finally, it presents a large inventory of performance indicators, classic, advanced and derived from the graph theory. Classic indicators are static and can properly characterize by themselves all the aspects related to a transit network.

Secondly, a general methodology has been established. It presents how the GTFS data and smart cards has been validated before importing them into a relational database. Three objects of analysis were then identified: stop, line and network. The method of development indicators and their generalization for comparison purposes is also addressed, before introducing a few words on automation.

Third, the technical elements related to the development of indicators are addressed. Four indicators were developed by first emphasizing the concept of opportunity, being flexible, leads to the derivation of several indicators. The concept of accessibility is also presented and illustrated

with a simple example. Finally, the competitiveness of modes is discussed with reference to directness indicator and user vulnerability to alternatives.

Fourth, the general methodology is tested with a case study on the introduction Rapibus on the Société de Transport de l'Outaouais (STO) network in the fall of 2013. This study demonstrates the usefulness but also the limitations of the classic indicators to provide an overview of a network. The potential usages of the concept of opportunity and especially its ability to systematically characterize a transit network are then discussed. Impacts before and after Rapibus are also evaluated in terms of directness, opportunities, opportunities-persons, accessibility and comparison of travel times.

Finally, we go back on an exploration done early in the project. A summary of a graph oriented method is detailed. The advantages and limitations of this method are listed. Examples of graph oriented indicators are presented in a case study of the Conseil Intermunicipal de Transport Chambly-Richelieu-Carignan (CITCRC) network. Finally, we explain how this exploration has fashioned the final project and guided several methodological choices.

In conclusion, this research has helped promote the GTFS data by developing a methodology for the systematic characterization of a public transport network. This methodology has been generalized to allow comparison between two different service supplies of the same transit network. The method has also been automated so that they can be integrated into a management and network analysis tool.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT.....	VII
TABLE DES MATIÈRES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES.....	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	XVI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte : L'importance du transport en commun.....	1
1.2 Problématique.....	3
1.3 Valorisation des données.....	4
1.4 Objectifs.....	4
1.5 Organisation du mémoire.....	5
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	6
2.1 Réseaux de transport en commun.....	6
2.1.1 Conception et analyse des réseaux.....	7
2.1.2 Synthèse sur les réseaux de TC.....	10
2.2 General Transit Feed Specification.....	11
2.2.1 Données en temps réel.....	14
2.2.2 Utilisation des données GTFS.....	14
2.3 Cartes à puce.....	16
2.4 Indicateurs.....	18
2.4.1 Indicateurs de performance.....	18

2.4.2	Indicateurs classiques.....	20
2.4.3	Indicateurs évolués.....	21
2.4.4	Indicateurs découlant de la théorie des graphes.....	23
2.4.5	Synthèse sur les indicateurs	29
CHAPITRE 3 DESCRIPTION DES DONNÉES		30
3.1	Données GTFS.....	30
3.1.1	Société de Transport de l’Outaouais (STO).....	30
3.1.2	Conseil Intermunicipal de Transport Chambly-Richelieu-Carignan	34
3.2	Données de cartes à puce	36
3.3	Sources de données complémentaires.....	37
3.3.1	Réseau routier	37
3.3.2	Délimitation des villes	37
3.3.3	Enquête Origine-Destination	38
CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE		39
4.1	Validation des données	39
4.1.1	GTFS.....	39
4.1.2	Cartes à puce	44
4.2	Importation des données	45
4.3	Identification des objets d’analyse.....	47
4.4	Développement des indicateurs	47
4.5	Automatisation.....	49
CHAPITRE 5 DÉVELOPPEMENT DES INDICATEURS		50
5.1	Opportunités.....	50
5.1.1	La notion d’opportunité	50

5.1.2	Indicateurs dérivés des opportunités	52
5.1.3	Généralisation des indicateurs dérivés	54
5.1.4	Limitations et perspectives de la méthodologie	54
5.2	Accessibilité réelle	55
5.2.1	Limitations et perspectives	56
5.3	Directitude des trajets	57
5.3.1	Limitations et perspectives	58
5.4	Vulnérabilité des utilisateurs (face aux alternatives)	58
5.4.1	Limitations et perspectives	59
CHAPITRE 6 ÉTUDE DE CAS		60
6.1	Description générale et indicateurs classiques	61
6.2	Caractérisation d'un réseau	64
6.2.1	Réseau avant Rapibus	64
6.2.2	Réseau après Rapibus	68
6.3	Évaluation de l'impact des changements	71
6.3.1	Connectivité des arrêts	72
6.3.2	Directitude	73
6.3.3	Analyse spatiale des opportunités	73
6.3.4	Distribution fréquentielle des opportunités	79
6.3.5	Opportunités-personnes	81
6.3.6	Accessibilité réelle	82
6.3.7	Temps de parcours	85
6.3.8	Temps de parcours sur le réseau	87
6.4	Discussion	88

6.4.1	Retour sur les indicateurs.....	88
6.4.2	Effet du Rapibus sur l'offre de service	89
6.4.3	Perspectives d'analyse	91
CHAPITRE 7 EXPÉRIMENTATION : BDD ORIENTÉE GRAPHE.....		92
7.1	Base de données orientée graphe	92
7.2	Méthodologie	93
7.3	Résultats préliminaires.....	94
7.3.1	Indicateurs classiques.....	95
7.3.2	Indicateurs orientés graphe	96
7.3.3	Conclusions tirées de l'exploration.....	101
CHAPITRE 8 CONCLUSION.....		103
8.1	Synthèse des travaux.....	103
8.2	Contributions	104
8.3	Limitations	105
8.4	Perspectives.....	107
BIBLIOGRAPHIE		108

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Indicateurs dérivés de la théorie des graphes pour l'étude des réseaux TC (Adaptation de Derrible & Kennedy, 2011).....	27
Tableau 3.1: Fichiers publiés par la STO en regard de la norme GTFS	31
Tableau 3.2 : Extrait du fichier <i>calendar.txt</i> de la STO (automne 2013, av. Rapibus)	32
Tableau 3.3 : Extrait du fichier <i>calendar_dates.txt</i> de la STO (automne 2013, av. Rapibus)	33
Tableau 3.4 : Extrait du fichier <i>routes.txt</i> de la STO (automne 2013, av. Rapibus).....	33
Tableau 3.5: Fichiers publiés par la CITCRC en regard de la norme GTFS	35
Tableau 3.6 : Extrait du fichier <i>routes.txt</i> du CITCRC (été 2015)	35
Tableau 4.1 : Validation des fichiers GTFS de la Société de Transport de l'Outaouais (STO)	40
Tableau 4.2 : Codification d'un service proposé par la STO	43
Tableau 4.3 : Exploration et validation des données de cartes à puce	44
Tableau 6.1 : Comparaison des indicateurs classiques avant/après Rapibus.....	63
Tableau 6.2 : Comparaison des indices de directitude.....	73
Tableau 6.3 : Comparaison des opportunités-personnes avant et après Rapibus	81
Tableau 6.4 : Résultat de l'algorithme OD sur les données CAP de la STO	82
Tableau 6.5 : Détail des erreurs de l'algorithme OD.....	83
Tableau 6.6 : Résultat du test d'adéquation à la loi normale.....	85
Tableau 6.7 : Résultats du test Kolmogorov-Smirnov	86
Tableau 6.8 : Indicateurs statistiques pour les temps de parcours	87
Tableau 6.9 : Comparaison des temps de parcours sur le réseau avant et après le Rapibus.....	88
Tableau 6.10 : Analyse de la sensibilité des opportunités aux pénalités de correspondance (av. Rapibus)	90
Tableau 7.1: Indicateurs calculés à l'aide des données GTFS et d'une base de données SQL	96

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Première version du calculateur de trajet de la STCUM (Trépanier, Chapleau et Allard, 2005)	11
Figure 2.2: Organisation du format de données GTFS	13
Figure 2.3 : A) Modélisation en fonction du temps B) Modélisation temporelle étendue	25
Figure 4.1 : Schéma organisationnel de la méthodologie générale	39
Figure 4.2 : Grille référentielle pour le calcul des indicateurs.....	49
Figure 5.1 : Sélection d'un trajet par le calculateur de chemin	51
Figure 5.2 : Représentation graphique de la notion d'opportunité	52
Figure 5.3 : Représentation graphique du coût angulaire (adaptée de Raveau et al., 2011).....	58
Figure 6.1 : Territoire couvert par l'étude de cas	61
Figure 6.2 : Réseau STO avant Rapibus	62
Figure 6.3 : Réseau STO après Rapibus	62
Figure 6.4 : Connectivité des arrêts (av. Rapibus).....	64
Figure 6.5 : Opportunités aux arrêts (pointe AM) [av. Rapibus].....	65
Figure 6.6 : Opportunités aux arrêts (pointe PM) [av. Rapibus]	66
Figure 6.7 : Comparaison des points d'offre et de demande (av. Rapibus)	67
Figure 6.8 : Connectivité des arrêts (ap. Rapibus).....	68
Figure 6.9 : Opportunités aux arrêts (pointe AM) [ap. Rapibus].....	69
Figure 6.10 : Opportunités aux arrêts (pointe PM) [ap. Rapibus]	70
Figure 6.11 : Comparaison des points d'offre et de demande (ap. Rapibus)	71
Figure 6.12 : Connectivité en fonction des zones (grille de référence) [av. Rapibus].....	72
Figure 6.13 : Connectivité en fonction des zones (grille de référence) [ap. Rapibus].....	72
Figure 6.14 : Opportunités de départ selon la grille de référence (pointe AM) [av. Rapibus]	74

Figure 6.15 : Opportunités de départ selon la grille de référence (pointe AM) [ap. Rapibus]	75
Figure 6.16 : Opportunités de départ pour un trajet direct (pointe AM) [ap. Rapibus]	76
Figure 6.17 : Opportunités de départ pour une correspondance (pointe AM) [ap. Rapibus]	76
Figure 6.18 : Opportunités de départ pour deux correspondances (pointe AM) [ap. Rapibus]	77
Figure 6.19 : Différence d'opportunités avant/après le Rapibus (pointe AM)	78
Figure 6.20 : Différence d'opportunités avant/après le Rapibus (pointe PM)	78
Figure 6.21 : Comparaison des distributions fréquentielles des opportunités avant et après le Rapibus	79
Figure 6.22 : Répartition des opportunités sur la grille de référence	80
Figure 6.23 : Dispersion des opportunités-personnes selon le nombre de correspondances	82
Figure 6.24 : Taux d'utilisation de la ligne 49 (entre 7 et 8h) [av. Rapibus]	84
Figure 6.25 : Comparaison des distributions fréquentielles du temps de parcours des opportunités avant et après le. Rapibus	86
Figure 7.1: Paires d'arrêts actives durant une journée	97
Figure 7.2: Étendue du service pour chaque arrêt (service du samedi) a) Opportunités de départ b) Opportunités d'arrivée	100
Figure 7.3: Vitesse commerciale pour le service du samedi	101

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AMT	Agence Métropolitaine de Transport
BDD	Base de données
CAP	Carte à puce
CCMM	Chambre de Commerce du Montréal Métropolitain
CIT	Conseil Intermunicipal de Transport
CITCRC	Conseil Intermunicipal de Transport Chambly-Richelieu-Carignan
CSA	Common Scrambling Algorithm
CSV	Comma-Separated Values
CUTA	Association Canadienne du Transport Urbain
GES	Gaz à effet de serre
GTFS	General Transit Feed Specification
MDDELCC	Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques
MTMDET	Ministère des Transports, de la Mobilité Durable et de l'Électrification des Transports
OD	Origine-Destination
OSM	Open Street Map
RTL	Réseau de Transport de Longueuil
SIG	Système d'Information Géographique
STCUM	Société de Transport de la Communauté Urbaine de Montréal
STL	Société de Transport de Laval
STM	Société de Transport de Montréal
STO	Société de Transport de l'Outaouais
SQL	Structured Query Language

TC	Transport en commun
TGV	Train à Grande Vitesse
TOD	Transit Oriented Development
TRB	Transportation Research Board

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

L'introduction présente le contexte dans lequel s'inscrit ce projet de recherche, énonce la problématique, puis énumère les objectifs. Elle présente finalement l'organisation de ce mémoire.

1.1 Contexte : L'importance du transport en commun

Le transport en commun est une importante composante de la mobilité urbaine. Il se définit comme un service de transport de voyageurs à l'aide d'un matériel conçu à cet effet, proposant des horaires et des itinéraires fixes en échange d'une certaine tarification (Industrie Canada, 2016). Seulement au Québec, 166 villes sont desservies d'une façon ou d'une autre par un tel service, totalisant plus de 6,6 millions d'individus, soit 81% de la population québécoise (Institut de la statistique du Québec, 2015). Pour l'ensemble de ces villes, plus de 484 600 personnes dépendaient d'un service de transport en commun pour assurer leurs déplacements pour motif travail, selon les données de l'enquête nationale auprès des ménages 2011. En 2013, dans la grande région de Montréal, le nombre de déplacements quotidiens en transport en commun se chiffrait à 815 300, soit 15,3% de tous les déplacements déclarés (Agence Métropolitaine de Transport, 2015). Pour la région de l'Outaouais, incluant Gatineau, ce sont plus de 71 600 résidents, effectuant 10,8% des déplacements totaux, qui empruntaient les services de transport en commun (TC) en 2011 (Trans Committee, 2013). Si ces chiffres ne permettent pas de saisir l'ampleur et l'importance des services de transport en commun en milieu urbain, les engagements gouvernementaux les confirment. En 2015, le gouvernement fédéral a annoncé la mise en place d'un nouveau fonds pour le transport en commun à la hauteur de 750 millions de dollars sur deux ans pour les années 2017-2018, puis un milliard annuellement par la suite (Gouvernement du Canada, 2015). Au palier provincial, c'est une enveloppe de 948 millions de dollars qui a été budgétée pour les transports collectifs pour l'année 2015-2016 (Ministère des Finances du Québec, 2015). Cette enveloppe englobe aussi un programme d'aide au développement du transport collectif, montrant une priorité d'investissement dans l'amélioration des services, en plus du maintien des actifs existants (Ministère des Transports du Québec, 2015b). En avril 2016, le Gouvernement fédéral a confirmé un investissement à la hauteur de 775 millions pour les trois prochaines années (Corriveau, 2016), alors que le Gouvernement provincial s'engageait dans le développement de grands projets d'infrastructures de transport collectif (Lessard, 2016).

Le transport en commun se situe donc au centre d'un cocktail des différents modes de transport où il occupe une place ayant une grande portée. Il peut influencer de manière structurante l'environnement urbain au sein duquel il évolue, en plus d'exercer une influence directe sur le transport des personnes, et de façon plus indirecte, le déplacement des marchandises. Le groupe Collectivités Viables (s.d.) réitère que « l'identification d'un réseau structurant de transport en commun permet de planifier de manière conjointe l'organisation de la mobilité et l'aménagement du territoire ». Un réseau pourra ainsi favoriser la densification urbaine, la concentration des activités, un développement responsable, en plus d'encourager un mode de vie axé sur la communauté (Neff et Dickens, 2015). Ce changement des grandes villes est attendu par la Chambre de commerce du Montréal Métropolitain (CCMM), accompagné d'une augmentation des déplacements et de la circulation en lien avec les développements économiques dans la grande région métropolitaine (2010). La CCMM compte donc miser sur le transport en commun pour favoriser le développement économique de la région de Montréal et met de l'avant les avantages économiques réels pouvant en découler. Ce discours complète ceux généralement entendus d'un aspect plutôt social et vient renforcer la position de force du choix d'un développement du transport en commun. Le TC se comporte aussi comme un vecteur de réussite pour l'implantation de différentes politiques gouvernementales, notamment au niveau environnemental. Le 9 octobre 2015, le gouvernement du Québec a présenté son nouveau plan d'action pour l'électrification des transports en y dévoilant un volet complet d'élargissement de l'offre de transport collectif électrique (Ministère des Transports du Québec, 2015a). Ce projet soutient le développement technologique lié aux véhicules électriques et autres technologies connexes, en plus de favoriser les objectifs de diminution des GES fixés par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) pour le secteur des transports (2015). Finalement, le transport collectif continue d'être au centre des discussions avec le rapport technique publié par SWITCH (2016) (l'Alliance pour une économie verte au Québec) en ciblant des interventions pour un changement de paradigme dans le domaine du transport en favorisant le TC. Les enjeux et les pistes de solution soulevés par leur communiqué couvrent notamment les aspects de l'urbanisme, du territoire, de l'offre de transport et de la tarification et confirment une fois de plus l'importance du transport collectif en milieu urbain et la nécessité d'étudier plus en profondeur ses différents aspects.

1.2 Problématique

Le transport en commun apparaît au final comme une entité importante, mais difficile à cerner tant les rôles et les objectifs qui lui sont portés sont larges, souvent idéologiques et définis de façon à en faire des piliers structurants pour un développement social, urbain et économique. Pour l'atteinte de ces objectifs et pour s'acquitter des rôles qui leur sont imposés, les agences de transport ne peuvent simplement multiplier leurs infrastructures ou encore bonifier leur offre de service en ajoutant lignes et départs. Elles doivent, comme toute entreprise, composer avec l'optimisation de leurs coûts et de leurs effectifs, tout en maintenant une offre de service attractive pour les usagers. La définition précise d'une offre de service idéale est inexistante. Pour une agence de transport, quantifier et caractériser son offre de service demeure donc un défi de taille, malgré les outils actuellement mis à leur disposition. Des indicateurs de performances adaptés aux réseaux de transport en commun font partie intégrante du processus de diagnostic de l'offre et de la qualité du réseau offert. Toutefois, les indicateurs proposés et les méthodologies encadrant leur utilisation comportent trois problématiques majeures :

- 1) L'utilisation prédominante des données liées à la demande observée en TC ;
- 2) Le choix arbitraire d'un cadre d'analyse ;
- 3) L'absence de l'automatisation des méthodes.

Premièrement, les données liées à la demande découlent d'observations faites sur le réseau après l'implantation d'un service. Celles-ci englobent notamment les données de perception (cartes à puce), d'achalandage et un suivi limité dans le temps et dans l'espace des utilisateurs. Elles sont largement utilisées dans de nombreuses recherches et guides d'analyse des réseaux de TC et forment une source d'information indispensable, mais imposent aussi quelques limitations. Elles nécessitent l'implantation préalable d'un service de transport et limitent donc certaines analyses et comparaisons de scénarios pouvant être réalisées en amont. De plus, comme ces données représentent la demande observée, la demande latente n'est que rarement prise en considération lors des analyses alors qu'elle devrait en théorie déterminer les nouveaux besoins. En complément aux connaissances sur la demande, il est donc important d'assurer l'analyse de l'offre de service des agences de transport afin de rencontrer un équilibre dans l'optimisation de l'offre (de services) et de la demande.

Les indicateurs actuels permettent souvent l'analyse d'un aspect spécifique d'un réseau, comme l'accessibilité ou encore les performances. Aucun indicateur ne permet d'intégrer l'ensemble de ces concepts permettant le diagnostic intégral de l'offre de transport en commun. De plus, le contexte entourant l'analyse d'un réseau diffère grandement d'une région à l'autre et le choix des indicateurs peut en être influencé. Ce choix d'indicateurs renferme ainsi une part importante de la perception et de l'interprétation des résultats d'un diagnostic. Comme les besoins analytiques varient d'une étude à l'autre, le cadre d'analyse est grandement influencé par les besoins. Cette approche n'est pas souhaitable dans une recherche d'objectivité analytique permettant de comparer sur une base commune deux réseaux différents. Un cadre d'analyse clairement défini permettrait de poser un diagnostic précis et comparable de façon systématique, tout en laissant de la flexibilité pour évaluer des objectifs précis d'un projet en lien avec son contexte d'implantation.

Finalement, l'absence d'automatisation des méthodes répertoriées est aussi problématique. Elle nuit d'abord à la facilité de production de résultats comparables, puis au suivi de l'évolution temporelle des réseaux.

1.3 Valorisation des données

Une problématique plutôt singulière a fait son apparition en cette ère des mégadonnées. Quotidiennement, les agences de transport jonglent avec divers ensembles de données en provenance de plusieurs sources. Certains de ces fichiers utilisés à l'interne par les agences sont sous un format propriétaire et doivent impérativement être convertis afin de les partager publiquement, notamment sous le standard du *General Transportation Feed Specification* (GTFS). Elles vont donc produire des ensembles de données riches, dans le seul but de les partager. Cette pratique gâche le potentiel de ces ensembles de données, en plus de limiter leur précision. Certaines agences pourraient ne pas investir les moyens nécessaires pour assurer la validité de ces informations de second rang si elles ne les utilisent pas elles-mêmes. Quelques cas ont été rencontrés dans les fichiers disponibles publiquement.

1.4 Objectifs

En réponse aux problématiques soulevées, l'objectif principal de cette recherche est de développer un cadre d'analyse permettant le diagnostic systématique d'un réseau de transport en commun à l'aide des données GTFS.

Afin de clarifier l'objectif principal, trois objectifs spécifiques ont été définis :

- 1) Valoriser l'utilisation des données GTFS ;
- 2) Proposer un ensemble d'indicateurs spatiotemporels pour caractériser une offre de transport en commun ;
- 3) Automatiser la méthode pour faciliter la comparaison ou le suivi de l'évolution dans le temps d'un (ou plusieurs) réseau.

1.5 Organisation du mémoire

Ce document est organisé en huit chapitres.

Chapitre 1 L'introduction présente le contexte dans lequel s'inscrit ce projet de recherche, énonce la problématique, puis énumère les objectifs principal et spécifiques. **Chapitre 2** La revue de littérature fait un état des connaissances et des recherches sur les thèmes relatifs aux réseaux de TC, à la norme GTFS, aux données de carte à puce et sur les indicateurs de TC. Elle rappelle aussi certaines notions pertinentes à la compréhension de la méthodologie, notamment sur la modélisation d'un graphe. **Chapitre 3** La description des données passe en revue les ensembles de données utilisés dans le cadre de cette recherche. On y décrit notamment les données GTFS et de cartes à puce qui sont les sources de données principales pour le calcul des indicateurs. Les sources de données complémentaires (réseau routier, délimitation des villes et l'enquête origine-destination) sont aussi présentées. **Chapitre 4** La méthodologie générale présente les principales étapes nécessaires à la réalisation de ce projet. Plusieurs détails sont fournis allant de la validation et l'importation des données à l'automatisation de la méthode en passant par le développement du cadre d'analyse. **Chapitre 5** Le développement des indicateurs est entièrement détaillé et est accompagné des hypothèses d'analyse posées pour l'évaluation de certains indicateurs. **Chapitre 6** Une étude de cas portant sur l'implantation du service Rapibus à l'automne 2013 par la Société de Transport de l'Outaouais (STO) est présentée. Les différents indicateurs développés sont évalués, puis analysés dans ce contexte bien défini. **Chapitre 7** Un retour sur les premiers balbutiements du projet est fait. Une méthodologie préliminaire fondée sur les bases de données orientées graphe est présentée avant d'expliquer les limitations de la méthode ayant mené à la méthodologie finale du projet. **Chapitre 8** La conclusion met l'accent sur les contributions du mémoire, tout en identifiant ses limites et ses contraintes. Elle identifie également quelques perspectives de recherche.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

La revue de littérature présentée dans ce chapitre vise à faire état des connaissances et des recherches conduites sur les thèmes relatifs aux réseaux de TC, la norme GTFS, les données de carte à puce et les indicateurs de TC. De plus, elle rappelle certaines notions pertinentes à la compréhension de la méthodologie développée dans les sections suivantes. Le présent chapitre expose donc le contexte dans lequel ce travail de recherche a été réalisé.

2.1 Réseaux de transport en commun

Les réseaux de transport en commun jouent un rôle déterminant dans l'organisation des agglomérations urbaines. La présence d'un réseau de TC influe sur les habitudes des résidents habitant près des points d'accès. Inévitablement, elle offre une alternative à l'utilisation de la voiture en plus d'encourager un mode de vie axé sur la communauté (Neff et Dickens, 2015). Plusieurs plans de mobilité, dont ceux de la Ville de Montréal (2008) et de la ville de Laval (ÉvoluCité, 2011), mettent en valeur le transport en commun comme point d'ancrage dans le développement de certains secteurs habités afin de densifier leur environnement bâti. Cette approche rappelle les concepts clés du développement axé sur le transport en commun (*transit-oriented development* ou TOD) proposés par l'architecte Calthrope en 1993. Le TOD met l'être humain au centre des préoccupations visant à réimaginer les centres urbains. Les répercussions d'un développement axé sur le transport sont multiples et elles réitèrent l'importance de structurer un réseau de transport en commun fonctionnel. Un réseau de transport peut indirectement influencer les aspects sociaux, environnementaux et économiques des régions où il est implanté. Dans un contexte américain, Cervero et al. (2004) ont chiffré certains bénéfices, autant dans le secteur public que privé, liés aux développements d'un réseau de transport en commun au centre de la croissance urbaine. Les bénéfices de premier plan pour le secteur public incluent l'augmentation de l'achalandage dans les transports en commun et des revenus de la vente de titres, la création d'opportunités de développement en partenariat avec le privé, la revitalisation des secteurs visés et l'appui du développement économique régional. Pour le secteur privé, les auteurs notent l'augmentation de la valeur foncière, la création de projets immobiliers, ainsi qu'une augmentation des ventes dans les commerces à proximité des développements axés sur le transport en commun. Dans un contexte québécois, une étude publiée par l'Observatoire de la Mobilité

Durable de l'Université de Montréal répertorie les nombreuses contributions des sociétés de transport en commun aux trois sphères du développement durable (écologie, société et économie). Les contributions sont catégorisées en sept catégories : 1) finances des ménages et individus, 2) santé publique, 3) sécurité, 4) milieu de vie, 5) équité sociale, 6) environnement, ressources naturelle et énergie et 7) développement économique. Chaque catégorie de contributions est accompagnée d'une liste d'indicateurs potentiels permettant de les quantifier et caractériser (Beaudet, Morency, Sioui et Wolff, 2010).

Le TOD implique aussi intrinsèquement le développement de villes à échelle humaine. De par sa nature, une ville à l'échelle humaine met de l'avant la marchabilité, et de façon un peu contradictoire aux propos tenus jusqu'ici, une planification étrangère à la notion des réseaux de transport collectif (Gehl, 2012). Toutefois, un tel développement rejoint la notion centrale de l'accessibilité si présente dans la littérature associée aux réseaux de TC. Chaque déplacement en transport en commun commence et se termine par un déplacement à pied. Il va de soi, que le développement urbain et l'implantation d'un réseau de TC doivent aller de pair pour favoriser son adoption et augmenter son efficacité. La ville de Gatineau (2013) reprend ces concepts pour proposer un plan de déplacements durables axé sur la priorité donnée aux piétons, dans le but de limiter l'utilisation de la voiture et conséquemment de favoriser l'utilisation de son réseau de TC. Cet aspect de la ville de Gatineau est plus amplement détaillé dans l'étude de cas présentée au Chapitre 6.

2.1.1 Conception et analyse des réseaux

Le transport en commun est principalement un service public. L'évolution de son réseau et ses frais d'exploitation sont financés partiellement par la tarification des utilisateurs et en majeure partie par les différents paliers gouvernementaux (Société de Transport de Montréal, 2015). Afin de rentabiliser ces investissements massifs et d'optimiser l'offre de service en fonction des fonds disponibles, plusieurs guides et méthodologies ont été développés. Deux guides sont particulièrement présents dans la littérature. La méthodologie du *Transit Capacity and Quality of Service Manual* (Ryus, P. et al., 2013) s'appuie principalement sur l'évaluation d'un réseau de transport en commun existant et permet d'en estimer les capacités, les vitesses, la fiabilité et la qualité de service. L'ouvrage *Public Transit Planning and Operation* (Ceder, 2007) propose une méthodologie exhaustive pour instaurer un service de transport en commun en quatre étapes : 1)

Conception du réseau et des routes, 2) Constitution des horaires de passage, 3) Planification des véhicules et 4) Planification du personnel. Une nouvelle édition de cet ouvrage a été rendue disponible au courant de l'année 2015. Ces guides se basent sur un recensement des écrits éprouvés sur la planification des réseaux de transport en commun, mais ne couvrent pas certaines méthodologies exploratoires actuellement discutées en recherche.

Les recherches portant sur la planification et la conception des réseaux sont rares. La majorité des écrits recensés portent sur des indicateurs de performances ou encore sont liés principalement à la demande. Ceux-ci seront discutés à la sous-section 2.4. Des publications adressant la problématique et le contexte des réseaux de TC, on note d'abord l'approche de Cipriani, Gori et Petrelli (2012) qui offre en parallèle une amélioration de méthodes existantes des modèles d'optimisation basés sur la demande et l'implantation d'une méthode plus expérimentale d'algorithmes génétiques. Cette méthode est appliquée à un réseau routier complexe (comparativement à un réseau en grille ou radial), à un réseau de transport public multimodal (TGV, bus et tramway) et à une demande décentralisée. L'objectif de ces méthodes est de concevoir ou de modifier un réseau existant de façon optimale.

Mony (2011) a étudié et caractérisé un réseau de transport en commun de banlieue, plutôt que celui d'un réseau urbain. Il propose une exploration des ensembles de données en comparant les enrichissements des données nécessaires à l'analyse contextuelle des réseaux en milieu urbain et de banlieue. Il exprime finalement les différences entre ces ensembles de données. Ensuite, il décrit l'environnement et les infrastructures routières propres aux réseaux banlieusards. La demande est aussi analysée avec une approche basée sur les principaux générateurs de déplacements, l'accès au réseau et la consommation des ressources nécessaires à l'opération du réseau. Ce contexte lui permet finalement d'aborder un aspect important du partage du financement dans un milieu géopolitique complexe associé aux réseaux de TC.

L'objectif de la caractérisation des réseaux de transport en commun n'est pas propre à Mony et est repris par plusieurs auteurs et chercheurs, notamment par Rafiee (2009) dans son mémoire de maîtrise. Il propose une approche méthodologique pour d'abord définir la notion de corridor de transport en commun à partir de l'analyse des données de temps de passages, de feux de circulation, de recensement et d'enquête origine-destination. Il identifie ensuite des indicateurs de

performances d'un système de transport en commun qu'il évalue et analyse à l'aide de données opérationnelles.

Un guide intérimaire publié par le *Transportation Research Board* (TRB) (TranSystems Corporation, Planners Collaborative, Inc. et Tom Crikelair Associates, 2006) fait état des méthodes utilisées en pratique par les agences de transport pour augmenter l'achalandage de leurs services. Entre autres, une section complète est dédiée à l'évaluation des services existants. De façon sommaire, ce guide liste les étapes d'évaluation suivantes : 1) collecte de données sur l'achalandage, 2) classification des routes, 3) développement de mesures et d'indicateurs d'évaluation des routes (conception et performance), 4) évaluation de la performance des routes, 5) identification des problématiques des routes et 6) mettre au point des mesures pour régler les problèmes identifiés.

Annexé à son plan de mobilité, Metrolinx (2013) a publié un rapport pour faciliter le suivi de son réseau de transport en commun. Celui-ci prend la forme de questions permettant de caractériser plusieurs aspects de leur réseau. Ces questions sont suivies d'une proposition d'indicateurs clés permettant une analyse plus profonde de la situation et de répondre aux questions souvent posées par les planificateurs de service, mais aussi par les utilisateurs et les décideurs publics.

Un rapport déposé par Metropolitan Knowledge International, McCormick Rankin Corporation et Casello (2010) pour le compte de l'Association Canadienne du Transport Urbain (CUTA) offre un angle d'analyse différent que celui apporté par les indicateurs de performance souvent rencontrés dans la littérature. Les indicateurs et analyses proposés s'appuient plutôt sur les bénéfices économiques liés aux différents réseaux de transport en commun. Comme mentionné précédemment, les réseaux ont des impacts directs et indirects sur plusieurs sphères de la société. Le rapport approfondit les analyses au niveau des bénéfices directs sur les utilisateurs du service, sur l'environnement et sur la santé publique. Le rapport propose aussi une analyse globale de l'état du service de TC au Canada, de ses coûts et performances économiques.

D'un point de vue expérimental, quelques chercheurs développent actuellement des méthodologies basées sur les algorithmes génétiques afin de concevoir des réseaux de TC optimaux (Nayeem, Rahman et Rahman, 2014). Ces algorithmes en sont encore au stade d'expérimentation, mais génèrent des résultats rapides et prometteurs. Le potentiel des algorithmes génétiques dans l'analyse des réseaux est très grand. Dans leur état actuel, ils ne prennent qu'un nombre limité de

contraintes d'optimisation et nécessiteront encore plusieurs étapes de développement avant de pouvoir être utilisés en production.

L'algorithme développé par Nayeem, Rahman et Rahman. (2014) s'appuie sur le concept d'un algorithme génétique avec élitisme. Il vise à concevoir un réseau de TC de façon itérative en maximisant le nombre total de clients satisfaits (desservis), en minimisant le nombre de transferts et en minimisant le temps total de déplacement global pour l'ensemble des utilisateurs. À chaque itération, l'algorithme conserve les éléments répondant le mieux aux critères afin de faire converger plus rapidement les itérations suivantes en évitant une génération complètement au hasard des éléments.

En reprenant les mêmes critères de convergence, Nikolic et Teodorovic (2013) ont développé un algorithme de type *Bee Colony Optimization* dont le fonctionnement de recherche aléatoire permettant de converger vers une solution rappelle la façon dont les abeilles recherchent leur nourriture dans la nature. L'algorithme génère plusieurs pistes de solution et alloue certains effectifs pour évaluer le potentiel que chacune soit la solution optimale recherchée. Plus la probabilité est élevée, plus l'algorithme favorisera le développement de cette solution. Leur méthodologie a été testée sur des cas connus permettant de comparer leurs résultats aux autres méthodes actuellement proposées. Elle pourrait, selon les auteurs, rivaliser avec les méthodes d'algorithme génétique, souvent préférées dans la littérature, pour générer des solutions de qualité.

2.1.2 Synthèse sur les réseaux de TC

Cette première section de la revue de littérature visait deux principaux objectifs. Elle a d'abord défini le rôle des réseaux TC en milieu urbain, puis énoncé quelques méthodes utilisées en pratique et en recherche pour concevoir et analyser ces réseaux.

Un réseau de transport en commun peut devenir un élément structurant d'un milieu urbain, particulièrement en ce qui a trait aux modes lourds. Dans plusieurs villes, les investissements en transport en commun visent à inciter un développement urbain responsable, dans une optique de densifier le bâti et la population et de stimuler une économie locale.

Aussi, plusieurs guides de conception d'un réseau ont été brièvement présentés. Ceux-ci couvrent plusieurs aspects de la mise en place d'un réseau, allant de la conception des routes, à

l'établissement des horaires, puis à la planification des véhicules et du personnel. Ces guides proposent aussi généralement divers indicateurs de performance.

Quelques approches expérimentales ont aussi été présentées. On note l'approche d'optimisation de réseau par algorithme génétique qui semble proposer des perspectives de développement intéressantes.

2.2 General Transit Feed Specification

Historiquement l'accès à l'information concernant les transports en commun était limité aux horaires imprimés ou aux tableaux statiques affichés sur le site internet des agences. Certains services étaient aussi offerts par lien téléphonique. Par exemple, la Société de Transport de Montréal (alors Société de Transport de la Communauté Urbaine de Montréal ou STCUM) lançait en 1995 son premier calculateur de trajet en TC assisté par ordinateur. Il était alors opéré par ses employés et accessible à la demande par le public via leurs services téléphoniques (Chapleau, Allard et Trépanier, 1996). La première version grand public (Tous Azimuts) a été rendue disponible en ligne durant l'année 2000.

Calculated itineraries

- Route(s) 208, 215, 2 (78 minutes)
- Route(s) 215, 2 (80 minutes)
- Route(s) 208, 215, 2, 14 (83 minutes)

Route(s) 208, 215, 2 (78 minutes)

Origin: prom. Hyman / prom. Sunshine (Dollard-des-Ormeaux)
 Destination: rue Rachel Est / rue Berri (Montréal)
 Day: 1/20/2004, Preferred departure time: 13h45
 Walk penalty: no, Metro active: yes, Train active: no
 Trip duration: 78 minutes

Dep. Time*	FROM	Walk / route	Arr. Time*	TO
13:36	prom. Hyman / prom. Sunshine (Dollard-des-Ormeaux)	Walk for 250 meters	13:40	Hyman / des Sources
13:40	Hyman / des Sources ↳ 2222	208 Brunswick dr. Est	13:43	Brunswick / Deacon
13:44	Brunswick / Deacon ↳ 2222	215 Henri-Bourassa dr. Est	14:16	Station Côte-Vertu
14:20	Station Côte-Vertu	Ligne orange dr. Henri-Bourassa	14:46	Station Mont-Royal
14:46	Station Mont-Royal	Walk for 250 meters	14:54	rue Rachel Est / rue Berri (Montréal)

*Approximate times. Please verify schedule with AUTOBUS system or with the Information Centre by calling 574-8100 - press 8 for English, option 7 (514 795-4626 + 8 + 7)
 Schedule set on 2004-01-21 - 09:48:29
 Itinerary calculated on 03/10/04

Figure 2.1 : Première version du calculateur de trajet de la STCUM (Trépanier, Chapleau et Allard, 2005)

La *Federal Transit Administration* rapportait en 2002 qu'environ 20% des agences de transport américaines possédaient un calculateur de trajet maison (Trépanier, Chapleau et Allard 2005). Ainsi, jusqu'à l'instauration de la norme GTFS, chaque agence travaillait de son côté pour développer sa propre solution et il n'existait aucun calculateur de trajet permettant de combiner plusieurs sources d'informations.

Le format de données GTFS a été développé en 2005 dans le cadre d'une collaboration entre Google et l'agence de transport de Portland en Oregon (TriMet). Dans le but de faciliter le partage et l'accès à l'information aux utilisateurs, ils ont proposé une norme de publication des données opérationnelles des agences (par ex. arrêts, heures de passage, routes) se voulant simple pour permettre une adoption large et à faible coût de déploiement pour les petites agences de transport (McHugh, 2013).

La norme GTFS définit treize (13) fichiers texte formant un ensemble de données complet. De cet ensemble, seulement six (6) fichiers sont requis, alors que les autres sont facultatifs et apportent des précisions sur le service offert. La norme GTFS est en constante évolution par l'entremise de fichiers et de champs facultatifs pour permettre une compatibilité rétroactive et les ajouts suivent les demandes et discussions des agences de transport (Google, 2015a). Le format des fichiers est principalement élaboré pour une distribution directe aux développeurs. Ils peuvent être vus comme les différentes tables d'une base de données relationnelle. Le schéma de la Figure 2.2 illustre les différents fichiers et la façon dont ils sont liés entre eux.

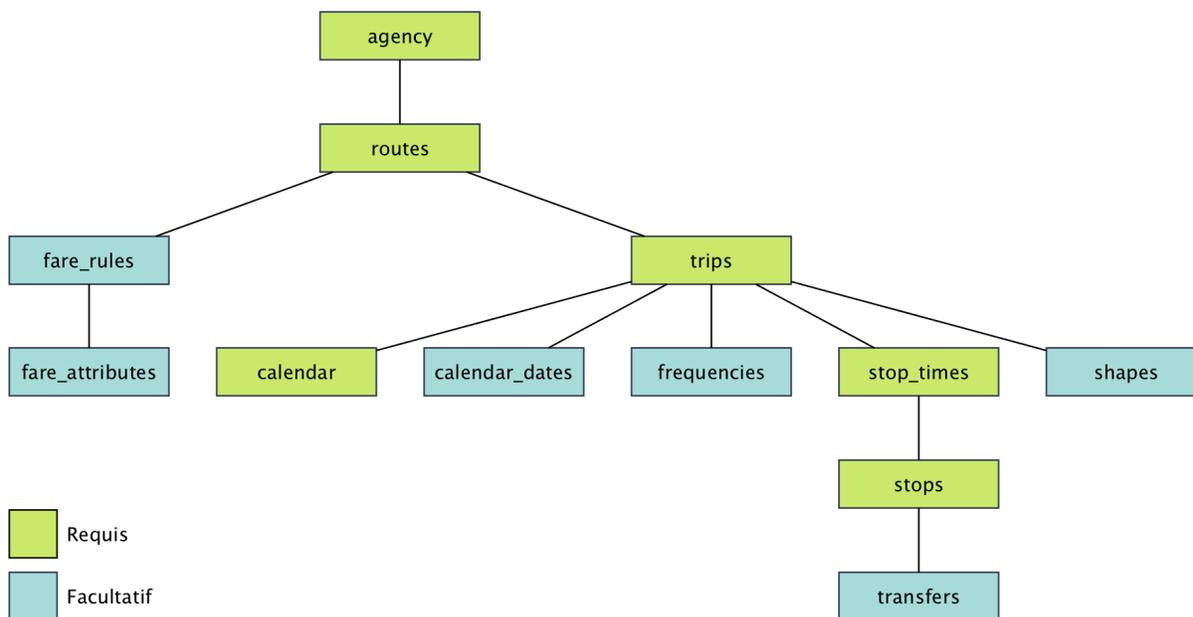


Figure 2.2: Organisation du format de données GTFS

Les ensembles de données GTFS sont générés directement par les agences de transport et sont généralement utilisés tels quels par les calculateurs de trajets. La qualité de l'information transmise leur revient donc, mais les agences n'y portent pas toutes la même attention. Les données transmises peuvent contenir certaines erreurs de codification ou une mauvaise représentation du réseau. Comme les données représentent des horaires planifiés, elles pourraient présenter des temps de passage incorrects en raison de la congestion ou encore, le positionnement des arrêts pourrait être enregistré de façon imprécise et représenter une position incorrecte. Afin d'éviter les erreurs les plus communes, Google a publié l'application *FeedValidator* (2015b). Cette application vérifie entre autres si l'ensemble de données contient tous les fichiers requis, s'il manque certaines colonnes d'information ou des valeurs clés, si deux arrêts différents se superposent, si certaines routes ou arrêts ne sont pas utilisés et s'il y a présence de certaines dates de service invalides (Google, 2014).

2.2.1 Données en temps réel

Une extension de la norme GTFS a été développée pour répondre à une demande croissante des agences de fournir de l'information en temps réel aux utilisateurs sur l'état de leur service. Les agences de transport peuvent rendre disponibles trois types de données en temps réel : mise à jour des parcours (retards, annulations, modifications de parcours), alertes de service (repositionnement des arrêts, évènement affectant un terminus, un parcours ou le réseau en entier) ou la position des véhicules (Google, 2015c).

Les données en temps réel favorisent une meilleure communication au client, influencent un changement de comportement et augmentent le niveau de satisfaction de la clientèle (Ferris, Watkins et Borning, 2011). Certains calculateurs de chemin prennent maintenant en considération les données en temps réel pour fournir l'option la plus adaptée aux utilisateurs de transport en commun (Jariyasunant, Mai et Sengupta, 2011).

Elles sont aussi un outil indéniable pour la gestion des opérations, facilitant les interventions en cas d'incidents sur le réseau, notamment au niveau des autobus. Aussi, quelques recherches ont été effectuées pour prédire et surtout réduire la problématique du resserrement des intervalles (*bus bunching*) où certains autobus se rattrapent sur les lignes ayant un fort achalandage et des fréquences peu élevées, réduisant l'efficacité globale de la ligne d'autobus (Nair *et al.*, 2015).

Finalement, les données GTFS real-time sont utilisées dans l'analyse de la performance d'un réseau, notamment au niveau du respect des horaires en plus d'être utiles pour la visualisation de données (Suchkov, Boguslavsky et Reddy, 2015).

2.2.2 Utilisation des données GTFS

Depuis leur implantation, et encore aujourd'hui, les données GTFS ont pour première vocation de fournir la localisation des arrêts et les horaires de passage des véhicules aux utilisateurs. Les calculateurs de trajet, comme *Google Maps* et *OpenTripPlanner*, prennent avantage de ces données afin de proposer des itinéraires en transport en commun sur demande.

Comme les données GTFS représentent l'ensemble de l'offre de service des agences, elles offrent un potentiel d'utilisation plus diversifié démontré dans plusieurs publications. Principalement, les divers auteurs proposent d'utiliser les données GTFS dans le calcul de mesures de performance, ainsi qu'en planification et opération des services.

Le premier exemple provient de Wong (2013a) qui a développé une preuve de concept en montrant comment les méthodes d'analyse du *Transit Capacity and Quality of Service Manual* (Ryus, P. et al., 2013) et peuvent être adaptées pour prendre comme données sources un ensemble de fichiers GTFS. La méthodologie employée semble moins concluante pour les petites agences de transport que les grandes, où il note des différences plus importantes entre les données observées par les agences et calculées à l'aide des données GTFS (Wong, 2013b). Un travail important de calcul d'indicateurs classiques de performance a été fait par The World Bank (2013) qui propose un rapport incluant une méthodologie complète, codes SQL à l'appui, pour calculer des indicateurs statiques de performance à partir des données GTFS. Lee, Tong et Hickman (2012) démontrent aussi un calcul d'indicateur d'accessibilité spatiale basé sur la distance entre une position quelconque (origine du déplacement) et un ensemble de points (arrêts). Les ensembles de points sont constitués de façon à représenter l'accès à l'ensemble du service ou encore au service express en heure de pointe. Toutefois, la méthodologie ne tient pas compte de la fréquence de passage ou encore de la destination et du temps de déplacement dans son calcul d'accessibilité. Ma et Knaap (2014) ont étudié l'accessibilité spatiotemporelle aux emplois sur la *Purple Line* au Maryland, États-Unis à l'aide d'un réseau multimodal combinant la marche et le réseau de transport en commun. Toutefois, au niveau des réseaux multimodaux, Pajor (2009) propose un modèle de calculateur de trajet plus intéressant basé sur des données tabulaires (GTFS) incluant le train, l'avion et le transport en commun. Les résultats des calculateurs de chemin et des analyses d'accessibilité pourraient être améliorés par l'utilisation de la méthode de Lee, Hickman et Tong (2012). Lorsqu'un individu planifie une activité, celle-ci n'origine ou ne se destine pas précisément d'un arrêt de TC à un autre, mais plutôt d'une localisation spécifique qui pourrait être représentée par plusieurs arrêts de TC. Le modèle vise donc à agréger plusieurs arrêts de transport en un point d'accès commun pour représenter la réalité de déplacement des utilisateurs.

Par l'entremise du *National Center for Transit Research*, Catala (2011) propose un cadre de développement futur de la norme GTFS et principalement de son utilisation au sein des agences. Il relève la façon dont ces données sont actuellement utilisées en pratique pour proposer des outils additionnels pour aider à la planification et à l'opération des transports. Dans cette lignée, Porter, Kim et Ghanbartehrani (2014) proposent une preuve de concept de l'utilisation des données GTFS pour l'optimisation du réseau de transport en commun de l'Oregon.

Finalement, les données GTFS ont été utilisées dans un cadre pratique pour le développement d'applications. De façon sommaire, Zhang, Chen et Lawson (2014) montrent comment les données GTFS peuvent être incorporées dans le développement d'une application web. Antrim et Barbeau (2013) proposent quant à eux une revue large des opportunités d'utilisation des données GTFS, incluant les calculateurs de trajets multimodaux, la création d'horaires, les applications mobiles, la visualisation de données, les mesures d'accessibilité et les outils de planification.

La littérature associée à l'utilisation des données GTFS est plutôt récente, comme en témoigne la date de publication des articles. Encore peu de recherches concernant le TC ont été effectuées à partir des données GTFS. Le fait que les agences de transport n'utilisent pas nativement ce format pour leur planification pourrait en être la cause, mais la mise en disponibilité grandissante de ces données par les agences de transport pourrait aussi changer la perception des données GTFS et favoriser leur utilisation dans différentes sphères de recherche, de distribution et en pratique au sein des agences.

2.3 Cartes à puce

Ce mémoire n'a pas comme objectif de développer une discussion détaillée concernant les technologies implantées pour les systèmes de cartes à puce des agences de transport ; plusieurs publications proposent déjà un tel comparatif (Torres, Izquierdo et Sierra., 2007 ; Lu, 2007 ; Pelletier, Trépanier et Morency, 2011). Dans ce sens, cette sous-section vise principalement à montrer les méthodologies existantes pour traiter les données de cartes à puce. Elle vise également à montrer de quelles façons celles-ci peuvent être utilisées dans la caractérisation d'un réseau de transport en commun.

Les cartes à puce représentent les données transactionnelles effectuées sur un réseau de TC. Elles permettent donc de facilement caractériser la demande. Pour cette raison, l'utilisation des cartes à puce en recherche est principalement axée sur l'étude de la demande. Toutefois, celles-ci peuvent être combinées à l'analyse de l'offre de service pour compléter les informations ainsi rendues disponibles. Quelques exemples d'analyses sont présentés ci-dessous.

Trépanier (2011) démontre comment les données dont le rôle premier est le contrôle des recettes clients peuvent être utilisées comme un instrument de planification des transports. Il présente plusieurs analyses articulées autour des concepts suivants : le traitement des erreurs détectées dans

les données brutes, la détermination d'un lieu de descente, la diffusion de statistiques d'achalandage, la modélisation des comportements de la clientèle, l'obtention de statistiques opérationnelles, la mesure de la fidélité des passagers.

De façon un peu plus générale, Pelletier, Trépanier et Morency (2011) proposent une revue de littérature sur l'utilisation des cartes à puce dans les transports publics. Celle-ci présente d'abord les différentes technologies utilisées pour les cartes elles-mêmes et pour leur implantation au sein des agences de transport pour des fins de production. Ils relèvent aussi plusieurs études de cas et diverses analyses classifiées sous trois grandes catégories : analyse stratégique, analyse tactique et analyse opérationnelle. Finalement, le potentiel de commercialisation des cartes à puce est un domaine encore peu étudié, ils présentent toutefois quelques expérimentations conduites sur le sujet.

Legara, Monterola, Lee et Hung (2014) analysent plusieurs aspects d'un système de métro à partir des données de perception. Leur recherche évalue la surcharge des trains et la surcharge sur les quais d'accès qui sont deux phénomènes qui affectent la dynamique du système. Ils utilisent les données CAP pour établir la capacité critique, les temps de parcours et les délais dans les temps de parcours dus aux phénomènes rapportés.

Yu et He (2014) estiment les flux de passagers sur un réseau TC à partir d'un algorithme identifiant la probable destination des passagers en fonction des données CAP. D'autres recherches en ce sens ont été effectuées, notamment par Giraud (2016) qui a perfectionné un algorithme OD à partir des données CAP du Réseau de Transport de Longueuil.

Song, Eom, Lee, Min et Yang (2015) utilisent des méthodes d'exploration des données (*data mining*) afin d'étudier et de développer des indicateurs à partir de données de perception équivalentes à plus de 10 millions de transactions quotidiennes. La notion de niveau de service est utilisée pour évaluer les performances de plusieurs éléments du réseau de la ville de Séoul, notamment les temps de correspondance et les temps de parcours. Finalement, Gaudette (2015) a dérivé des origines et des destinations à partir des données CAP de la Société de Transport de Laval et des données GTFS dans le but d'en ressortir une demande pouvant servir dans un contexte de microsimulation. Il en dérive aussi plusieurs indicateurs, notamment les profils de charge et les taux d'occupation spatial et temporel.

2.4 Indicateurs

La notion d'indicateurs n'est pas propre aux réseaux de transport en commun et est plutôt omniprésente dans une vaste sélection de domaines où certains paramètres doivent être optimisés et où la performance du système doit être quantifiée. La complexité de l'offre de service attachée aux réseaux de transport en commun, ainsi que les nombreuses contraintes organisationnelles font en sorte qu'il est difficile de caractériser l'offre de transport en commun.

Bien qu'un grand nombre de recherches portent sur l'analyse de la demande de TC plutôt que de l'offre, les méthodologies et indicateurs proposés peuvent alimenter de façon constructive les réflexions quant à la caractérisation de l'offre. La première sous-section porte donc sur les indicateurs de performance liés à la demande de TC. Ensuite, un survol des indicateurs classiques de la caractérisation de l'offre est fait. Les recherches récentes portant sur les indicateurs plus évolués sont ensuite proposées. Finalement, la théorie des graphes est un aspect singulier, mais néanmoins pertinent de l'analyse de l'offre de TC, et les indicateurs en découlant laissent place à une sous-section distincte.

2.4.1 Indicateurs de performance

Les indicateurs de performance évaluent les rendements d'une organisation en fonction de la gestion de ses ressources internes (monétaires, humaines, véhicules et équipements) et de l'environnement dans lequel elle opère. Dans un contexte où les agences de transport ont des obligations d'efficience à l'égard de leur clientèle et des différents investisseurs, les indicateurs de performance sont ceux les plus développés dans la littérature pour répondre aux besoins de l'industrie de quantifier et caractériser plusieurs concepts observés sur leur réseau. En conséquence, en plus des recherches universitaires, les études de cas peuvent aussi nous renseigner sur les indicateurs de performance utilisés en pratique.

Certains guides publiés par des organismes reconnus proposent des séries complètes d'indicateurs de performance. *The Transit Capacity and Quality of Service Manual* propose des méthodologies pour évaluer la capacité d'un service d'autobus ou ferroviaire, ainsi qu'un cadre d'analyse pour évaluer la qualité du service du point de vue du voyageur (Ryus et al., 2013). Ce guide introduit la notion de niveau de service pour évaluer le service offert. Orth, Weidmann et Dorbritz (2012)

proposent une version étendue de ce système pouvant analyser le niveau de service au niveau des objets (ex : arrêt ou route) jusqu'au réseau complet à partir des données de perception.

Plusieurs de ces guides préfèrent catégoriser les indicateurs en fonction des sphères d'intervention (ex. disponibilité, confort, sécurité, économie, capacité). C'est le cas de trois guides proposés par le *Transit Cooperative Research Program* (Kittelson & Associates, Inc., Urbitrans, Inc., LKC Consulting Services, Inc., MORPACE International, Inc. et Queensland University of Technology, 2003; TranSystems Corporation et al., 2006; Trompet et Anderson, 2009) et de deux revues de littérature rapportant les principaux indicateurs utilisés en pratique (Eboli et Mazzulla, 2012; Shah et al., 2013). Un rapport proposé par l'Institut de la Gestion Déléguée (2008) sort du lot en proposant des fiches détaillées pour chacun des indicateurs proposés présentant le contexte dans lequel ces indicateurs sont implantés.

Quelques auteurs préfèrent une approche orientée objet pour analyser la performance d'un réseau. Ainsi, plutôt que de catégoriser les indicateurs en fonction des objectifs fixés, ils classent leurs indicateurs selon les objets présents sur le réseau : arrêt, route et réseau (Chen, Yu, Zhang et Guo, 2009; Mishra, Welch et Jha, 2012; Saberi, Zockaie, Wei et Ahmed, 2013).

D'autres publications s'intéressent plus singulièrement au développement d'un indicateur précis ou à l'analyse d'un aspect isolé du réseau. Currie (2010) propose une méthode pour évaluer l'écart entre les services offerts et les besoins de la population socialement désavantagée (ex : faibles revenus, manque de qualifications professionnelles, accès à l'internet, possession automobile). Eboli et Mazzulla (2009) ont développé une mesure d'évaluation de la satisfaction de la clientèle face au service de transport en commun. Cette mesure prend en compte l'hétérogénéité des jugements des répondants, découlant généralement de divers aspects socioéconomiques (ex : sexe, âge, emploi, revenus).

Finalement, il existe des documents qui proposent un cadre d'analyse en basant leur proposition sur des études de cas. Le rapport du *National Cooperative Highway Research Program* intitulé *Measuring Transportation Network Performance* s'applique en partie aux réseaux de transport en commun et décrit une méthode pouvant être appliquée par les agences de transport pour intégrer les indicateurs de performance dans leurs méthodes de travail habituelles avec l'apport d'études de cas (KRW, Inc., 2003). Metrolinx (2013) propose à son tour la méthodologie qu'elle a employée pour développer les indicateurs pertinents à l'analyse de son réseau, puis comment ceux-ci ont été

appliqués dans le contexte torontois. Les indicateurs proposés permettent de répondre aux questions généralement posées par les planificateurs de service. Ippoliti (2011) a présenté des résultats dans un cadre semblable pour le compte de l'agglomération grenobloise, en catégorisant les indicateurs selon l'efficacité commerciale et l'efficacité environnementale.

Plusieurs recherches effectuées en contexte québécois reprennent les principes décrits dans les études citées précédemment. Dionne (2006) propose une méthodologie de diagnostic et d'évaluation de la performance d'une ligne de train de banlieue à l'aide de données GPS. Une description complète des éléments menant à la caractérisation d'une ligne de train est aussi disponible dans son mémoire (ex : limites de vitesse, profil d'élévation, type de parcours, temps d'attente, distance de sécurité, période de pointe). Rafiee (2009) définit un corridor de transport en commun et propose une méthode pour en faire une caractérisation systématique en analysant les données de temps de passages, de feux de circulation, de recensement et d'enquête Origine-Destination. Les analyses abordent les thèmes du temps de parcours, la vitesse et la flotte nécessaire pour assurer le service. Gerson (2011) propose aussi l'étude de corridor de transport en commun, en soulignant la pertinence de l'approche par la variabilité observée dans les résultats entre les différents corridors. Mony (2011) a étudié les éléments d'analyse et de planification du transport en commun en lointaine banlieue de Montréal. Dans ce contexte généralement peu étudié, il évalue la variabilité temporelle de la demande et compare les résultats d'une enquête à bord aux données de perception.

2.4.2 Indicateurs classiques

Les indicateurs classiques couvrent une large sélection d'applications. Ils peuvent parfois s'apparenter aux indicateurs de performance et apporter des éléments d'analyse axés sur le réseau, parfois miser sur les utilisateurs et leur accès au service. Dans tous les cas, ils ont un point en commun : les indicateurs classiques sont statiques. Ils ne prennent pas en considération le temps autre que la fréquence, comme le temps de parcours ou encore l'aspect spatial et les lieux accessibles à partir de leur point d'accès au réseau.

D'abord, le *Transit Capacity and Quality of Service Manual* (Ryus et al., 2013) est une fois de plus retenu comme une référence importante pour l'évaluation d'indicateurs classiques liés au TC. Wong (2013b) a repris certains éléments présentés dans ce guide pour les appliquer et montrer que les données GTFS pouvaient être utilisées pour calculer plusieurs indicateurs pertinents. Il en

ressort principalement les éléments liés à l'accessibilité et au confort des usagers : fréquence moyenne, heures de service, couverture territoriale du réseau de TC, charge du réseau, adhérence à l'horaire et l'écart des temps de parcours. Certaines sources de données complémentaires sont spécifiées pour chaque mesure. Aussi, The World Bank (2013) a publié un rapport méthodologique proposant divers codes SQL pour calculer des indicateurs classiques à l'aide de données GTFS préalablement importées dans une base de données relationnelle. Rafiee (2009) rassemble aussi un nombre importants d'indicateurs classiques dans le but de caractériser de façon systémique des corridors de transport en commun. La présentation de ces indicateurs fait suite à l'identification des objets structurant un corridor (véhicules, arrêts, arrêts de correspondance, terminus, garage, trajet, liens, ligne d'autobus, réseau d'autobus) et à la définition de leurs attributs. Ces définitions sont particulièrement importantes pour bien cerner la méthodologie entourant l'évaluation d'indicateurs de performance.

Les indicateurs classiques portent souvent sur la caractérisation de l'accessibilité au service de TC. Ainsi, Huang, Liu et Peng (2008) ont développé un indicateur d'accessibilité basé sur la distance d'accès aux arrêts et sur le nombre de lignes desservant chacun d'eux. De plus, Al Mamun et Lownes (2011) passent en revue les présentes méthodes pour mesurer l'accessibilité avant de proposer un indicateur agrégeant plusieurs d'entre elles. Leur indicateur assigne un poids à trois mesures d'accessibilité (Local Index of Transit Availability, Transit Capacity and Quality of Service Manual and Time-of-Day Tool) afin de considérer les forces et limitations de chacune des méthodes et de mieux représenter l'accessibilité d'un réseau.

Finalement, Lee, Hickman et Tong (2012) ont proposé une méthode d'agrégation d'arrêts d'autobus pour mieux représenter l'expérience vécue par les utilisateurs du TC. Ils posent l'hypothèse qu'un voyageur n'origine ou ne se destine pas vers un arrêt en particulier, mais plutôt vers un lieu d'activité pouvant être représenté par plusieurs arrêts souvent adjacents. Leur méthode permet donc d'agréger un ensemble d'arrêts selon leur proximité, leur description et le territoire desservi.

2.4.3 Indicateurs évolués

Contrairement aux indicateurs classiques, les indicateurs évolués se distancent de l'état statique en prenant en considération divers éléments contextuels. On compte parmi ces éléments la fréquence de passage, la vulnérabilité des utilisateurs face aux réseaux et les destinations atteignables à partir

d'un certain point du réseau. Ces indicateurs fournissent donc une idée plus précise sur l'étendue et l'intensité du service offert. Comme ces indicateurs sont relativement nouveaux, ils sont encore peu fréquents dans la littérature et aucun guide exhaustif ne propose de méthodologie ou encore une liste des indicateurs fréquemment utilisés. On note toutefois plusieurs recherches notables.

D'abord, Ceder et Teh (2010) ont proposé un indicateur permettant de comparer la connectivité entre deux réseaux de villes distinctes. Cet indicateur se démarque de ceux précédemment développés par l'intégration de variables qualitatives, en plus des variables quantitatives plus souvent retrouvés dans ce type d'indicateur. Les variables intégrées se rapportent à celles pouvant influencer le choix modal d'un utilisateur : temps de marche, temps d'attente, temps de parcours, fréquence moyenne, facilité des correspondances, disponibilité de l'information et connectivité globale (mesure statique de connectivité des arrêts).

Godin (2012) détaille d'abord une réflexion sur la typologie des indicateurs d'accessibilité dans le but de les caractériser sous quatre branches principales : indicateurs individuels, universels, zonaux et ciblés. À partir de ces définitions, elle propose un outil permettant d'obtenir rapidement la superficie accessible à un utilisateur par l'entremise du service de TC. L'intégration de cet aspect temporel lui permet aussi d'évaluer la compétitivité du TC par rapport à la voiture.

Ferrari, Berlingiero, Calabrese et Curtis-Davidson (2013) ont analysé l'accessibilité au réseau de TC de Londres du point de vue d'une personne à mobilité réduite. Leur analyse prend en considération trois indices : le temps de parcours total, les temps de correspondance et le nombre de correspondances afin de répondre à cinq questionnements clés :

- 1) La comparaison du temps de déplacement d'une personne à mobilité réduite et d'une personne exempte de ces contraintes.
- 2) La variation du nombre de correspondances.
- 3) L'analyse de la corrélation des variables.
- 4) La catégorisation des trajets en fonction de l'heure de départ et de la distance parcourue (en termes de temps de parcours et du nombre de correspondances).
- 5) Les différences observées entre différentes régions.

L'accessibilité est un thème qui revient dans le travail effectué par Farber, Morang et Widener (2014) qui analysent la variabilité temporelle de l'accessibilité aux supermarchés. Leur indicateur

est calculé sur une période de 24 heures et est basée sur une matrice des temps de parcours entre deux points, calculée pour chaque minute de la journée. Aussi, Anderson, Owen et Levinson (2012) ont proposé un indicateur d'accessibilité continue pour les services de TC. Leur approche s'éloigne de la définition traditionnelle qui considère l'accessibilité comme une propriété invariable dans le temps d'un point, d'une région ou d'un espace. Leur approche considère donc les différences dans les correspondances possibles, la fréquence des trajets et indirectement l'aspect de départ et d'arrivée à des heures fixes plutôt qu'aux heures désirées.

Finalement, Fransen et al. (2015) mesurent l'écart entre l'offre de TC et les besoins d'une région. Leur approche originale évalue d'abord un indice des besoins en TC basé entre autres sur la possession automobile, les revenus, l'emploi et l'âge, puis un indice de l'offre représentant le niveau de desserte d'une région. La différence entre ces deux indices normalisés correspond donc à l'écart entre les besoins de la population et du service offert.

2.4.4 Indicateurs découlant de la théorie des graphes

La théorie des graphes est un angle de recherche intéressant pour l'analyse des réseaux de TC. Comme plusieurs types de réseaux, notamment les réseaux routiers, les réseaux de TC peuvent simplement être modélisés sous forme d'un graphe, ayant ses arrêts au lieu des nœuds et les routes entre ces arrêts comme arêtes. Ainsi, les mesures développées pour l'analyse des graphes peuvent être appliquées aux réseaux de TC, en suivant leur contexte d'application. Diverses recherches en ce sens ont été conduites et peuvent être catégorisées selon leur utilisation de données statiques ou temporelles.

2.4.4.1 Information statique

La façon naturelle d'organiser les éléments d'un réseau sous la forme d'un graphe est de représenter chaque arrêt d'autobus par un nœud et chaque segment entre deux nœuds par une arête. Tout comme les indicateurs classiques, cette représentation est plutôt statique et n'intègre pas l'aspect temporel des données.

Derrible et Kennedy (2009, 2011) démontrent que la topologie d'un réseau TC joue un rôle clé pour y attirer les utilisateurs. Ils ont analysé 19 réseaux de métro à travers le monde à l'aide de concepts revus et mis à jour de la théorie des graphes. Ils ont entre autres étudié la couverture du réseau, la directitude des trajets et la connectivité. Lors d'une étude ultérieure, ils ont répertorié de

nombreux indicateurs d'analyse des réseaux découlant de la théorie des graphes. Ceux-ci sont listés et décrits au Tableau 2.1 et sont accompagnés de leurs avantages et inconvénients. Finalement, Derrible et Kennedy décrivent trois défis à surmonter pour perfectionner l'étude des réseaux de TC :

- 1) Développer une méthodologie d'analyse systématique et standardisée des réseaux TC prenant en considération la complexité du transport public.
- 2) Intégrer les différents modes composant le transport en commun.
- 3) Établir une liste intégrale d'indicateurs pour guider les planificateurs.

Aussi, Gleyze (2001) a préalablement publié un guide complet pour l'évaluation de l'accessibilité d'un réseau. Il tente d'abord de définir ce que représente l'accessibilité à un réseau de TC en répertoriant les nombreuses définitions trouvées dans la littérature. Il recense ensuite de nombreux indices d'accessibilité, souvent liés à la notion de centralité propre aux graphes. Chaque indice est clairement défini et est accompagné de son interprétation illustrée à l'aide d'un exemple.

Chen, Yang, Kongsomsaksakul et Lee (2006) ont proposé une méthodologie pour calculer la vulnérabilité d'un utilisateur face au réseau TC. Cet indicateur considère les conséquences d'un arrêt de service sur une ligne de transport en commun sur le temps de déplacement, les coûts généralisés, puis sur les comportements des usagers.

L'ensemble des indicateurs proposés par les auteurs jusqu'à maintenant sont plutôt statiques et prennent rarement en considération l'aspect temporel des réseaux de TC. Welch et Mishra (2013) proposent en ce sens une nouvelle mesure d'équité basée sur la connectivité du réseau. Cette fois-ci, ils considèrent les aspects comme la fréquence, la vitesse et la capacité afin de calculer leur indicateur.

2.4.4.2 Information temporelle

Les informations temporelles peuvent aussi être explicitement intégrées dans un graphe, permettant d'ajouter un degré d'analyse supplémentaire et de proposer des indicateurs plus intéressants. Deux modèles organisationnels permettent d'intégrer les horaires de TC initialement sous forme tabulaire dans un graphe : la 1) modélisation fonction du temps (*time-dependent model*) et la 2) modélisation temporelle étendue (*time-expanded model*). La Figure 2.3 schématise les deux approches.

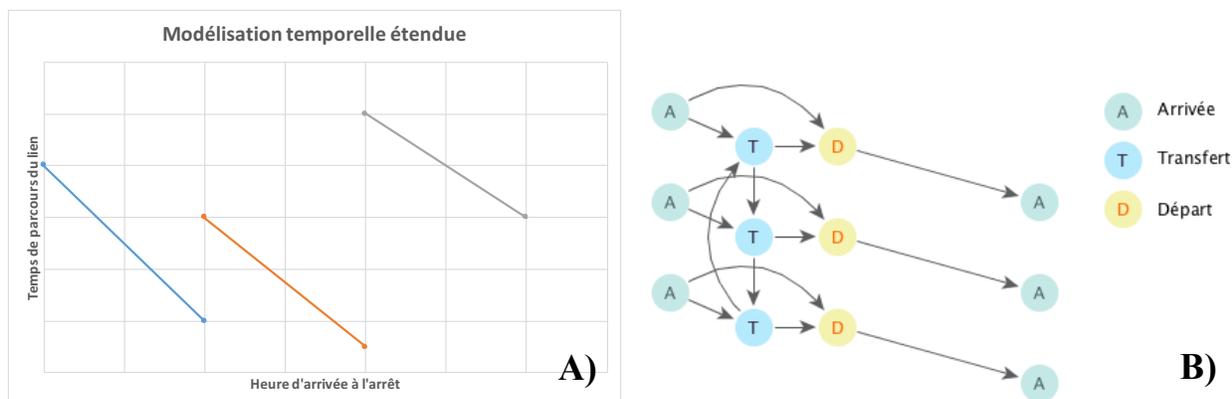


Figure 2.3 : A) Modélisation en fonction du temps B) Modélisation temporelle étendue

Modélisation fonction du temps (time-dependent model)

La modélisation en fonction du temps reprend l'organisation statique d'un réseau. Ainsi, les nœuds du graphe représentent les arrêts d'autobus, alors que les liens représentent les routes existantes entre deux arrêts. Toutefois, un poids sous la forme d'une équation dépendant du temps est attribué à chaque lien. Lorsqu'on traverse le graphe, le temps d'arrivée peut être calculé à chaque arrêt et on vérifie ainsi si le lien peut être traversé ou non selon la fonction de temps qui y est attribué. Cette fonction retourne le temps de parcours, en tenant compte du temps d'attente avant le prochain passage.

Modélisation temporelle étendue (time-expanded model)

Dans la modélisation temporelle étendue, chaque nœud du graphe représente un évènement. Pour un réseau de TC, trois types d'évènements peuvent se produire : une arrivée, un transfert et un départ. La Figure 2.3 A) illustre comment chaque évènement est lié aux autres.

Dans le cas des fichiers GTFS, un évènement *Arrivée* pour chaque *stop time* enregistré. Un évènement *Transfert* est ajouté et est suivi d'un évènement *Départ*, sauf dans le cas où l'évènement Arrivée a lieu à un terminus. Pour pouvoir progresser dans le graphe, tous les évènements sont liés par six types d'arêtes. Chacune des arêtes est caractérisée par la distance à vol d'oiseau entre deux arrêts (ou une valeur nulle si l'arête lie deux évènements d'un même arrêt) et le temps (ou la durée) entre deux évènements.

1. **Arête-Départ** [T=>D]. Chaque paire de *Transfert* et de *Départ* est liée par une arête de départ (distance et durée de 0)

2. **Arête-Connexion** [D=>A]. Chaque Départ est lié à la prochaine *Arrivée* sur son parcours par une arête de connexion. Les propriétés de cette arête incluent le temps de déplacement et la distance.
3. **Arête-Arrêt** [T=>T]. Chaque évènement de *Transfert* est lié au prochain évènement de même type par une arête d'arrêt, représentant un déplacement au même arrêt d'autobus. La distance est égale à zéro, alors que la durée est la différence de temps entre les deux évènements *Départ* liés aux transferts.
4. **Arête-Transfert** [A=>T]. Un évènement *Arrivée* est lié au prochain évènement *Transfert* accessible chronologiquement. Un évènement *Arrivée* peut être lié à plusieurs transferts, puisqu'un passager peut se rendre à la marche à un autre arrêt dans un rayon de 500 m.
5. **Arête-Véhicule** [A=>D]. Tous les évènements *Arrivée* associés à un départ y sont liés par une arête véhicule, représentant un passager demeurant dans un même véhicule pour toute la durée de son parcours. La distance et la durée sont égales à zéro.
6. **Arête-Nuit**. L'arête nuit permet les transferts pendant la nuit du dernier évènement *Transfert* d'un arrêt au premier transfert du même arrêt.

La combinaison des nœuds et des arêtes représente les interactions observées sur un réseau de TC. Un autobus arrive à un arrêt à partir d'un *départ* (arête de type 1). Le passager a l'option de rester dans le même *véhicule* (type 5), de faire un *transfert* vers un autre arrêt (type 4) ou vers un prochain départ (type 3) s'il n'a pas encore atteint sa destination. Finalement, l'autobus quitte l'arrêt vers le prochain arrêt sur son parcours (type 2).

Pajor (2009) a intégré la modélisation fonction du temps pour développer un calculateur de chemin multimodal, incluant les réseaux ferroviaire, d'autobus et aérien. Son mémoire décrit explicitement les avantages et désavantages des deux modèles, ainsi que la façon dont les différentes sources de données ont été traitées afin d'être intégrées dans un graphe. Finalement, Mishra et *al.* (2014) font état de la difficulté de calculer un indicateur de connectivité pour un réseau de TC puisqu'il doit, entre autres, considérer les différents tarifs, les horaires, la capacité et la fréquence de passage. Leur approche passe d'abord par le calcul de la connectivité de tous les nœuds du réseau, prenant en compte la capacité, les heures de service, la fréquence, la vitesse, la distance des liens et le niveau d'activité de la ligne. Ils calculent ensuite la connectivité des lignes à partir de ces premiers résultats, puis ils évaluent la connectivité des lieux de correspondance.

Tableau 2.1: Indicateurs dérivés de la théorie des graphes pour l'étude des réseaux TC (Adaptation de Derrible & Kennedy, 2011)

Nom (Auteur) Description	Équation	Avantages	Inconvénients
Nombre cyclomatique (μ) Mesure le nombre de cycles ou circuits d'un réseau.	$\mu = e - v + p$	Met de l'avant la notion de cycles et de trajets alternatifs.	Ne considère pas la pertinence des différents cycles ou des trajets alternatifs.
Indice-α (planaire) (Garrison et Marble) Aussi connu en tant que degré de cyclicité. Représente le ratio du nombre de cycles réel d'un réseau sur le nombre potentiel de cycles du même réseau entièrement connecté.	$\alpha_{\text{planaire}} = \frac{e - v + 1}{2v - 5}$	<ul style="list-style-type: none"> • Lié directement à la conception de réseau ; • Lié au nombre cyclomatique ; et • Considère la planarité du réseau. 	Ne considère pas la pertinence des différents cycles ou des trajets alternatifs.
Indice-γ (planaire) (Garrison et Marble) Aussi connu en tant que degré de connectivité. Représente le ratio du nombre d'arêtes réel d'un réseau sur le nombre potentiel d'arêtes du même réseau entièrement connecté.	$\gamma_{\text{planaire}} = \frac{e - v + 1}{1/2v(v - 1)}$	<ul style="list-style-type: none"> • Lié directement à la conception de réseau ; et • Considère la planarité du réseau. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne considère pas l'origine ni la destination d'un trajet ; et • Ne considère pas la fréquence du service.
Indice-β (Garrison et Marble) Aussi connu en tant que complexité. Représente la moyenne du nombre d'arêtes par nœud.	$\beta = \frac{e}{v}$	Indicateur simple, facile à calculé, à comprendre et à représenter.	Ne donne aucune information précise ou contexte. La même valeur pourrait illustrer deux réseaux complètement différents.
Indice-π (Kansky) Ratio de la longueur total du réseau (R) et de la longueur du diamètre du réseau (d). Un meilleur réseau devrait être long, mais conserver un petit diamètre pour réduire les temps de parcours.	$\pi = \frac{R}{d}$	<ul style="list-style-type: none"> • Indicateur simple, facile à calculé ; et • Peut être utilisé tel quel pour comparer facilement l'état avant/après d'un réseau suivant des modifications. 	-
e: nombre d'arêtes/liens, v: nombre de nœuds, p: nombre de sous-graphes (souvent 1 puisque les réseaux TC sont rarement disjoints)			

Tableau 2.1 : Indicateurs dérivés de la théorie des graphes pour l'étude des réseaux TC (Adaptation de Derrible & Kennedy, 2011) (suite)

Nom (Auteur) Description	Équation	Avantages	Inconvénients
R_T (Lam et Schuler) Ratio de la moyenne des temps de parcours optimaux ($\bar{\bar{T}}$) et réels (\bar{t}). Le temps de parcours optimal est calculé sur un réseau complètement connecté. En l'absence d'une connexion entre une paire OD, le temps de parcours réel est infini.	$R_T = \frac{\bar{\bar{T}}}{\bar{t}}$	Met de l'avant la notion de valeur du temps qui est un élément clé lors de la comparaison d'un réseau TC avec un réseau routier.	Requiert de l'information sur les caractéristiques opérationnelles et les modes de déplacement.
Indice de chevauchement des lignes (Vuchic et Musso) Ratio de la somme individuelle de la longueur de toutes les lignes ($\sum_i R_i$) et la longueur totale du réseau (R).	$\lambda = \frac{\sum_i R_i}{R}$	Rappel la notion de cycles et de trajets alternatifs.	<ul style="list-style-type: none"> • Ne considère pas l'origine ni la destination des lignes ; et • Ne considère pas le nombre d'utilisateurs.
Directitude (Derrible et Kennedy) Ratio du nombre de lignes de TC (N _L) et du nombre maximal de correspondances (δ). Cet indice mesure la facilité de parcourir un réseau et d'éviter les correspondances inutiles.	$\tau = \frac{N_L}{\delta}$	Bon point de départ pour évaluer la facilité de parcourir un réseau. Pourrait être intégré dans différents modèles.	La facilité de parcours n'est pas seulement liée au nombre de correspondances. Celui-ci représente un facteur parmi tant d'autres (incluant la qualité des correspondances).
Moyenne des trajets les plus courts (Watts et Strogatz) Moyenne de l'ensemble des chemins les plus courts entre tous les nœuds d'un graphe (L). La moyenne devrait être inférieure au logarithme naturel du nombre de nœuds total. La valeur est comparée à un réseau généré aléatoirement pour vérifier s'il correspond à un réseau <i>petit monde</i> .	L	Met de l'avant le phénomène du petit monde* qui peut être directement lié à la fiabilité d'un réseau. *réseau «dans lesquels on peut trouver facilement un chemin très court entre toute paire de points » (Lebhar et Schabanel, 2007)	Plus ou moins adapté à l'étude des réseaux TC. Lors de la génération aléatoire d'un réseau, les arrêts ont tendances à être isolés en raison du nombre d'arêtes très proche du nombre de nœuds.
Efficacité d'un réseau (Latora et Marchiori) En réponse aux désavantages de la moyenne des trajets les plus courts, cet indice utilise plutôt leur inverse pour évaluer l'efficacité du réseau.	$E = \frac{1}{v(v-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}$	Fonctionne essentiellement au niveau global (réseau).	En application, retourne souvent une mauvaise efficacité locale (au niveau d'un arrêt).

v: nombre de nœuds, d_{ij}: distance du trajet le plus court entre les nœuds i et j

2.4.5 Synthèse sur les indicateurs

La section d'introduction aux indicateurs de TC visait deux objectifs principaux. Elle a premièrement présenté une segmentation des différents indicateurs utilisés pour caractériser les divers aspects des réseaux : de performance, classiques, évolués et découlant de la théorie des graphes. Plusieurs de ces indicateurs proposent une base solide pour développer une méthode de caractérisation systématique d'une offre de transport en commun.

De plus, cette section a démontré la nette différence entre les indicateurs classiques et évolués. Les premiers peuvent décrire globalement un réseau et offrir une vue d'ensemble, mais ont comme limitation d'être statiques. Les indicateurs évolués tentent d'ajouter des dimensions complémentaires pour mettre en contexte les valeurs obtenues, comme la fréquence de service, les temps de parcours, la variance du service ou encore les destinations atteignables.

CHAPITRE 3 DESCRIPTION DES DONNÉES

Conformément à l'objectif défini, les ensembles de données recueillies et exploitées dans le cadre de ce projet de recherche sont principalement liés à la description de l'offre de transport en commun. Toutefois, certaines données complémentaires ont été utilisées pour approfondir les analyses et pour ajouter certains éléments de contexte aux propos discutés. De plus, une courte parenthèse sur la préservation des données est proposée. Ainsi, la section suivante est sous-divisée pour détailler 1) les données GTFS, 2) les données de cartes à puce et 3) les sources de données complémentaires.

3.1 Données GTFS

Le format de distribution de données GTFS a été présenté de façon explicite dans la revue de littérature. Comme tous les ensembles de données GTFS ne comportent pas nécessairement le même niveau de détails, cette sous-section se concentre sur la présentation des éléments présents dans les fichiers obtenus, leur source, la période de temps couverte, ainsi que l'organisation des ensembles de données en concordance avec le service offert par les agences de transport. Les données de deux agences de transport ont été exploitées. Les données de la Société de Transport de l'Outaouais (STO) ont servi à l'ensemble de l'élaboration de la méthodologie finale et à l'étude de cas et de son analyse. Celles du Conseil Intermunicipal de Transport Chambly-Richelieu-Carignan (CITCRC) ont servi à un exercice d'exploration préliminaire.

3.1.1 Société de Transport de l'Outaouais (STO)

Depuis décembre 2015, la STO met à la disposition principale des développeurs l'ensemble des informations brutes de son réseau en temps planifié. Les données sont publiées suivant le format GTFS sur le site internet de l'agence deux semaines avant leur date d'entrée en vigueur.

Un ensemble de données historiques a été mis à disposition directement par la STO pour des fins de recherche. Les fichiers partagés couvrent la période complète entre janvier 2012 et décembre 2015. En concordance avec les changements saisonniers de service, les ensembles sont publiés quatre (4) fois par année, soit pour les services d'hiver, du printemps, d'été et d'automne. Seule l'année 2013 diffère de ce modèle de publication. Comme le service *Rapibus* a été instauré à

l'automne 2013, deux ensemble de données sont proposés pour cette saison, soit avant et après l'implantation du service *Rapibus*.

Les fichiers rendus disponibles sont les mêmes d'un ensemble à l'autre et correspondent à ceux rendus publics sur le site internet de la STO. Le Tableau 3.1 compare les fichiers publiés et leur statut par rapport à la norme GTFS.

Tableau 3.1: Fichiers publiés par la STO en regard de la norme GTFS

FICHIER	REQUIS ?	DISPONIBLE ?
agency.txt	Oui	Oui
stops.txt	Oui	Oui
routes.txt	Oui	Oui
trips.txt	Oui	Oui
stop_times.txt	Oui	Oui
calendar	Oui	Oui
calendar_dates	Non	Oui
fare_attributes	Non	Non
fare_rules.txt	Non	Non
shapes.txt	Non	Oui
frequencies.txt	Non	Non
transfers.txt	Non	Non
feed_info.txt	Non	Non

Bien que la norme GTFS encadre la structure de l'information publiée par les agences de TC, elle permet une certaine liberté dans la codification de certains champs, notamment les identifiants uniques des objets. En examinant les données fournies, il est évident qu'un certain modèle est suivi pour générer les identifiants et certains des autres champs.

Comme c'est généralement le cas avec les ensembles de données GTFS, aucun dictionnaire n'est officiellement disponible quant à la codification interne des éléments puisque la signification de cette codification n'est généralement pas nécessaire pour l'usage visé par les données. Dans le cadre de cette recherche, la STO n'a pas fourni d'explications supplémentaires sur la codification des données, les résultats suivants sont basés essentiellement sur des observations.

3.1.1.1 Horaires planifiés

La gestion des horaires et des différents services offerts pour une même période se fait par l'entremise des fichiers *calendar.txt* et *calendar_dates.txt*. Le fichier requis *calendar.txt* inscrit la mise en application des différents services en fonction des jours applicables de la semaine et d'une date de début et de fin de période. Une utilisation typique et simplifiée serait d'y inscrire un service en semaine et de fin de semaine pour la durée complète de la période visée par l'ensemble de données. Dans ce type d'utilisation, le fichier facultatif *calendar_dates.txt* spécifie le retrait ou l'ajout de service pour une journée en particulier, principalement en cas de journée fériée.

Le fichier *calendar.txt* devient facultatif dans l'unique cas où chaque journée de la période est individuellement inscrite dans le fichier *calendar_dates.txt*, à l'instar de la Société de Transport de Montréal.

La STO a privilégié une utilisation typique. Le Tableau 3.2 montre un extrait de son fichier *calendar.txt*. Dans cet extrait, seul le champ *service_id* laisse place à une certaine flexibilité. Pour la STO, la valeur du champ n'est pas facilement interprétable. On peut discerner rapidement l'année, la période (hiver, printemps, été et automne) et le type de service (semaine, samedi et dimanche).

Tableau 3.2 : Extrait du fichier *calendar.txt* de la STO (automne 2013, av. Rapibus)

SERVICE_ID	_13AUT-H01S213S-Semaine-05
MONDAY	1
TUESDAY	1
WEDNESDAY	1
THURSDAY	1
FRIDAY	1
SATURDAY	0
SUNDAY	0
START_DATE	20130827
END_DATE	20130903

En observant le Tableau 3.3 on remarque toutefois une anomalie qui, bien que syntaxiquement bonne, va à l'encontre du principe de la norme GTFS. La période spécifiée dans l'extrait du Tableau 3.2 va du 27 août 2014 au 3 septembre 2013, soit une période d'application de cinq jours en

semaine. L'extrait du fichier *calendar_dates.txt* du Tableau 3.3 rapporte les exceptions qui s'y appliquent. Au final, quatre des cinq jours d'application y sont retirés pour ne laisser que la journée du 3 septembre. Ce genre d'exceptions se retrouvent plusieurs fois dans les fichiers GTFS de la STO et dupliquent les entrées d'informations qui pourraient être évitées.

Tableau 3.3 : Extrait du fichier *calendar_dates.txt* de la STO (automne 2013, av. Rapibus)

SERVICE_ID	DATE	EXCEPTION_TYPE
_13AUT-H01S213S-Semaine-05	20130828	2
_13AUT-H01S213S-Semaine-05	20130829	2
_13AUT-H01S213S-Semaine-05	20130830	2
_13AUT-H01S213S-Semaine-05	20130902	2

3.1.1.2 Objets fixes

Les objets fixes d'un réseau décrits par la norme GTFS sont inscrits dans les fichiers *stops.txt*, *routes.txt* et *shapes.txt* qui décrivent respectivement les arrêts, les lignes d'autobus et les tracés.

Dans sa codification, la STO a inscrit 1994 arrêts et 17 stations. Plusieurs de ces arrêts semblent être des duplications. Au total, 1 601 enregistrements portent un nom différent et 1 877 ont un nom et des coordonnées différents. Ces enregistrements en double peuvent biaiser certains résultats et rendre difficile le suivi dans le temps des objets.

Tableau 3.4 : Extrait du fichier *routes.txt* de la STO (automne 2013, av. Rapibus)

ROUTE_ID	ROUTE_SHORT_NAME	ROUTE_LONG_NAME	ROUTE_DESC	ROUTE_TYPE	ROUTE_URL
1-1031	1	CHELSEA		3	
1-1034	1	CHELSEA		3	
201-1031	1	CHELSEA-COURTE		3	

Le Tableau 3.4 est un extrait du fichier *routes.txt* qui décrit les différentes lignes d'autobus présentes sur le réseau de la STO. Alors que le réseau de la STO compte un peu plus de 60 lignes, le fichier *routes.txt* en recense 197. Lors de la codification des données, la STO a fait comme choix de dupliquer les lignes en fonction de la direction et des différents parcours empruntés par une

ligne, ce qui n'est généralement pas encouragé par la norme GTFS. L'identifiant *route_id* correspond au numéro de la ligne, suivi de la variation du parcours de la ligne. Dans certains cas, le numéro de la ligne intégrée dans le *route_id* ne correspond pas au *route_short_name*, mais semble toutefois mieux correspondre aux numéros des lignes retrouvés dans les données des cartes à puce.

3.1.1.3 Objets temporels

Les objets temporels d'un réseau décrits par la norme GTFS sont inscrits dans les fichiers *trips.txt* et *stop_times.txt* qui décrivent respectivement les différents voyages et les passages aux arrêts. Le *trip_id* du fichier *trips.txt* semble être une combinaison du *service_id* associé et d'un numéro croissant d'un voyage à l'autre, sans signification particulière. Aussi, le champ *block_id* est renseigné pour tous les voyages, ce qui semble peu probable vue sa définition. Il est possible que la STO utilise ce champ pour un autre usage que celui prévu par la norme GTFS, comme c'est le cas pour la STL qui l'utilise pour regrouper les voyages effectués par un même chauffeur (Gaudette, 2015). Quiconque voudrait en faire usage devrait d'abord en confirmer le sens donné par l'agence.

Finalement, les identifiants uniques des objets peuvent être modifiés d'un ensemble de données à un autre et ne peuvent en conséquent être utilisés pour des fins de comparaison. Aussi, les ensembles de données publiées peuvent aussi contenir certaines erreurs de syntaxes ou de codification à l'encontre du principe de la norme. Une validation de l'ensemble de données GTFS de la STO est ainsi effectuée à la section 4.1.1.

3.1.2 Conseil Intermunicipal de Transport Chambly-Richelieu-Carignan

Le CITCRC ne distribue pas lui-même ses ensembles de données GTFS. C'est plutôt l'AMT qui est responsable de compiler et de rendre disponibles sur son site internet les données GTFS de plusieurs CIT, incluant la CITCRC.

Les fichiers relevés couvrent la période débutant le 25 mai 2015. Le Tableau 3.5 compare les fichiers publiés et leur statut par rapport à la norme GTFS.

Tableau 3.5: Fichiers publiés par la CITCRC en regard de la norme GTFS

FICHER	REQUIS ?	DISPONIBLE ?
agency.txt	Oui	Oui
stops.txt	Oui	Oui
routes.txt	Oui	Oui
trips.txt	Oui	Oui
stop_times.txt	Oui	Oui
calendar	Oui	Oui
calendar_dates	Non	Oui
fare_attributes	Non	Non
fare_rules.txt	Non	Non
shapes.txt	Non	Oui
frequencies.txt	Non	Non
transfers.txt	Non	Non
feed_info.txt	Non	Non

La CITCRC ne semblent pas appliquer de modèle récursif pour la codification de leurs données GTFS. Le Tableau 3.6 présente un extrait de leur fichier *routes.txt*. On y note que pour les deux enregistrements présentés, le *route_id* apparait sous deux formats distincts. Aussi, le *route_id* de la ligne 302 est suivi de la mention *merged* qui apparait souvent dans les identifiants des autres objets et qui ne semble pas avoir de signification particulière.

Tableau 3.6 : Extrait du fichier *routes.txt* du CITCRC (été 2015)

ROUTE_LONG_NAME	Chambly -Longueuil (via des Promenades/de Chambly)	Carignan - Montréal
ROUTE_ID	302_merged_102030408	600
ROUTE_TYPE	3	3
ROUTE_TEXT_COLOR		
AGENCY_ID	CITCRC	CITCRC
ROUTE_COLOR		
ROUTE_URL		
ROUTE_SHORT_NAME	302	600

Finalement, le fichier *calendar.txt* spécifie une date de début pour chacun des services (ex. : 20150525), mais spécifie une date de fin lointaine et fautive (ex. : 20200820) pour certains services. Cette mauvaise pratique est courante dans les fichiers GTFS publiés par l'AMT et pourrait causer l'affichage de mauvaises informations au client dans le cas, par exemple, d'une mise à jour retardé des fichiers.

3.2 Données de cartes à puce

Contrairement aux données GTFS, les données de cartes à puce proviennent exclusivement des données de perception du réseau de TC de la STO. Celles-ci ont été obtenues entre le 1^{er} janvier 2013 et le 31 décembre 2014. Un total de 24 788 550 enregistrements sont comptabilisés.

Les données recueillies par la STO permettent de suivre les transactions anonymisées effectuées par les cartes à puce sur son réseau. L'ensemble de données contient les champs d'information suivant :

- Numéro de carte
- Titre de transport
- Date
- Heure
- Type de jour
- Numéro de ligne
- Direction
- Numéro d'arrêt
- Numéro de parcours
- Heure de départ du parcours
- Numéro du véhicule
- 1^{er} embarquement (ou non)

Les données recueillies étant géolocalisées, les embarquements peuvent être associés aux arrêts de façon précise pour l'ensemble des cas. Les points de descente demeurent inconnus. Comme précisé à la section 4.1.2, certaines lignes d'autobus et numéros d'arrêts qui apparaissent dans les données de CAP ne se retrouvent pas dans les données GTFS.

3.3 Sources de données complémentaires

Les données complémentaires viennent enrichir les données principales en offrant des éléments contextuels aux analyses. Dans le cadre de cette recherche, le réseau routier, certains territoires et l'enquête Origine-Destination viennent compléter les données GTFS et de CAP.

3.3.1 Réseau routier

Pour le calcul de certains indicateurs, un ensemble de données en format *shapefiles* représentant le réseau routier du Québec et de l'Ontario a été utilisé. Celui-ci a été récupéré à partir d'*Open Street Map* en date du 9 mars 2016 (Geofabrik, 2016). Les données suivantes sont disponibles :

- Identifiant OSM
- Nom du segment
- Référence (numéro usuel d'une route ou autoroute)
- Type de segment
- Indicateur de sens unique
- Indicateur de pont
- Indicateur de tunnel
- Vitesse maximale

Certains noms de segments et certaines vitesses maximales sont absents de la base de données.

3.3.2 Délimitation des villes

Les limites municipales des villes québécoises fournies par Ressources Naturelles Canada sur son portail GéoGratis (2010) ont été utilisées dans le calcul d'indicateurs portant sur la densité d'objets sur certains territoires. La méthodologie proposée dans cette recherche pourrait utiliser n'importe

quel territoire défini par une agence de transport afin de cibler les analyses faites sur une certaine zone.

L'ensemble de données utilisé fournit plusieurs champs d'informations, bien que ceux-ci n'aient pas été valorisés dans le cadre des analyses effectuées. Les champs disponibles incluent la date d'ajout et de révision des limites municipales, leur nom usuel et légal, le type de municipalité et un indicateur de limite officielle.

3.3.3 Enquête Origine-Destination

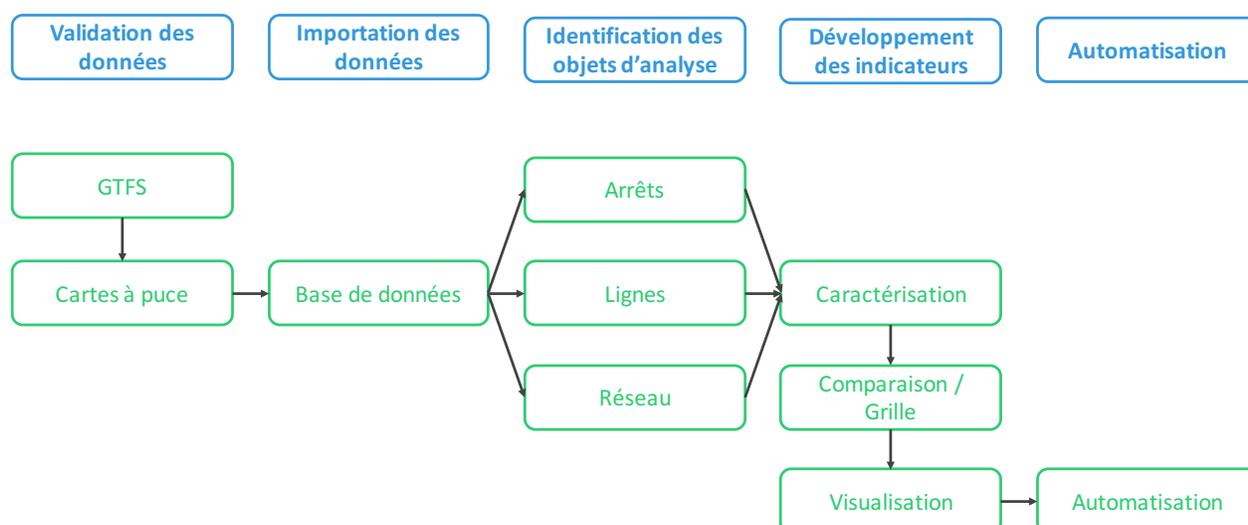
L'enquête Origine-Destination est une enquête téléphonique visant à dresser un portrait de la mobilité des personnes dans la région d'Ottawa et de Gatineau. L'entrevue permet de recueillir les informations concernant les déplacements des résidents en répondant aux principales questions *Qui?*, *Où?*, *Pourquoi?*, *Quand?* et *Comment?*. L'échantillon utilisé pour mener l'enquête correspond à environ 5% des ménages de la région.

Les données utilisées dans le cadre de ce projet de recherche proviennent de l'enquête OD 2005. Chaque enregistrement dans l'ensemble de données correspond à un déplacement déclaré par un résident de la région. En plus de la mention du mode TC, une mention est ajoutée quant au réseau utilisé (STO ou OC Transpo) pour ce segment du déplacement. Ceci facilite l'analyse des déplacements effectués sur l'un ou l'autre de ces réseaux.

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

Ce chapitre présente la méthodologie générale développée afin de répondre aux objectifs définis au Chapitre 1. La première sous-section décrit le prétraitement et la validation des données. Elle est suivie par la section portant sur leur importation dans un système de données. La troisième section passe en revue le développement du cadre d'analyse d'un réseau de TC. La quatrième section porte sur le développement de nouveaux indicateurs et l'intégration des indicateurs existants dans le cadre d'analyse. Finalement, la dernière section porte sur l'automatisation de la méthodologie. Un schéma organisationnel est présenté à la Figure 4.1.

Figure 4.1 : Schéma organisationnel de la méthodologie générale



4.1 Validation des données

Comme présenté au Chapitre 2, deux sources principales de données brutes ont été utilisées dans le cadre de cette recherche. Ces données sont généralement peu traitées avant leur publication et quelques validations doivent être faites avant de les utiliser. Dans le cas des données GTFS, les ensembles de données doivent aussi correspondre aux normes établies afin d'être reconnues par les outils développés mondialement.

4.1.1 GTFS

La distribution des données sous la norme GTFS assure la compatibilité de l'ensemble de données avec l'ensemble des outils de visualisation, de gestion ou d'analyse, et ce, peu importe la source

de ces données. Ce n'est toutefois pas toutes les agences de transport qui apportent la même attention à la qualité de leurs publications et leur vérification demeure une première étape importante dans tout projet utilisant la norme GTFS. Pour valider que les données publiées par la STO se conforment au standard, le *FeedValidator* publié par Google a été utilisé sur le service d'automne 2013 (avant Rapibus) et d'automne 2014 (après Rapibus). Un résumé des résultats est présenté au Tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Validation des fichiers GTFS de la Société de Transport de l'Outaouais (STO)

	AVANT RAPIBUS	APRÈS RAPIBUS
DESCRIPTION		
Agence	STO	STO
Lignes (nb d'enregistrements)	197	85
Arrêts (nb d'enregistrements)	2 011	1 927
Voyages (nb d'enregistrements)	57 130	46 950
Parcours (nb d'enregistrements)	277	238
Période	26 août au 20 octobre 2013	25 août au 21 décembre 2014
ERREURS		
Arrêt trop éloigné de la station parent	6	6
AVERTISSEMENTS		
Date d'expiration	1	1
Valeurs invalides	222	12
Autres problèmes	291	16
Arrêt trop éloignée de la station parent	25	25
Arrêts trop rapprochés	132	62
Vitesses trop rapides	-	48
Trop d'arrêts consécutifs avec le même temps de passage	1 275	80

La comparaison des résultats avant/après l'instauration du Rapibus montre des résultats similaires concernant les types d'erreurs présents dans les ensembles de données. Elle illustre toutefois une nette différence au niveau du nombre de lignes d'autobus présentes, mais la présence du Rapibus ne semble pas avoir permis de réduire le nombre de parcours alternatifs pour une même ligne du

réseau. Cependant, les lignes inscrites dans le service avant le Rapibus comportent souvent plus de doublons que celles inscrites dans le service après le Rapibus. Un problème dans la codification des données explique donc l'écart entre le nombre de lignes réelles et celles présentes dans les données GTFS.

Selon la norme GTFS, les arrêts d'autobus se rapportant à une **station parent** devraient être accessibles à une courte distance de marche, ce qui n'est pas le cas pour plusieurs des arrêts de la STO où certains arrêts sont à plus de 7 km de distance de leur station parent. Pour nos analyses, cette anomalie n'engendre aucun impact, mais cela pourrait ne pas être le cas de l'interprétation de tous les outils utilisant les données GTFS.

Il en est de même pour les avertissements qui ne modifient pas de façon systématique les résultats, mais pourraient engendrer des erreurs s'il s'avérait que la STO a publié de façon involontaire des données ne correspondant pas au service réellement offert. La grande différence entre le nombre d'avertissements avant et après Rapibus est simplement liée au nombre plus élevé de services différents spécifiés dans le fichier *calendar.txt* qui multiplie la quantité de données présente dans l'ensemble des autres fichiers et ne reflète pas la qualité des données.

- La norme suggère d'étendre les données de service au-delà de la **date d'expiration** de l'ensemble de données pour éviter une absence de service dans les applications des utilisateurs si un retard de publication devait survenir. Ceci n'occasionne pas d'impact sur les résultats dans le cadre de ce projet ;
- Les **valeurs invalides** se rapportent à la nomination des *route_short_name* et *route_long_name* du fichier *routes.txt*. La combinaison de ces deux champs devrait être unique pour chaque ensemble de données, ce qui n'est pas le cas pour la STO. Cette duplication pourrait influencer les valeurs de la caractérisation globale du service au niveau des lignes ;
- Les **autres problèmes** indiquent dans ce cas-ci l'existence de plusieurs voyages ne comportant aucun passage aux arrêts (*stop_times*). L'impact est limité sur les résultats, mais cela pourrait influencer la comparaison du nombre de voyages offerts ;

- Certaines agences de transport positionnent les arrêts d'un terminus au centre de ce terminus ce qui généralement cause l'apparition de l'avertissement des **arrêts trop rapprochés**. La duplication de lieux ne devrait toutefois pas influencer les résultats ;
- Certaines **vitesses** de 112 km/h jugées **trop rapides** par l'application ont été observées dans les données GTFS après Rapibus. Une limite réaliste de 100 km/h est posée par le logiciel de vérification pour les vitesses atteintes par un autobus. Si elles s'avéraient fausses, elles pourraient influencer l'analyse des vitesses commerciales ;
- **Trop d'arrêts consécutifs avec le même temps de passage** sont observés pour les deux ensembles de données. Il est pratique courante pour certaines agences de spécifier un même temps de passage pour plusieurs arrêts en présence d'un petit réseau, mais trop de temps identiques 1) peuvent influencer les résultats obtenus des calculateurs de chemin et 2) pourraient indiquer une erreur dans l'exportation de données.

Outre les erreurs mises de l'avant par le *FeedValidator*, on observe que les ensembles de données ne respectent pas les principes de la norme GTFS. Sans être invalides, les fichiers proposés n'encodent pas les informations de façon correcte. De nombreux services sont définis pour une période de temps donnée (souvent une semaine complète), puis les exceptions font en sorte que ce service n'est finalement disponible que pour une seule journée. Le Tableau 4.2 illustre un exemple d'une telle codification.

Tableau 4.2 : Codification d'un service proposé par la STO

Champ	Valeur
service_id	_13AUT-H01S123S-Semaine-96
start_date	2013-09-30
end_date	2013-10-07
monday	1
tuesday	1
wednesday	1
thursday	1
friday	1
saturday	0
sunday	0
removed_on_date	2013-10-01, 2013-10-02, 2013-10-03, 2013-10-04

L'ensemble de données pourrait certainement être condensé pour mieux représenter la réalité du service offert par la STO. La STO codifie les services du fichier *calendar.txt* pour être opérationnels uniquement du lundi au vendredi entre deux dates pouvant couvrir une semaine complète ou plus. Le fichier *calendar_dates.txt* qui contient les exceptions se voit attribuer des exceptions pour tous les samedis et dimanches entre ces dates, alors qu'il n'aurait pas été nécessaire de le faire (le service n'étant actif que la semaine). Ces problèmes de codification ne posent pas de problème au niveau des résultats, mais alourdissent l'interprétation des données brutes.

Chaque ligne d'autobus devrait aussi apparaître une seule fois dans le fichier *route* et la direction devrait être définie dans le fichier *trips* ce qui n'est pas le cas. Ceci décuple les informations et rend plus ardue l'analyse des données.

Finalement, la version obtenue des fichiers GTFS comporte un fichier texte additionnel indiquant la présence de plusieurs erreurs lors de l'extraction des données.

Avertissement :

Parcours type ligne XX, numéro XX a au moins un itinéraire manquant.

Les fichiers générés peuvent être invalides.

Les fichiers avant Rapibus comporte treize (13) erreurs de ce type, alors que l'ensemble de données de l'été 2014 était le dernier à contenir un tel rapport d'erreurs. Il est impossible de vérifier la

source de cette erreur, ni ses possibles impacts sur les résultats, puisque les données brutes ne sont pas disponibles.

4.1.2 Cartes à puce

L'analyse des données de cartes à puce est un complément aux objectifs initialement définis. En conséquence, l'exploration de ces données (incluant la validation) est certainement incomplète et devrait être plus largement développée.

Les aspects qui à première vue pourraient influencer le calcul des indicateurs ont été répertoriés dans le Tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Exploration et validation des données de cartes à puce

	AVANT RAPIBUS	APRÈS RAPIBUS
DESCRIPTION		
Transactions	1 795 230	2 204 644
Transactions/jour	32 058	39 367
Lignes	143	127
Parcours	603	629
Arrêts	1 845	1 822
Période	26 août au 20 octobre 2013	26 août au 20 octobre 2014
ERREURS		
Arrêts inexistants	138 422 (7,7 %)	99 278 (4,5 %)
Lignes inexistantes	132 410 (7,4 %)	129 619 (5,9 %)
Arrêts et lignes inexistants	28 754 (1,6 %)	32 703 (1,5 %)

Les résultats montrent une nette discordance entre les données GTFS et celles obtenues par les transactions de cartes à puce au niveau du nombre de lignes et de parcours. Le nombre d'arrêts est similaire et la différence pourrait être due aux duplications d'arrêts qui ne semblent pas être présentes dans les données de cartes à puce.

Aussi, plusieurs des lignes enregistrées dans les transactions n'ont aucune correspondance dans les lignes proposées dans le service des fichiers GTFS. Cette observation peut aussi être faite pour les arrêts d'autobus. Ces mauvaises codifications, ajoutées aux erreurs d'attribution des lignes, des

arrêts et des heures de passage du système de perception influenceront certainement les résultats lors des calculs des indicateurs liés à la demande.

Aussi, les informations contenues dans les données de cartes à puce ne sont pas codifiées de la même façon que celles des fichiers GTFS. On pourrait s'attendre à ce que les *shortname* des fichiers GTFS correspondent au numéro de ligne des transactions, ce qui n'est pas toujours le cas, notamment en présence de services express. Aussi, les parcours des transactions de cartes à puce ne correspondent pas aux identifiants des routes présents dans les fichiers GTFS qui sont une combinaison du numéro de ligne et d'un nombre d'une source inconnue.

4.2 Importation des données

Les données utilisées dans le cadre de cette recherche proviennent principalement de sources normalisées et employées en production, ce qui réduit considérablement les traitements nécessaires avant leur importation. Comme aucune erreur majeure n'a été décelée lors de la validation des données, celles-ci peuvent être importées directement dans les outils sélectionnés et leur analyse pourra être plus approfondie dans les étapes subséquentes du projet.

L'intégralité des données a d'abord été importée dans une base de données relationnelle PostgreSQL. Le support d'objet géographique est assuré par l'extension PostGIS qui facilite les analyses spatiales en ajoutant des fonctions SIG aux fonctions déjà présentes dans la version source de PostgreSQL. Les données de cartes à puce étant fondamentalement des données tabulaires, elles sont importées directement dans une table où chaque enregistrement représente une transaction (ou une entrée) sur le réseau. L'enquête Origine-Destination est importée de façon similaire, sans aucun traitement additionnel. Les données GTFS profitent d'un traitement préalable afin d'optimiser leur utilisation future par l'entremise de l'application *Transcasapp*.

L'application *Transcasapp* est un projet actuellement en développement au sein de la Chaire Mobilité de Polytechnique Montréal sous la responsabilité de Pierre-Léo Bourbonnais, chargé du développement (Bourbonnais, 2015). L'application se veut un outil de gestion d'un réseau TC, prenant en charge de façon précise les arrêts, les stations, les lignes, les parcours, les voyages et les horaires. L'ensemble de ces fonctions assure une intégration complète avec le format GTFS. À terme, il favorisera aussi l'intégration d'indicateurs de performance et de qualité de service, comme

ceux développés dans le cadre du présent projet de recherche. Plusieurs autres modules pourraient aussi voir le jour, en fonction des besoins de l'industrie.

L'application importe les données GTFS de façon automatique et complète les champs disponibles par le format, notamment en dénormalisant et provoquant une redondance d'une partie de l'information :

- Normalisation des identifiants uniques en provenance de sources diverses pour assurer une compatibilité (les informations initiales sont aussi conservées en tant que référence pour les agences);
- Ajout de la notion de *route path* pour mieux gérer l'existence de différents parcours pour une même ligne d'autobus;
- Ajout d'objets géographiques (arrêts et parcours d'autobus) liés à l'extension postGIS;
- Création d'une table virtuelle joignant l'ensemble des informations liées à un *stop time* (notamment au niveau des lignes et des parcours) pour faciliter les requêtes.

Finalement, *Transcasapp* offre un environnement développé en *Ruby On Rails* qui implémente la notion d'objets en langage de programmation pour les éléments présents dans la norme GTFS. Cette implémentation définit clairement les rôles et les liens qui unissent les différentes données en plus de faciliter les requêtes et l'exécution de tâches pour analyser des données présentes dans les tables PostgreSQL.

Lors de l'importation des données, certains problèmes ont été causés par l'importation du fichier *stops.txt*. La plupart des erreurs étaient provoquées par l'ajout par la STO de champs facultatifs laissés vides (*stop_code*, *stop_desc*, *zone_id* et *stop_url*). Ces champs ont simplement été retirés avant l'importation. Aussi, les coordonnées de latitude/longitude comportaient des espaces avant la valeur recherchée, causant aussi une erreur d'importation. Ces espaces ont été retirés avant l'importation.

4.3 Identification des objets d'analyse

Plusieurs points de vue peuvent être portés sur un réseau TC lorsque vient le temps de le caractériser. Que l'on regarde la situation de la perspective d'un planificateur, d'un opérateur ou encore d'un utilisateur, les aspects, mesures et indicateurs rapportant les préoccupations de chacun varient. Les outils de visualisation sont souvent différents lors de l'analyse en fonction de la perspective. Cependant, plusieurs éléments sont communs dans toute analyse et un cadre commun peut aider à structurer pour peu que les objets d'analyse soient bien identifiés.

Les objets d'analyse représentent chacun des éléments mis en relation dans le système global qui sont visés par les préoccupations des intervenants. Dans le cas de la caractérisation de l'offre de service, nous faisons face principalement à la combinaison des préoccupations des planificateurs et des utilisateurs. Ainsi, les objets visés, comme révélés dans la revue de littérature, sont les **arrêts**, les **lignes** et le **réseau** comme un tout.

Les arrêts d'autobus sont les objets ayant le niveau de résolution le plus fin parmi les éléments du système. Ils sont aussi le point d'accès rapproché des utilisateurs. L'étude des arrêts permet donc de concentrer l'analyse sur les besoins des utilisateurs et sur le service qui leur est offert près de leur lieu de domicile. En reculant d'un niveau de résolution, nous nous retrouvons à étudier l'objet ligne qui vient connecter les différents arrêts. L'analyse des lignes permet donc d'étudier le mouvement entre les différents arrêts. Finalement, le tout forme le réseau, qui permet une analyse globale de l'offre de service d'une région.

4.4 Développement des indicateurs

Le processus de développement des indicateurs a d'abord été orienté vers la caractérisation d'un unique réseau. L'objectif premier de cette caractérisation est de reprendre les mesures d'analyse pour chaque objet identifié à l'étape précédente et de trouver si la littérature propose déjà des indicateurs pouvant les quantifier. En l'absence de tels indicateurs ou lorsque les limitations des indicateurs disponibles restreignent la portée des analyses, une nouvelle approche a été utilisée combinant l'accessibilité avec la fréquence de service et les destinations atteignables. La combinaison de ces trois aspects est notamment rendue possible par le calcul du chemin le plus court entre chaque paire d'arrêts pour tous les départs planifiés au service. En plus des indicateurs de performance classiques, les indicateurs suivants sont présentés ultérieurement :

- Connectivité des arrêts
- Opportunités de déplacement
- Accessibilité réelle
- Écart entre l'offre et la demande
- Temps de parcours

À ce stade, les indicateurs développés visent la caractérisation d'un seul réseau, mais ne peuvent comparer efficacement les différences apportées par la modification de l'offre de service. En effet, les objets constituant le réseau (arrêts et lignes) peuvent changer avec l'instauration de la nouvelle offre de service, modifiant du même coup le référentiel à partir duquel les indicateurs sont calculés.

Pour pallier cette problématique, les indicateurs ont été généralisés pour tenir compte d'un même référentiel. Comme les arrêts représentent les objets à la plus petite échelle sur le réseau, une grille a été choisie comme référentiel de comparaison, permettant de garder un niveau de résolution pratiquement aussi fin que les arrêts eux-mêmes.

Différents tests de maillages ont été conduits. Premièrement, plusieurs grilles avec des maillages de 25 à 500 m ont été générées pour couvrir l'ensemble du territoire de la ville de Gatineau et une partie de la ville d'Ottawa. Deuxièmement, plusieurs zones tampons allant de 5 à 25 m ont été appliquées au réseau routier afin de représenter l'emprise des routes. Finalement, plusieurs combinaisons de ces différentes grilles et zones tampons ont été testées afin d'obtenir un niveau d'analyse assez fin et relativement proche de l'arrêt lui-même, tout en conservant un nombre de cases relativement peu élevé.

Au final, un maillage de 100 m x 100 m a été sélectionné pour la grille. Finalement, pour ne garder que les éléments pertinents à l'analyse, seules les cases touchant le réseau routier agrémenté d'une zone tampon de 25m ont été conservées. La zone tampon permet de saisir les arrêts d'autobus situés en bordure des rues et généralement géolocalisés de part et d'autre de la ligne de centre des rues. Cette grille finale devrait pouvoir fournir un référentiel stable, variant peu dans le temps. La grille pourrait toutefois être menée à changer dans le cas d'un ajout d'un lien routier, en y ajoutant de façon similaire de nouvelles cases. Dans une telle situation, la grille initiale fera office de point de référence pour comparer le réseau sur la base d'un même territoire. La grille finale utilisée dans l'étude de cas est présentée à la Figure 4.2.

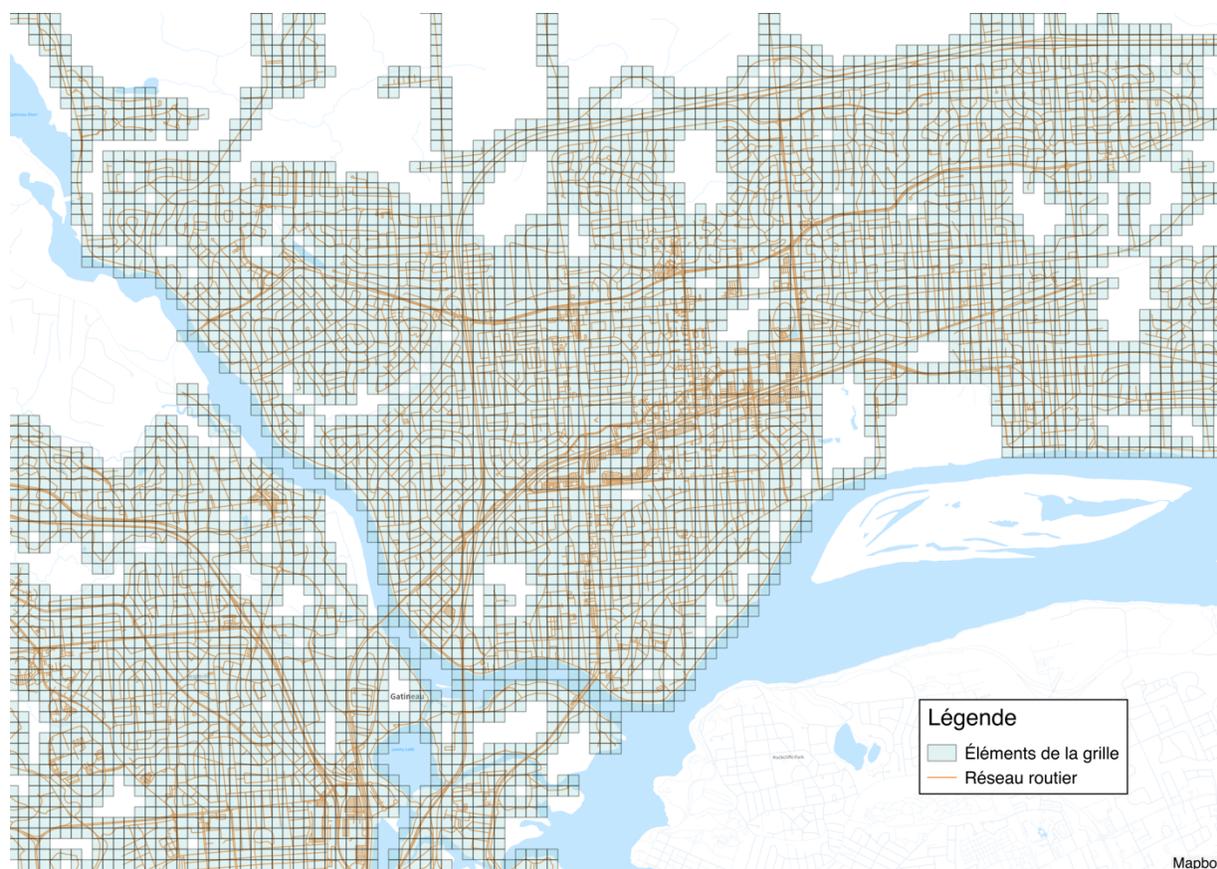


Figure 4.2 : Grille référentielle pour le calcul des indicateurs

Finalement, une fois les indicateurs définis et calculés, plusieurs visualisations ont été conçues et perfectionnées au fil du projet afin de faciliter la compréhension des différents concepts abordés. La méthodologie employée pour calculer les indicateurs sélectionnés est détaillée au Chapitre 5.

4.5 Automatisation

L'automatisation des calculs a nécessité deux hypothèses initiales. L'analyse de chaque ensemble de données GTFS (avant et après Rapibus) est faite à partir d'une seule journée comparable (un lundi d'octobre dans le cas présent). Aussi, un territoire défini a été imposé afin d'établir la grille référentielle. Si aucun outil ne permet actuellement d'appuyer sur un bouton pour obtenir l'ensemble des résultats, de nombreuses portions de code ont été écrites dans une optique d'intégration à des outils en cours de développement au sein de la Chaire Mobilité. Ainsi, les efforts nécessaires à la reproduction des résultats ou à leur application dans le cadre de l'étude d'un réseau complètement différent seraient relativement faibles.

CHAPITRE 5 DÉVELOPPEMENT DES INDICATEURS

Dans ce chapitre, l'emphase est dirigée sur quatre indicateurs. Leur développement s'appuie sur les constats et les limitations des méthodes actuelles rapportés lors de la revue de littérature.

Les deux premiers concepts (les opportunités et l'accessibilité réelle) apportent un nouveau regard sur les indicateurs actuellement rencontrés dans la littérature en y ajoutant de nouvelles dimensions. Les deux suivants reprennent des éléments déjà mentionnés dans la littérature (la directitude et la vulnérabilité des utilisateurs), mais traitent de la notion de compétitivité du TC qui demeure un aspect difficile à quantifier et demeure encore trop peu discuté. Ces derniers indicateurs représentent à eux seuls deux enjeux importants du point de vue des utilisateurs lorsque vient le choix d'un mode de déplacement. Leur implantation dans un cadre d'analyse systématique en devient d'autant plus importante.

5.1 Opportunités

L'opportunité est un concept racine permettant la mesure de plusieurs indicateurs plus classiques et qui permet aussi de prendre en considération la fréquence de passage et les destinations accessibles pour développer de nouveaux indicateurs. Cette notion est flexible et peut donc être présentée sous diverses formes. La section 5.1.1 définit ce qu'est une opportunité, alors que la section 5.1.2 rapporte les indicateurs dérivés de la notion d'opportunité.

5.1.1 La notion d'opportunité

Pour établir les opportunités de déplacement offertes par un réseau de transport en commun, nous calculons pour chaque départ à un arrêt le chemin le plus court vers l'ensemble des autres arrêts du réseau. On considère comme une **opportunité** le chemin le plus court entre deux arrêts pour un départ donné s'il peut s'effectuer en moins de deux heures. Un même départ peut donc générer plusieurs **opportunités** vers différentes destinations.

Les trajets sont identifiés à partir du calculateur de chemin en TC développé par la Chaire Mobilité. Basé sur l'algorithme CSA (Route Selection Algorithm) (Dibbelt, Pajor, Strasser et Wagner, 2013), le calculateur prend en compte toutes les connexions possibles à partir d'un arrêt. À partir d'un arrêt de départ défini, l'algorithme calcule un trajet vers l'ensemble des autres arrêts du réseau en

fonction des paramètres de départ (position, heure de départ et temps d'attente minimal pour une correspondance).

Lorsque plusieurs lignes d'autobus sont disponibles à un même arrêt, il est impossible d'imposer l'utilisation d'une d'entre elles. Si plusieurs départs simultanés sont faits à un même arrêt (comme dans l'exemple d'un terminal), le calculateur proposera pour chacun de ces départs les mêmes opportunités. Comme ces opportunités ne représentent pas une offre de service supplémentaire pour l'utilisateur, seuls les résultats de la première itération sont conservés pour des fins d'analyse. La Figure 5.1 illustre ce concept par un exemple.

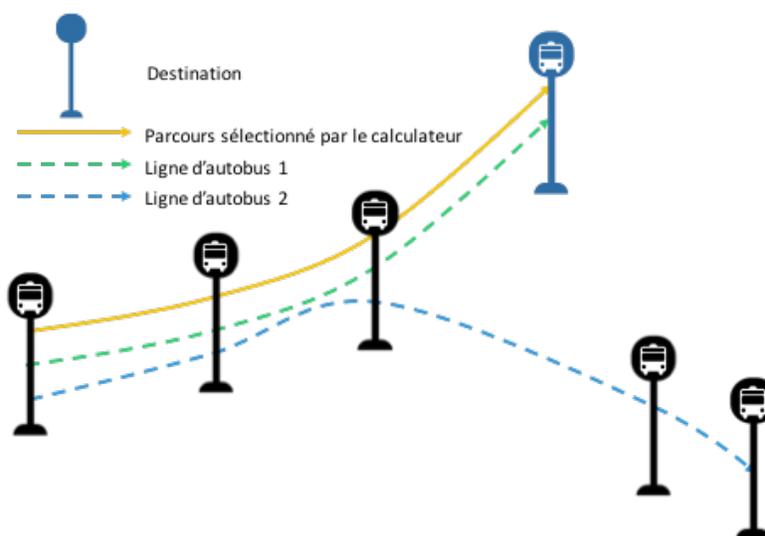


Figure 5.1 : Sélection d'un trajet par le calculateur de chemin

Pour cet exemple, deux lignes d'autobus quittent le premier arrêt simultanément. Elles partagent quelques arrêts, avant que leur parcours diverge. Le calculateur doit calculer le chemin le plus court vers l'arrêt de destination.

Deux départs sont disponibles et l'algorithme tentera de calculer le trajet vers la destination pour chacun d'eux. Comme on ne peut lui imposer le choix de ligne, les deux départs sélectionneront la ligne d'autobus 1 pour se rendre à la destination, alors que le départ de la ligne d'autobus 2 n'aurait pas permis de s'y rendre. Cette opportunité de déplacement de ces deux départs simultanés est donc faussement doublée. La deuxième itération serait donc retirée des analyses.

Pour faciliter les analyses, le temps de parcours, le nombre de correspondances et le temps d'attente sont explicitement enregistrés pour chaque opportunité. La Figure 5.2 illustre un exemple simplifié de la notion d'opportunité.

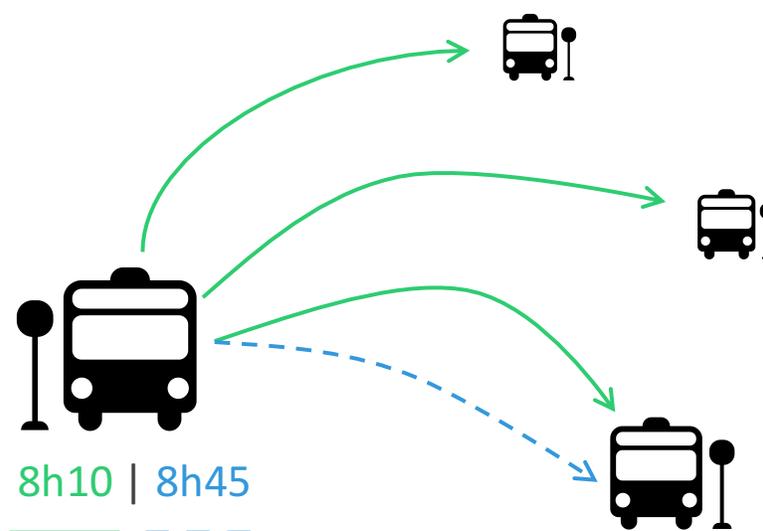


Figure 5.2 : Représentation graphique de la notion d'opportunité

Pour cet exemple, deux départs sont offerts à cet arrêt : 8h10 et 8h45. Une fois lancé, le calculateur de chemin trouve au moins un trajet possible en TC pour rejoindre les trois autres arrêts du réseau ; pour le départ de 8h45 au moins un trajet a été trouvé pour rejoindre, cette fois-ci, un seul des arrêts du réseau. Le chemin le plus court trouvé entre l'arrêt d'origine et l'arrêt de destination pour chaque départ est retenu comme une opportunité, pour un total de quatre opportunités relevées dans cet exemple pour une période de temps donnée.

5.1.2 Indicateurs dérivés des opportunités

Les opportunités calculées permettent de dériver plusieurs indicateurs intéressants. Quatre principaux indicateurs sont présentés dans le cadre de ce projet, en plus des déclinaisons et des analyses complémentaires qui y sont associées.

Connectivité des arrêts

La connectivité d'un réseau est un aspect important de son analyse. Elle fait appel aux notions de base de la théorie des graphes. Pour un réseau fixe dans le temps (ex. : réseau routier), elle représente les différents nœuds (ex : secteurs, destinations) accessibles par les différents liens du réseau (ex : routes). Plus la connectivité est grande, plus il est facile de se déplacer sur un réseau. Dans le cas du TC, bien que les véhicules circulent généralement sur le même réseau routier, il faut aussi considérer la notion de temps à la connectivité en raison des différents voyages effectués par les autobus suivant un horaire prédéfini.

Dans ce contexte, nous considérons une connexion entre deux arrêts s'il existe au moins un trajet en TC de moins de deux heures entre ces deux arrêts pour une heure donnée. L'indicateur est présenté sous la forme d'un graphe montrant la connectivité sous la forme de paires d'arrêts connectées en fonction de l'heure. Le nombre de correspondances pour les différentes connexions est aussi considéré.

Opportunités

L'opportunité elle-même fait partie des objets d'analyse d'un réseau de TC. Les opportunités sont rapportées à leur arrêt d'origine, ce qui permet de les quantifier en nombre absolu ou en pourcentage d'opportunités pour une certaine période de temps. Elle permet de classer en termes d'importance les différents points d'accès du réseau (les arrêts) en fonction de la fréquence de service, mais aussi des différentes destinations accessibles.

Dans les résultats, les opportunités sont présentées sous deux formes. Premièrement, sous la forme de cartes, permettant de mieux situer dans l'espace l'offre de TC. Comme les opportunités varient non seulement dans l'espace, mais aussi dans le temps, les cartes sont subdivisées en fonctions des heures de pointe et hors pointe. Ensuite, une distribution fréquentielle du nombre d'opportunités en fonction de l'heure de la journée est aussi intéressante pour l'analyse puisqu'elle prend en considération le nombre de correspondances pour chacune des opportunités.

Opportunités-personnes

Dans un but de comparaison et de simplification du problème, nous avons rapporté la notion d'opportunité à un seul nombre : les opportunités-personnes. L'accessibilité physique des personnes aux arrêts est ajoutée. En combinant les données de l'enquête Origine-Destination 2005, nous calculons le nombre d'individus présents dans un rayon de 500m autour des arrêts et nous le multiplions par le nombre d'opportunités offertes à cet arrêt.

Temps de parcours

Les temps de parcours sont étudiés sous deux angles complémentaires. Pour chaque opportunité, le temps de parcours, incluant les temps d'attente, est relevé, puis placé dans une distribution fréquentielle du temps de parcours entre deux arrêts en fonction de l'heure de l'opportunité.

5.1.3 Généralisation des indicateurs dérivés

La comparaison de deux réseaux doit être faite sur la base d'un même référentiel. Cette base comparative n'est toutefois pas rencontrée lorsque les opportunités sont rapportées aux arrêts. Comme des arrêts peuvent être retirés, déplacés ou ajoutés, le référentiel peut varier dans le temps, rendant toute comparaison invalide.

Pour pallier cette problématique, une grille de référence couvrant l'ensemble du territoire a été mise en place. Pour limiter le nombre de cases, une zone tampon de 25 mètres a été appliquée au réseau routier et seules les cases touchant à cette zone tampon sont conservées. Comme le réseau routier demeure relativement stable dans le temps, il demeure un point de référence intéressant. Dans le cas de l'ajout de liens routiers, une grille antérieure permettrait toujours d'obtenir une référence stable.

Après plusieurs tests, des cases de 100m x 100m ont été choisies, permettant de conserver une précision proche de celle offerte par les arrêts, tout en limitant le nombre de cases. La grille de référence finale est telle que présentée à la Figure 4.2 du chapitre précédent.

Tests statistiques

Pour confirmer un changement entre deux distributions fréquentielles nous avons procédé à une analyse statistique.

Lorsque les distributions semblaient visuellement suivre une loi normale, un test d'adéquation à la loi normale (χ^2) a été effectué. Comme aucune ne suivait cette loi, le test non paramétrique Kolmogorov-Smirnov a été effectué sur les distributions pour vérifier qu'elles sont bien statistiquement différentes.

Dans tous les cas, nous avons aussi calculé les moyennes, les médianes, les écarts-types, les quartiles, l'étalement et l'affaissement des distributions fréquentielles afin de se donner un aperçu des changements apportés par la modification du service.

5.1.4 Limitations et perspectives de la méthodologie

L'utilisation des opportunités dans l'analyse d'un réseau apporte quelques limitations quant à sa méthodologie.

D'abord, la notion même d'une opportunité peut être un concept abstrait. Sa compréhension demande une certaine réflexion, mais elle demeure un indicateur relativement simple qui permet de combiner plusieurs dimensions et de présenter l'information sous plusieurs formes. Rapporter l'ensemble des opportunités en termes d'opportunités-personnes permet de clarifier la notion et les différences dans l'offre de service suite à une modification.

Puis, les temps de calcul nécessaires afin de calculer l'ensemble des opportunités sont longs, même pour un réseau de taille moyenne comme celui de la STO. À titre d'exemple, le temps de calcul des opportunités sur le réseau avant Rapibus avoisinait six jours pour environ 168 millions de calcul de chemin sur un MacBook Pro équipé d'un processeur Intel Core i7 (2,5 GHz) et de 16 Go de mémoire vive. Une nouvelle version du calculateur de chemin de la Chaire Mobilité est actuellement en développement et devrait pouvoir ramener ces temps de calcul à un ordre de grandeur plus modeste.

Aussi, ce calculateur n'impose pas d'embarquer dans un certain véhicule pour une heure donnée. Son objectif est de trouver le chemin le plus court entre deux destinations, il pourrait donc imposer une certaine attente et calculer à partir d'un départ subséquent ou à un arrêt adjacent. La méthodologie expérimentale présentée au Chapitre 7 pourrait accommoder cette limitation, mais augmenterait largement les temps de calcul dans sa version actuelle.

Les opportunités calculées ici représentent des opportunités de départ aux arrêts, en imposant une heure de départ. Pour une analyse complète et probablement plus proche de la demande, les opportunités d'arrivée devraient être calculées. Pour ce faire, il faudrait utiliser les temps d'arrivée aux arrêts et trouver quels points de départ du réseau permettent de s'y rendre dans un délai de deux heures. Le calculateur actuel ne permet pas un tel calcul, mais la version en développement devrait permettre ce type de calcul.

5.2 Accessibilité réelle

Les mesures d'accessibilité relèvent principalement de la proportion de la population ayant un accès physique au TC par l'entremise d'un arrêt ou d'une station à proximité du lieu de son domicile. La notion d'opportunité permet déjà de considérer l'accessibilité temporelle, fréquentielle en lien avec le passage des autobus en plus de considérer les destinations atteignables. Toutefois, rien ne garantit que cette opportunité puisse être réalisée si un véhicule est bondé.

L'accessibilité à certaines lignes pourrait donc être limitée par un écart entre l'offre et la demande. On parlera donc d'un certain écart entre l'accessibilité et la capacité réelle d'une ligne de transport collectif.

Pour évaluer cette capacité réelle et par la même occasion, le niveau d'accessibilité du réseau, une méthodologie simple a été employée. Les données transactionnelles des cartes à puce ont été traitées par un algorithme de détermination de destination développé par Giraud (2016) initialement conçu pour traiter les données du RTL. L'algorithme calcule et retourne l'arrêt probable de destination de la carte. Pour assurer de meilleurs résultats, l'algorithme doit pouvoir construire un historique des transactions associées à une même carte. L'ensemble des transactions effectuées sur la période de couverture des ensembles de données GTFS (voir section 4.1.1) ont été mises en entrée de l'algorithme.

En couplant l'origine et la destination, nous pouvons reconstituer le profil de charge horaire des lignes d'autobus. Finalement, pour chaque segment entre deux arrêts, nous pouvons aussi calculer la capacité horaire des lignes en fonction du nombre de passages à chaque arrêt. Les autobus *Novabus* ont une capacité maximale de 80 personnes (Novabus, 2010), ce qui permet de finalement calculer le niveau d'utilisation de chaque segment inter-arrêt du réseau de TC. Les segments ayant un taux d'utilisation supérieur à 85% (fixé arbitrairement pour des fins de calcul) sont considérés critiques et la population incluse dans un rayon de 500m du point d'accès est identifiée comme *n'ayant pas accès*.

5.2.1 Limitations et perspectives

Les résultats provenant de l'algorithme OD à partir des cartes à puce ne sont pas encore fiables en ce qui a trait aux transactions de la STO. Déjà, en se référant à la section 4.1.2, nous identifions entre 10 et 15% de transactions pour lesquelles la ligne empruntée ou l'arrêt d'origine n'apparaît pas dans les fichiers GTFS. Ceci pourrait empêcher l'algorithme de générer un historique de transactions complet pour une carte. La codification des données GTFS étant différente pour le RTL, il est possible que la reproduction que nous en avons faite ne corresponde pas totalement à la méthode du RTL, notamment au niveau des différents tracés pour une même ligne ou de l'assignation des véhicules, ce qui pourrait induire des erreurs. La méthodologie demeure en conséquence exploratrice.

En outre, les données de CAP reflètent les heures réelles des passages des autobus. Ceci peut causer un décalage avec les données planifiées des GTFS dans l'éventualité où un autobus serait en avance ou en retard sur l'horaire prévu. L'algorithme pourrait prendre en considération l'heure du début du parcours spécifiée dans les données de CAP pour ajuster l'agencement des transactions avec les données GTFS.

En raison des résultats encore non représentatifs, le croisement avec les opportunités n'a pas encore été fait. Il suffirait de recalculer les opportunités-personnes en considérant uniquement les résidents desservis par une ligne de TC non saturée.

5.3 Directitude des trajets

La directitude des trajets fait appel à la compétitivité des différents modes de transport. Lorsque nous évaluons la qualité d'un trajet à pied, en vélo, en voiture ou en transport en commun, nous comparons souvent sa trajectoire avec la distance à vol d'oiseau entre l'origine du déplacement et sa destination ; le rapport entre les deux distances est la définition de la tortuosité (Lina, 1999).

Du point de vue des utilisateurs, la directitude des trajets est influencée par l'apparence d'un tracé. Ainsi, pour une même distance de parcours, si un tracé semble dévier plus qu'un autre d'une ligne de désir directe entre l'origine et la destination d'un déplacement, il sera moins attractif pour l'utilisateur et pourrait influencer son choix modal (Raveau, Muñoz et de Grange, 2011). Ces auteurs ont proposé un indicateur de coût angulaire, prenant en considération la distance parcourue sur chaque segment (ligne d'autobus) d'un trajet en TC pondérée en fonction de l'écart entre la ligne de désir, le point de correspondance et le point de la destination finale. La Figure 5.3 illustre le concept de coût angulaire.

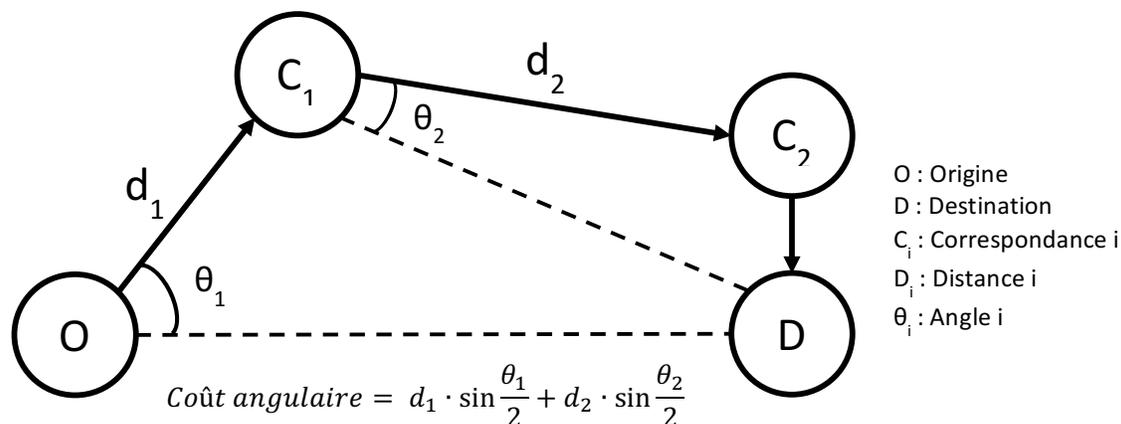


Figure 5.3 : Représentation graphique du coût angulaire (adaptée de Raveau et al., 2011)

Pour cet indicateur, nous souhaitons plutôt rester du point de vue de l'opérateur et se concentrer sur la distance de parcours comme élément de comparaison. Pour évaluer la directitude des trajets de TC, la comparaison est souvent ramenée à la voiture, qui est le mode de transport considéré comme le plus performant sur les réseaux routiers en circulation libre. Pour évaluer la directitude des trajets effectués par les utilisateurs du service de TC, nous avons utilisé les données de l'enquête OD 2005 pour calculer les trajets à vol d'oiseau, puis sur le réseau de TC et enfin sur le réseau routier. La comparaison des ratios nous offre un aperçu des détours subis par les utilisateurs du service, en termes de tortuosité.

5.3.1 Limitations et perspectives

Pour caractériser directement l'offre de service simple plutôt que d'y insérer les données de demande, nous pourrions utiliser les données d'opportunités qui ont été calculées pour les indicateurs précédents. Chaque opportunité est accompagnée d'une origine et d'une destination permettant le calcul de trajets à vol d'oiseau, sur le réseau routier et sur le réseau de TC.

5.4 Vulnérabilité des utilisateurs (face aux alternatives)

L'utilisation du transport en commun peut apporter certaines préoccupations à l'utilisateur quant à sa fiabilité. Si le service d'une ligne du réseau de TC est interrompu en raison d'un accident ou d'une panne par exemple, l'utilisateur peut-il tout de même accéder à sa destination en empruntant une route alternative ?

D'une certaine façon, l'utilisateur peut se trouver vulnérable face à l'offre de transport collectif en fonction de son lieu d'origine (souvent son domicile) et de la destination visée. Pour prendre en considération les alternatives de trajet dans la caractérisation d'un réseau, Frappier (2016) propose une méthodologie pour le calcul d'un indicateur synthèse pour quantifier la qualité et la diversité des alternatives proposées. Afin de générer l'ensemble des alternatives entre une paire OD donnée, il calcule le chemin le plus court entre les deux points pour un temps de départ équivalent à chaque minute d'une heure sélectionnée. Il évalue ensuite individuellement chaque alternative en produisant une série d'indicateurs (ex. : temps d'accès à la marche, temps d'attente, temps en véhicule, nombre de correspondances, coût angulaire, capacité horaire, etc.). Il filtre ensuite les alternatives en fonction de leur indépendance et de leur pertinence. Il classe finalement les alternatives en fonction d'une somme pondérée d'indicateurs avant de calculer l'indicateur global de qualité et de diversité.

Pour représenter la vulnérabilité des utilisateurs face à l'offre de service, les alternatives devraient être calculées pour chaque paire d'arrêts pour chaque minute d'une journée (ou pour une période donnée). Ensuite, la méthodologie du calcul de la qualité des alternatives pourrait être appliquée afin d'obtenir une valeur de qualité pour chaque paire OD du réseau de TC.

Tout comme la mesure de directitude, les valeurs de qualité des alternatives obtenues pour chaque paire OD devraient être pondérées en fonction de la distance entre les arrêts; à vol d'oiseau puisque la distance réseau pourrait varier selon les alternatives.

5.4.1 Limitations et perspectives

En raison de la limitation du temps de calcul du calculateur de trajets, calculer cet indicateur de vulnérabilité reviendrait à procéder à la démonstration de faisabilité de la méthode, déjà effectuée par Frappier (2016). En effet, il faudrait sélectionner un faible échantillon aléatoire de paires OD du réseau, ce qui pourrait limiter la représentativité. En conséquent, le calcul de cet indicateur n'a pas été effectué dans le cadre de cette recherche et est laissé en perspective pour être réalisé lors de la disponibilité de la nouvelle version du calculateur.

CHAPITRE 6 ÉTUDE DE CAS

L'étude de cas porte sur le réseau de la Société de Transport de l'Outaouais qui dessert la grande ville de Gatineau. Sans y assurer un service complet, la STO offrait un service dans les municipalités de Chelsea et Cantley avant la mise en place du réseau de Transcollines, qui est maintenant responsable du service de TC dans ces municipalités.

La ville de Gatineau est située à proximité de la ville d'Ottawa qui représente un pôle d'emplois important de la région. En conséquence, son service en pointe est majoritairement destiné au centre-ville d'Ottawa, où *OC Transpo* prend le relais pour compléter les déplacements au sein de la capitale nationale.

À l'automne 2013 la STO a implanté son nouveau service rapide par bus, nommé pour l'occasion *Rapibus*. Visant à faciliter les déplacements des utilisateurs du TC, le Rapibus compte 12 kilomètres de de corridor exclusif aux autobus et 10 stations desservies par un service à haute fréquence. Le Rapibus offre aussi une desserte plus facile et directe aux principaux pôles d'emplois, d'études et d'activités commerciales (STO, s.d.).

Cette étude de cas vise donc à comparer l'offre de service avant et après l'implantation de ce service et quantifier l'impact selon les différents aspects mentionnés dans la méthodologie. Le service offert à l'automne 2013 et à l'automne 2014 ont été sélectionnés pour représenter l'offre de service avant et après le Rapibus. Pour chacune de ces deux périodes, un lundi d'octobre a été analysé.

Le territoire considéré pour les calculs est constitué de l'ensemble de la ville de Gatineau, avec quelques ajouts comme une portion des municipalités de Chelsea et de Cantley en plus du centre-ville d'Ottawa pour couvrir l'ensemble du réseau de la STO. La Figure 6.1 précise le territoire couvert par l'étude de cas.

Notons que cette étude de cas est réalisée à titre expérimental pour démontrer la faisabilité des méthodes proposées et ne vise pas à mesurer tous les impacts de la mise en place du Rapibus.

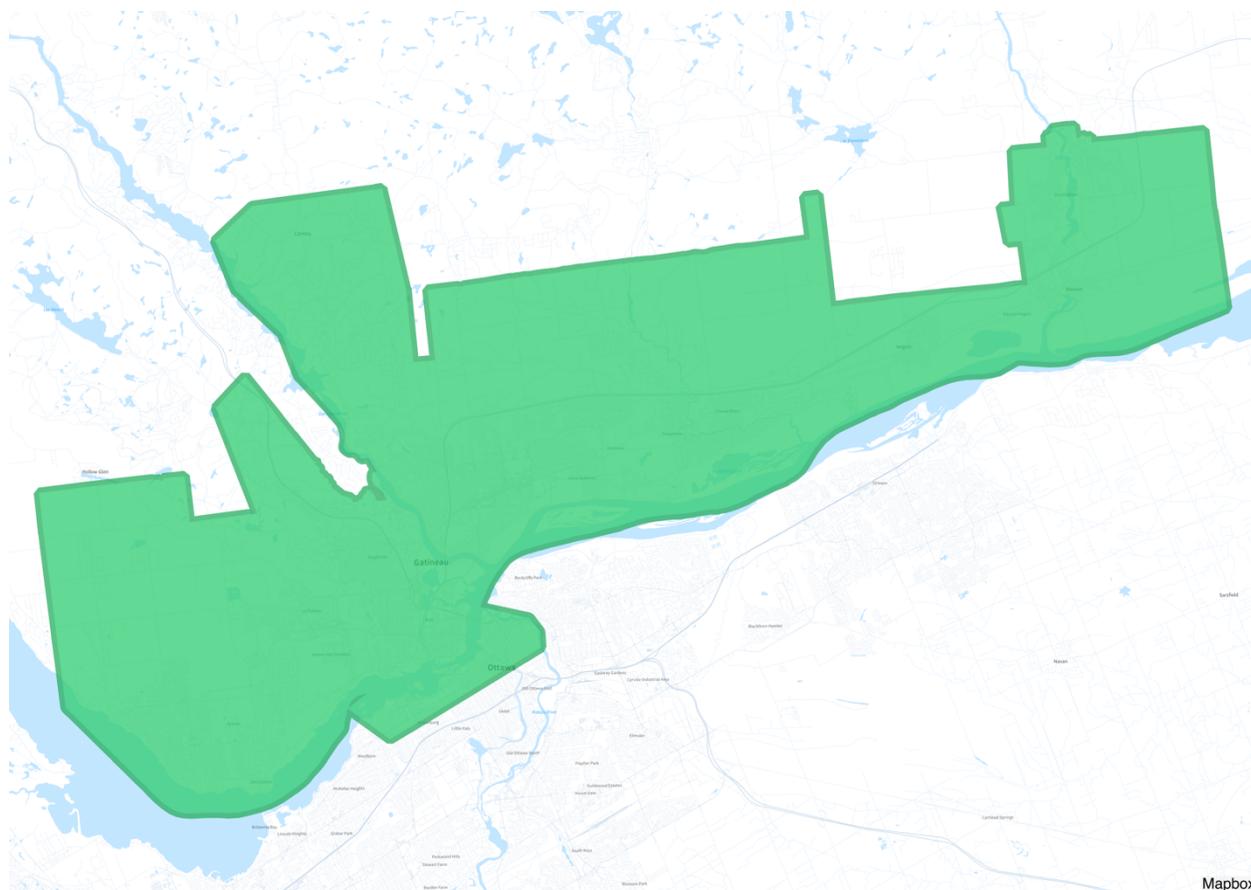


Figure 6.1 : Territoire couvert par l'étude de cas

6.1 Description générale et indicateurs classiques

La Figure 6.2 et la Figure 6.3 représentent les installations de la STO avant et après l'instauration du Rapibus. Elles permettront de mieux situer les points d'interventions et les analyses décrits par la suite. La date de mise en service des Parc-O-Bus étant inconnue, les deux cartes présentent l'ensemble des stationnements incitatifs actuellement présents sur le territoire.

Toute caractérisation d'un réseau de TC doit nécessairement débiter par une description générale de ses composants. Les indicateurs classiques remplissent bien cette fonction. Sans entrer dans la description de la complexité d'un réseau, ils en fournissent une vue d'ensemble. La sélection d'indicateurs listée au Tableau 6.1 constitue donc une introduction à la problématique. Elle propose une étendue de données permettant de décrire le réseau de façon statique et assure une meilleure compréhension des analyses subséquentes menées avec des indicateurs plus complexes.

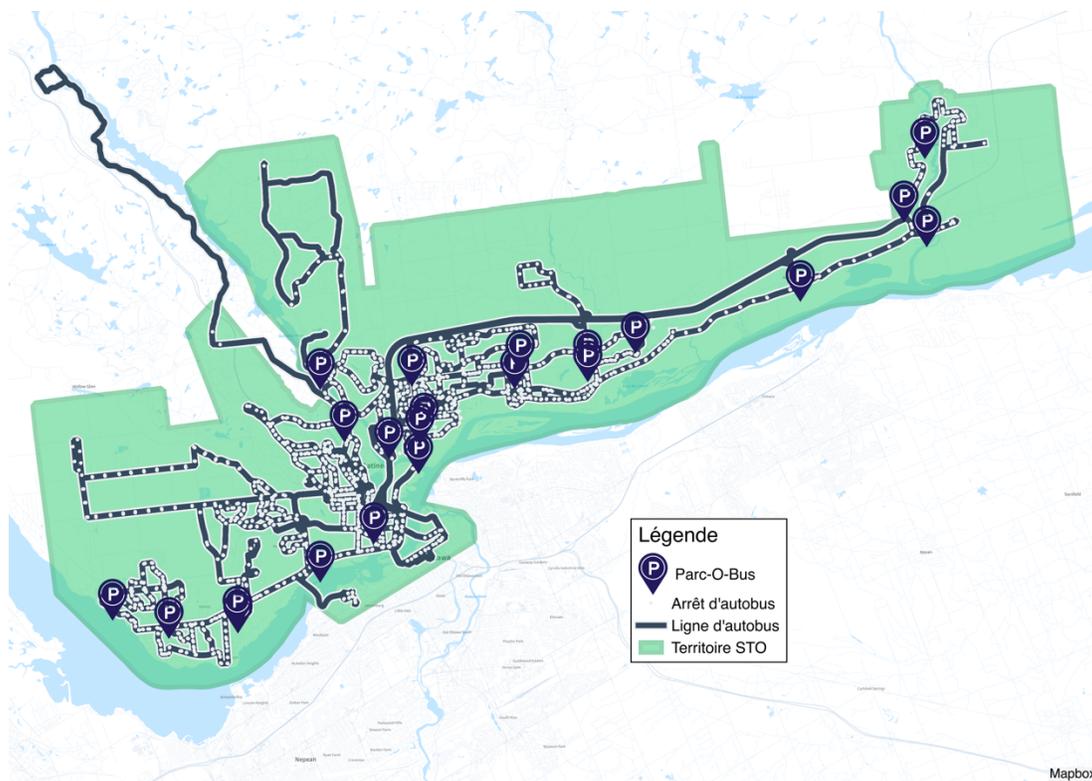


Figure 6.2 : Réseau STO avant Rapibus

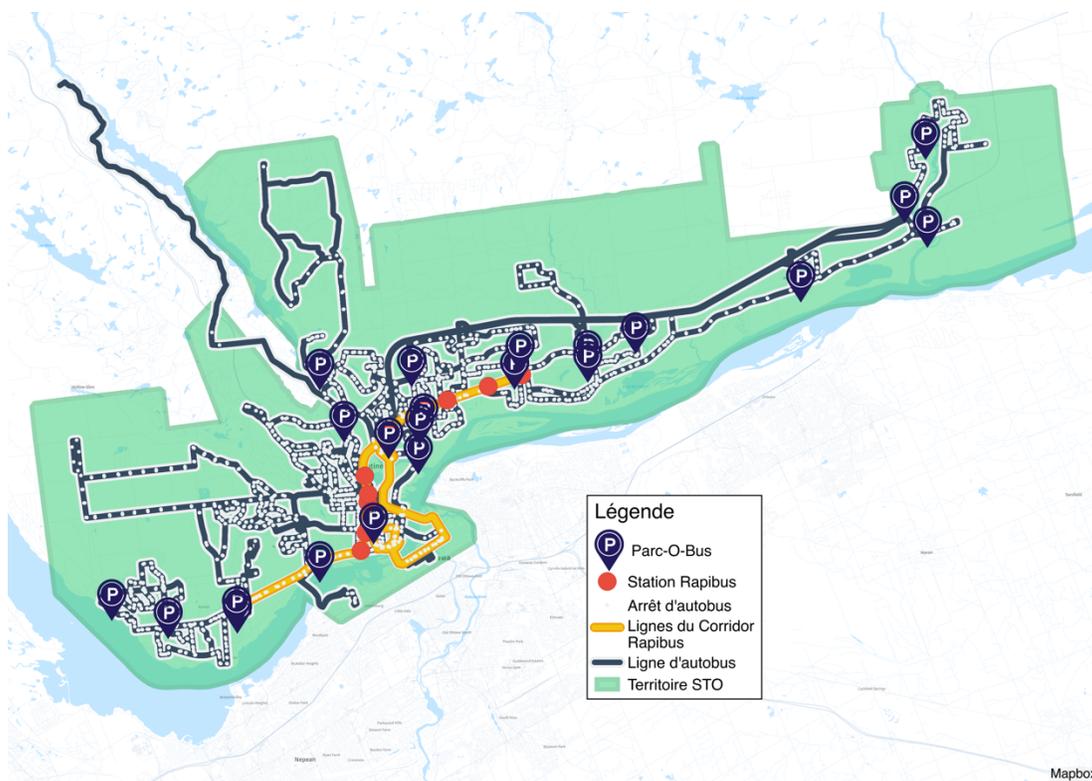


Figure 6.3 : Réseau STO après Rapibus

Tableau 6.1 : Comparaison des indicateurs classiques avant/après Rapibus

	AVANT RAPIBUS	APRÈS RAPIBUS
Nombre d'arrêts	1 994	1 910
Nombre de lignes	73	70
Longueur totale du réseau (km)	622,9	638,8
Nombre d'heures de service	21	21
Véhicules-kilomètres	31 705	36 316
Véhicules-heures	1 262	1 435
Vitesse commerciale moyenne (km/h)	25,1	25,3
Nombre de départs	2 044	2 566
Distance moyenne entre deux arrêts (m)	312	334
Densité des lignes (km/km ²)	1,38	1,41
Couverture des arrêts (rayon de 500 m) (% du territoire)	41,5	42,4
Couverture des arrêts (rayon de 500 m) (% de la population)	87,5	88,2
Couverture du réseau routier (% réseau routier)	23,2	23,8

Les indicateurs classiques mettent donc en évidence certains changements survenus sur le réseau. Sommairement, on note une augmentation modeste des principaux indicateurs suivant l'instauration du service Rapibus. Malgré une diminution du nombre d'arrêts (passant de 1 994 à 1 910), la couverture de la population et territoriale ont chacune augmenté de quelques points (87,5 à 88,2 et 41,5 à 42,4% respectivement), signe que les changements apportés ont probablement affecté les arrêts voisins ou rapprochés. Le nombre de véhicules-kilomètres et véhicules-heures ont aussi augmenté, en lien avec le nombre de départs aussi en hausse (2 044 à 2 566). Ceci est un effet attendu, dû à la haute fréquence du corridor Rapibus. Ces différentes observations devraient se refléter et se confirmer suite à l'analyse des indicateurs évolués présentés aux sous-sections suivantes. On peut s'attendre à une augmentation des opportunités de départ, tels qu'expliquées plus tôt. Si ces opportunités sont de qualité, les temps de parcours devraient être à la baisse et la connectivité du réseau à la hausse.

6.2 Caractérisation d'un réseau

Les premiers indicateurs présentés caractérisent l'état des réseaux de façon indépendante, sans nécessairement offrir de comparabilité entre les différents résultats. Deux sous-sections sont présentées pour caractériser le réseau avant et après Rapibus. Pour chacune de ces sous-sections, les indicateurs de connectivité des arrêts et d'opportunités aux arrêts seront discutés.

6.2.1 Réseau avant Rapibus

Le premier indicateur rapporte le pourcentage de paires d'arrêts connectées pour chaque heure de la journée en fonction du nombre de correspondances nécessaires pour effectuer le chemin le plus court entre les deux arrêts. La Figure 6.4 montre donc la connectivité des arrêts du réseau de la STO avant la mise en place du service Rapibus.

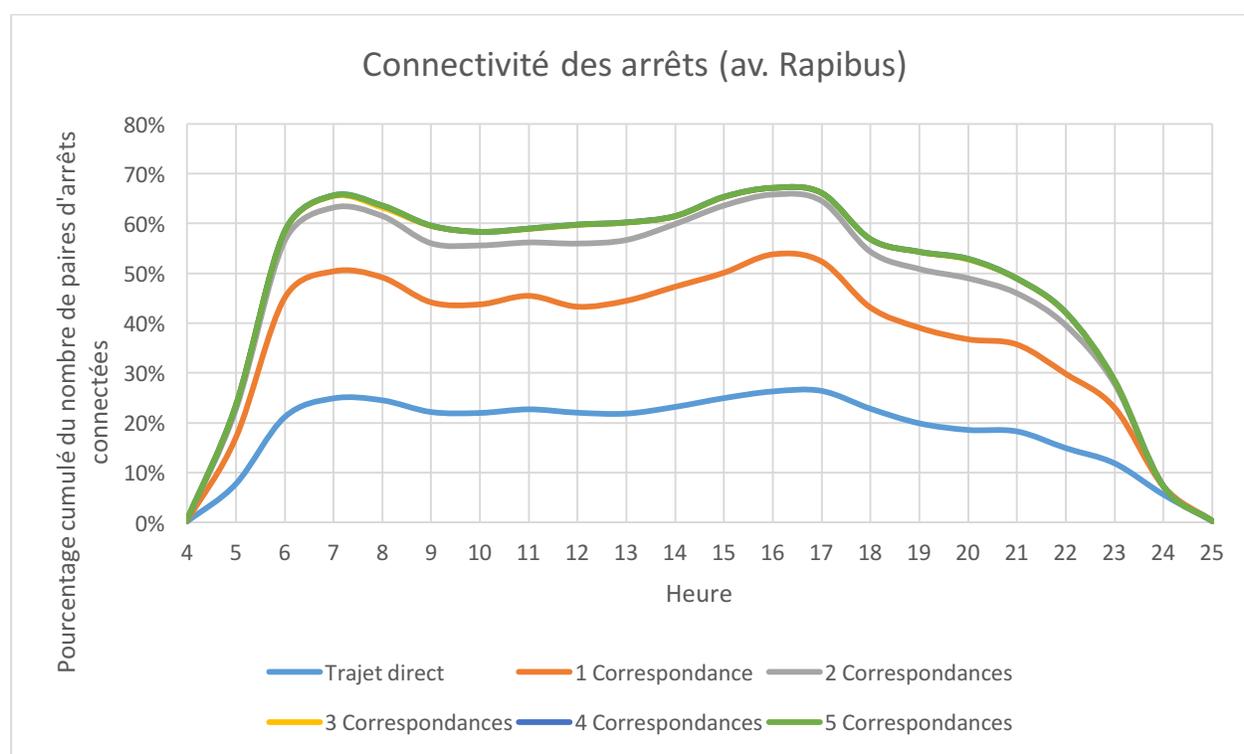


Figure 6.4 : Connectivité des arrêts (av. Rapibus)

Les courbes de connectivité des arrêts tracent le profil typique de la demande de déplacement de la région, où les pointes du matin et de l'après-midi forment un pic au niveau des paires d'arrêts connectées. La connectivité actuelle du réseau fait en sorte que peu de paires sont connectées par un trajet direct et que plusieurs correspondances doivent être considérées afin d'accéder à

l'ensemble des paires d'arrêts connectées. Aussi, les courbes plafonnent sous la barre des 70%, montrant que même en pointe, certaines parties du réseau sont inaccessibles à partir de plusieurs points d'accès. Finalement, dès deux ou trois correspondances, le nombre de paires connectées augmente peu. Les parties connectées du réseau sont donc majoritairement connectées par des trajets de trois correspondances ou moins.

Bien que l'analyse montre qu'une grande partie des paires d'arrêts sont connectées tout au long de la journée, chaque arrêt n'offre pas le même niveau de service. Reprenant la notion d'opportunité présentée précédemment, la Figure 6.5 et la Figure 6.6 présentent la distribution spatiale des opportunités aux arrêts pour la période de pointe du matin et de l'après-midi.

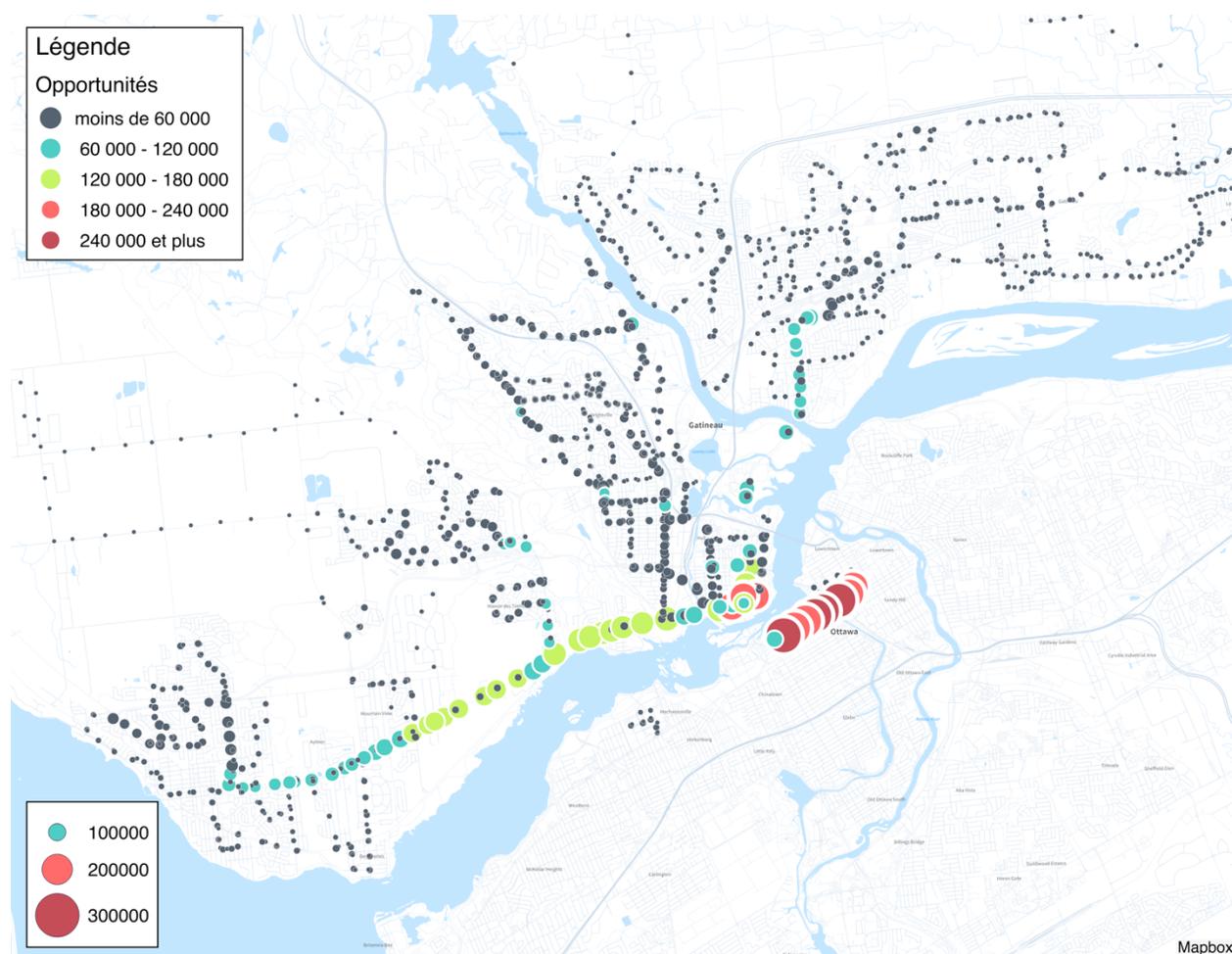


Figure 6.5 : Opportunités aux arrêts (pointe AM) [av. Rapibus]

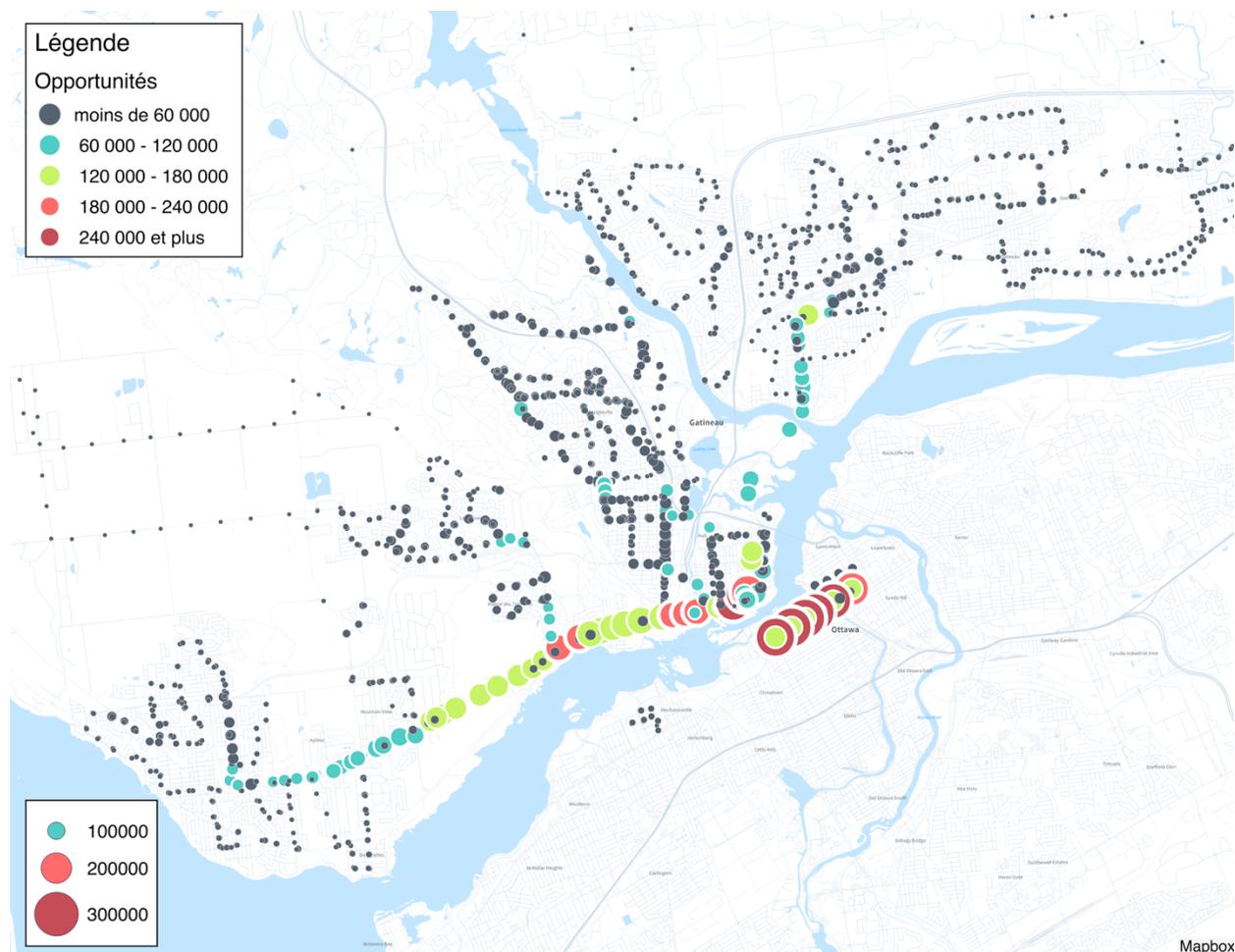


Figure 6.6 : Opportunités aux arrêts (pointe PM) [av. Rapibus]

Peu de différences sont notables sur les deux figures précédentes. Le profil spatial est similaire et pratiquement miroir pour les deux périodes de pointe. Comme le réseau de la STO est un réseau principalement de desserte vers le centre-ville d'Ottawa au matin et inversement en fin de journée, ce phénomène correspond aux attentes. Au final, les opportunités ne font que changer de côté de la rue, en fonction des arrêts actifs à certaines heures de la journée. On remarque tout de même un grand centre d'activité au centre-ville d'Ottawa et un corridor de transport plus important sur l'axe est-ouest de la ville de Gatineau. Découlant d'un concept abstrait, les valeurs obtenues peuvent paraître élevées, mais leur amplitude demeure toutefois plausible.

En effet, le nombre maximal de passages observés à un arrêt pour une heure donnée est de 135. Pour un réseau entièrement connecté, ces passages pourraient générer un maximum de 269 190 opportunités, et ce, pour un unique point d'accès. Considérant toutefois que le réseau n'est pas

entièrement accessible dans un laps de temps maximal de deux heures imposé par définition aux opportunités, les valeurs obtenues se trouvent dans une plage respectant les attentes.

Finalement, la caractérisation du réseau avant Rapibus porte un regard sur l'écart entre l'offre de service et la demande des utilisateurs. Bien que les deux puissent être fortement corrélées, une meilleure offre pouvant entraîner une demande plus forte et vice et versa, il peut exister une certaine divergence entre les points du réseau où l'offre de service est plus importante et où la demande est plus grande.

La Figure 6.7 combine, sous la forme de pourcentage d'opportunités, l'offre de service en grille de fond et les principaux points transactionnels du réseau pour une journée complète. Les données transactionnelles sont celles provenant de l'ensemble de données des CAP.

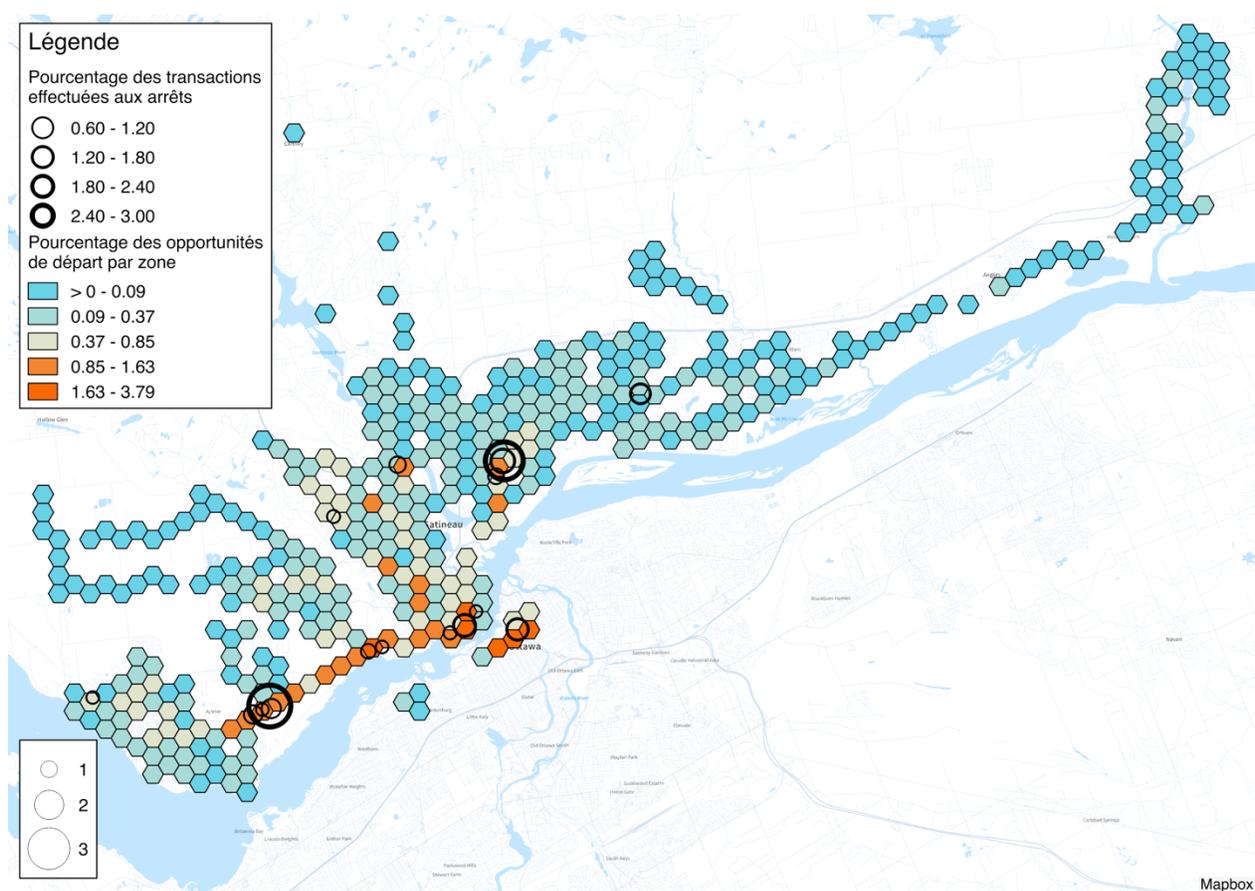


Figure 6.7 : Comparaison des points d'offre et de demande (av. Rapibus)

La figure illustre les points chauds où un plus grand nombre de transactions sont effectuées pour l'ensemble de la journée. Les faibles pourcentages observés montrent que les transactions sont

effectuées de façon très éparpillée sur l'ensemble du réseau. On note toutefois, deux grands points transactionnels qui correspondent à deux emplacements des Parc-O-Bus. Quelques points transactionnels montrent aussi un niveau d'offre de service moyen lorsqu'ils ne se trouvent pas sur l'axe est-ouest rapporté à l'analyse précédente. Faire ressortir ces écarts ou points chauds peut aussi permettre de cibler les études plus précises pour s'assurer que l'offre correspond à la demande pour tous les secteurs.

6.2.2 Réseau après Rapibus

La caractérisation du réseau après Rapibus est similaire et rapporte les mêmes indicateurs. Ainsi, la Figure 6.8 montre la connectivité des arrêts du réseau de la STO après la mise en place du service Rapibus.

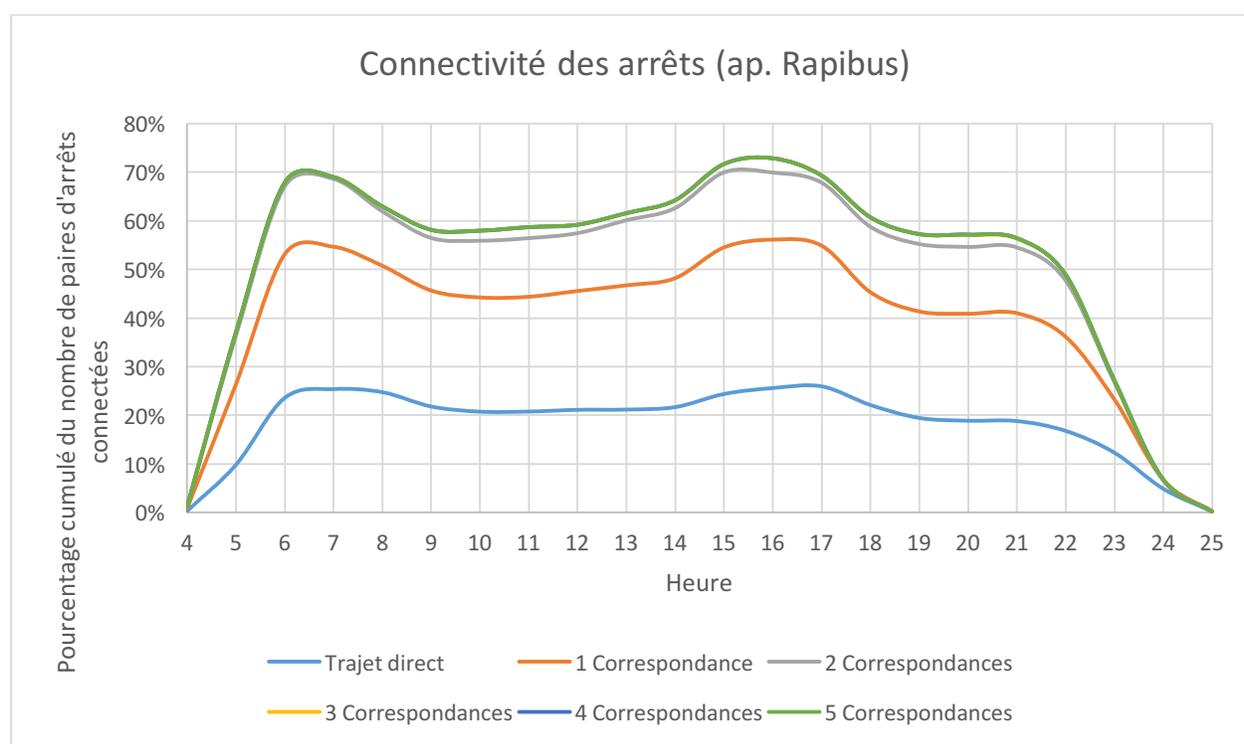


Figure 6.8 : Connectivité des arrêts (ap. Rapibus)

Comme le référentiel n'est pas le même que celui du réseau avant Rapibus, la valeur absolue des résultats ne peut être directement comparée. Toutefois, l'apparence des courbes semble similaire, avec des pics légèrement plus prononcés après l'instauration du Rapibus aux heures de pointe. La connectivité hors pointe semble aussi légèrement plus stable, sans augmentation vers le midi.

Finalement, l'amplitude dépasse cette fois-ci les 70% et l'observation indiquant qu'une majorité de paires sont connectées avec des trajets de 3 correspondances ou moins s'applique encore une fois.

L'analyse spatiale des opportunités pour le réseau après Rapibus est présentée à la Figure 6.9 pour la pointe du matin et à la Figure 6.10 pour la pointe de l'après-midi.

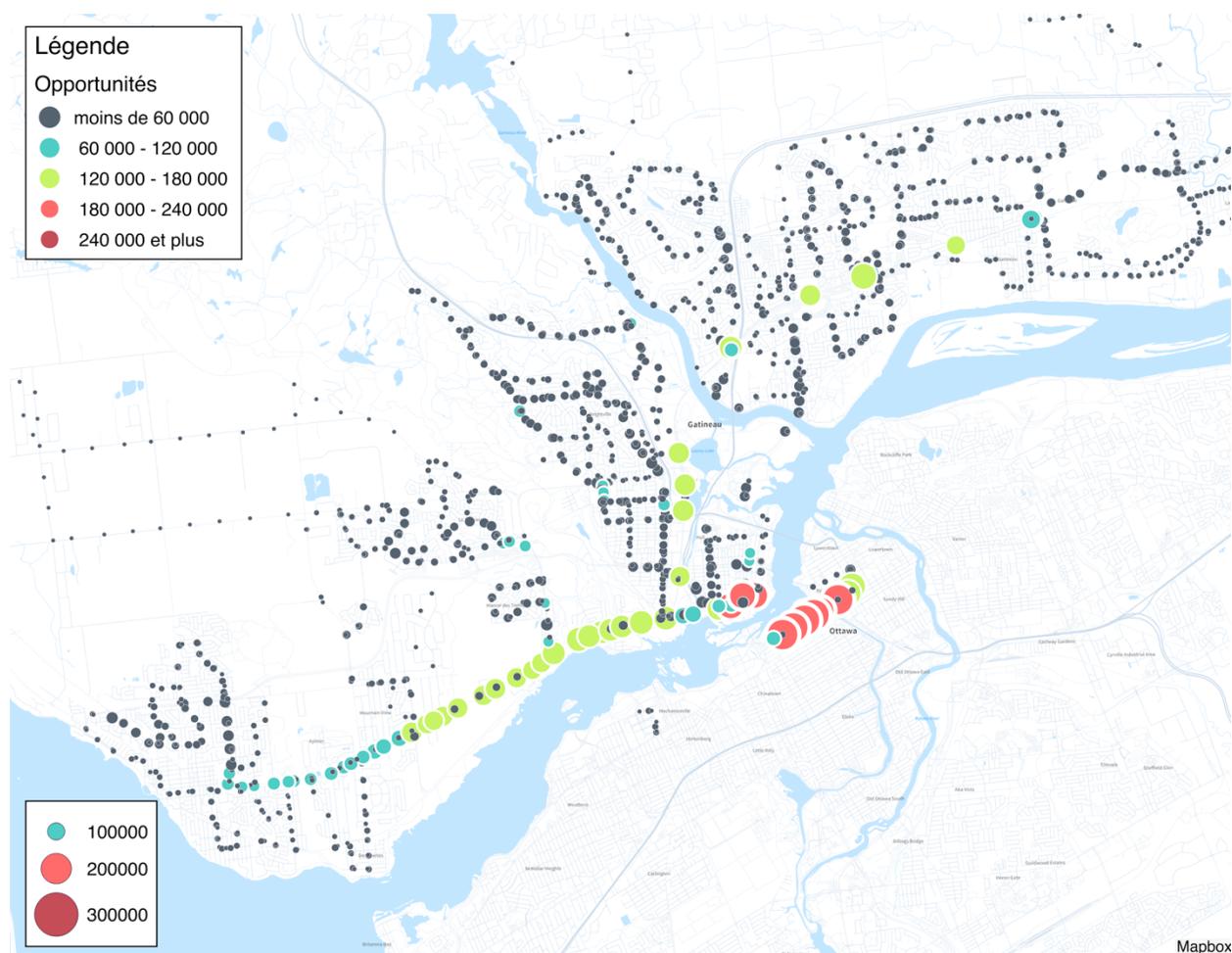


Figure 6.9 : Opportunités aux arrêts (pointe AM) [ap. Rapibus]

Contrairement au réseau avant Rapibus, celui-ci montre une variation entre la pointe AM et la pointe PM, ce qui confirme l'intérêt de segmenter les analyses par secteur et par heure. Afin de faciliter ce type d'analyse, une carte interactive devrait être développée, laissant un choix sur le zoom et sur la plage de temps à afficher.

La Figure 6.9 montre un axe important au sud de Gatineau et au nord de façon plus clairsemée aux stations Rapibus. Aussi, les opportunités semblent plus distribuées au centre-ville d'Ottawa en

pointe AM qu'en pointe PM où les opportunités sont concentrées à un nombre plus limité d'arrêts. Hors du corridor Rapibus, les opportunités semblent peu variées en fonction de la période de pointe observée.

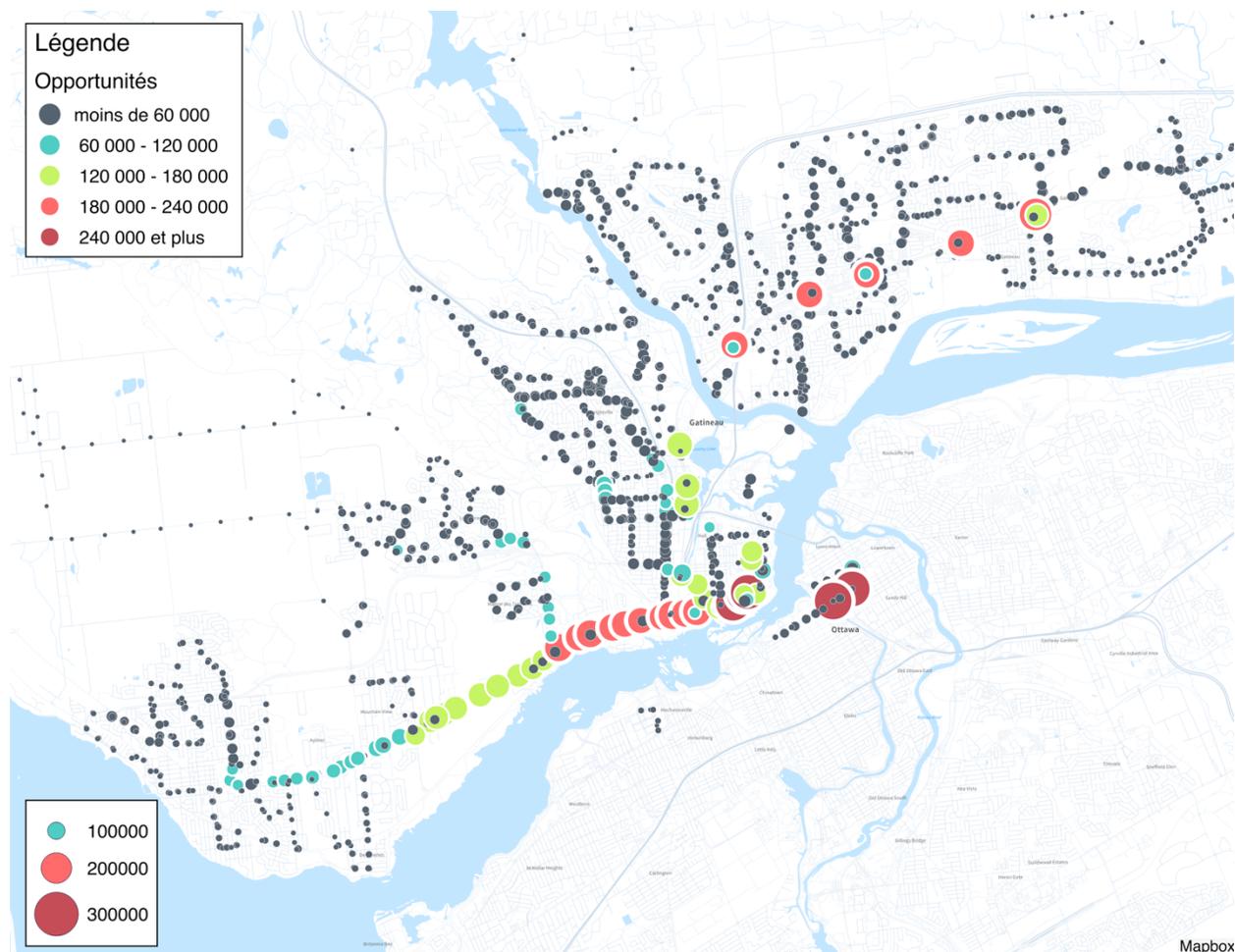


Figure 6.10 : Opportunités aux arrêts (pointe PM) [ap. Rapibus]

Finalement, la Figure 6.11 combine de nouveau, sous la forme de pourcentage d'opportunités, l'offre de service en grille de fond et les principaux points transactionnels du réseau d'une journée complète pour le réseau après Rapibus.

De façon similaire, l'offre de service est distribuée sur l'ensemble du territoire, avec quelques points plus marqués en ligne avec le corridor Rapibus. Le changement est plutôt notable sur les points chauds transactionnels. Ceux-ci sont maintenant clairement plus concentrés aux stations Rapibus et principalement celles où un stationnement incitatif (Parc-O-Bus) est disponible. Le

Rapibus semble donc avoir redistribué la demande de façon concentrée aux différentes stations. C'est un effet attendu du rabattement des lignes locales sur le corridor à haute fréquence.

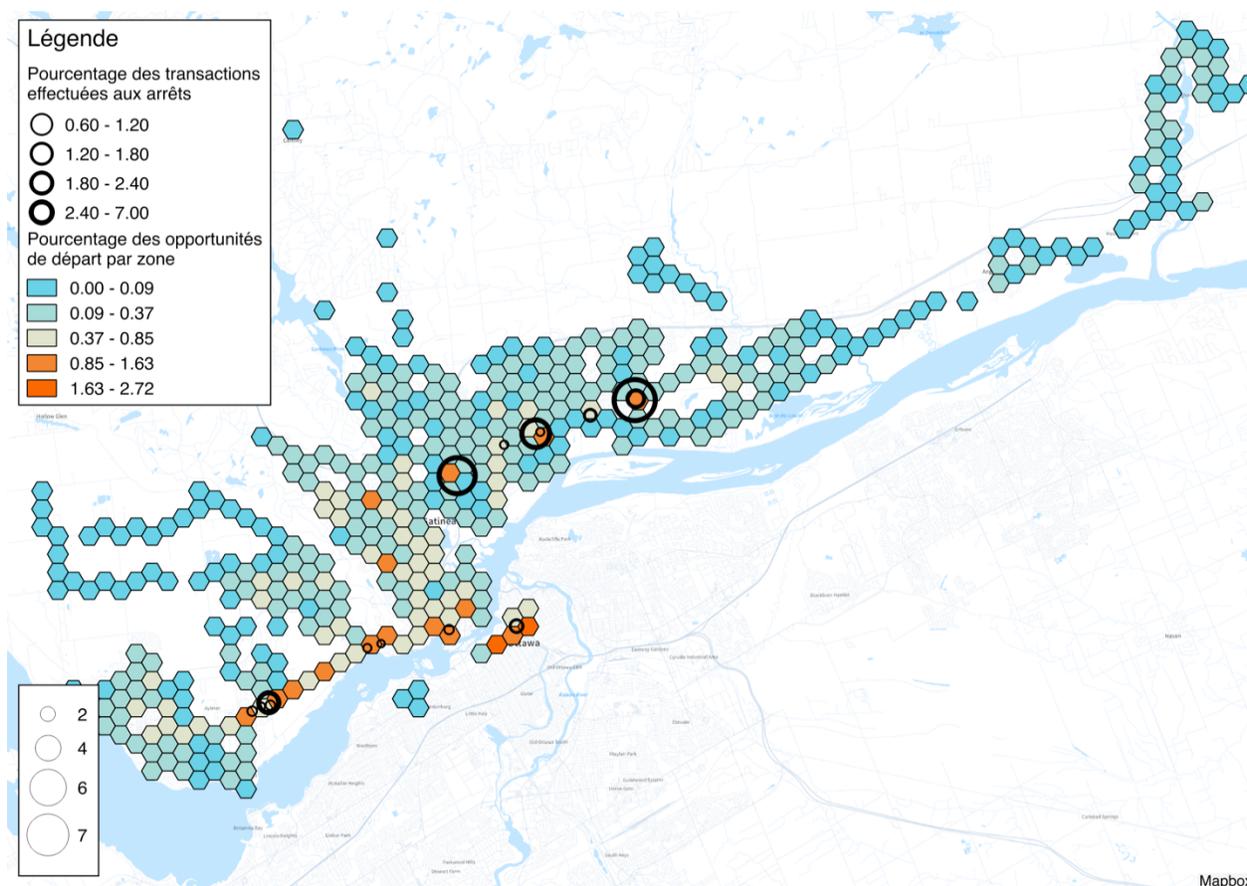


Figure 6.11 : Comparaison des points d'offre et de demande (ap. Rapibus)

6.3 Évaluation de l'impact des changements

La généralisation des indicateurs permet de mieux comparer les différents impacts de l'instauration du service Rapibus sur un même référentiel. Pour rappel, la grille de référence utilisée pour le calcul de ces indicateurs a été présentée à la Figure 4.2 puis rediscutée à la section 5.1.3.

Sept indicateurs sont présentés ci-dessous. Deux des premiers, la connectivité et l'analyse spatiales des opportunités reprennent les concepts énoncés dans la caractérisation indépendante des deux réseaux. La directitude, la distribution fréquentielle des opportunités, les opportunités-personnes, l'accessibilité réelle des temps de parcours et les temps de parcours sur le réseau sont de nouveaux concepts analysés dans cette comparaison avant/après.

6.3.1 Connectivité des arrêts

Plutôt que de présenter la connectivité des arrêts, la Figure 6.12 et la Figure 6.13 rapporte la connectivité par rapport à la grille de référence, permettant de comparer les réseaux avant/après.

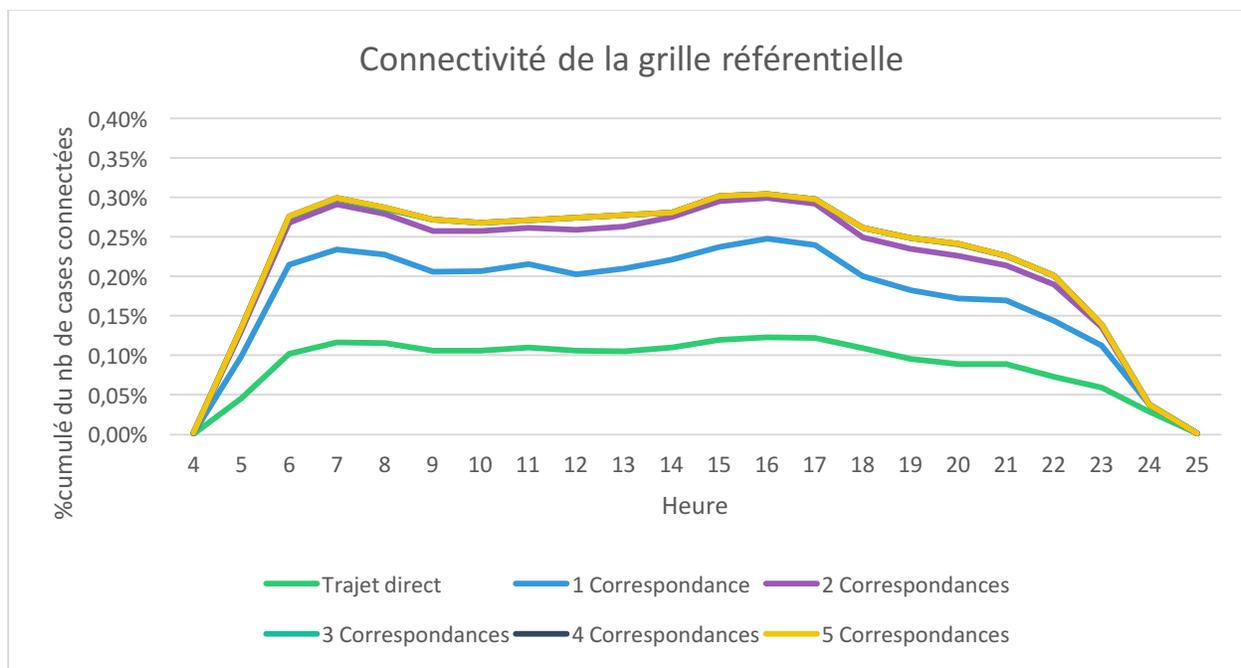


Figure 6.12 : Connectivité en fonction des zones (grille de référence) [av. Rapibus]

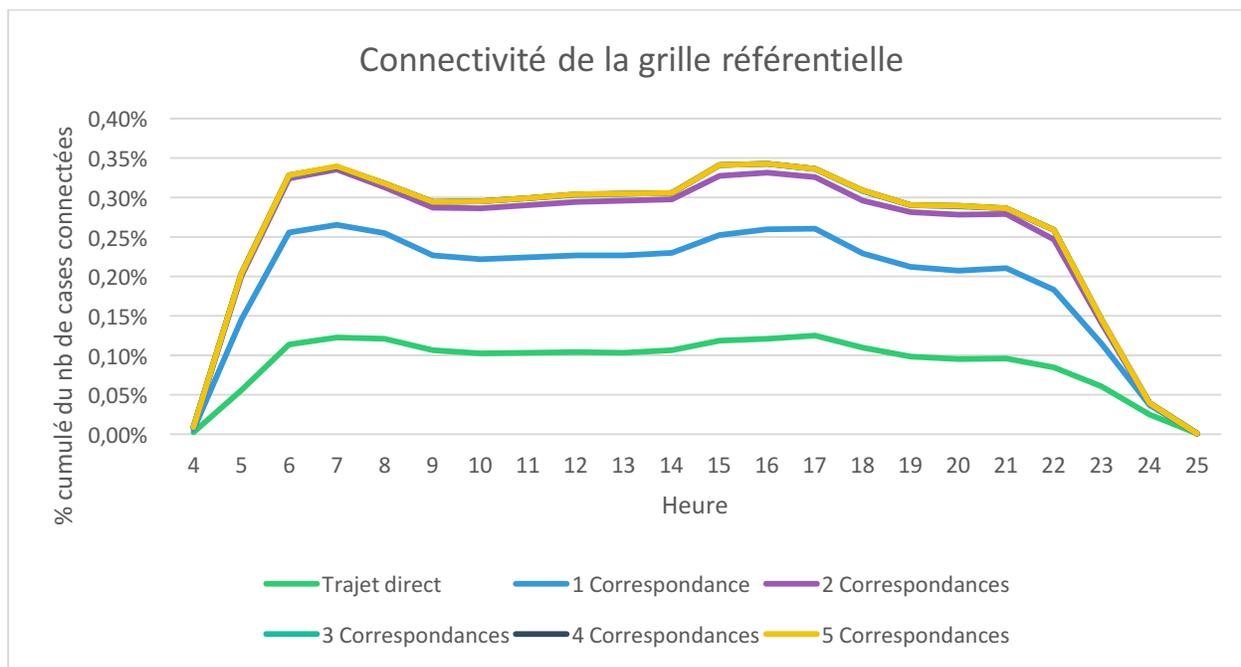


Figure 6.13 : Connectivité en fonction des zones (grille de référence) [ap. Rapibus]

Au final, comme le nombre et la position des arrêts ont peu changé après l'instauration du Rapibus, les résultats comparables sont similaires à ceux obtenus pour la caractérisation individuelle des réseaux. On confirme un lissage des courbes après Rapibus pour les périodes hors-pointes. Aussi, le réseau est globalement mieux connecté après l'instauration du Rapibus. Toutefois, il semble y avoir une très légère baisse de la connectivité pour les trajets directs. L'ampleur est difficile à cerner en raison des faibles valeurs des pourcentages cumulés, mais pourra être rediscutée lors des autres analyses.

6.3.2 Directitude

L'indicateur de directitude calculé dans le cadre de cette analyse permet une comparaison globale de la compétitivité du réseau de TC face au réseau routier en écoulement libre, mais aussi de ces deux réseaux face à une distance à vol d'oiseau afin de relativiser les résultats obtenus. Les différents ratios de comparaison sont listés au Tableau 6.2.

Tableau 6.2 : Comparaison des indices de directitude

	AV. RAPIBUS	AP.RAPIBUS
TC / ROUTIER	1,24	1,09
TC / VOL D'OISEAU	1,77	1,55
ROUTIER / VOL D'OISEAU	1,43	1,43

Les résultats des ratios des distances sur le réseau de TC sur les distances sur le réseau routier et à vol d'oiseau montre une diminution de la tortuosité des chemins les plus courts pour les trajets déclarés lors de l'enquête Origine-Destination. Le rabattement sur la ligne Rapibus permettrait donc de réduire les parcours locaux sinueux et d'offrir un trajet plus direct vers le centre-ville d'Ottawa. Une diminution des temps de parcours est aussi attendue.

Finalement, le ratio identique entre la distance sur le réseau routier et à vol d'oiseau avant et après Rapibus confirme que les changements reflètent bien les impacts de l'implantation du service et non pas un changement des itinéraires sur le réseau routier ou des origines et destinations.

6.3.3 Analyse spatiale des opportunités

Contrairement aux opportunités aux arrêts analysées lors de la caractérisation d'un réseau unique, les opportunités sont rapportées à la grille de référence pour effectuer la comparaison de deux

réseaux sur une base commune. La Figure 6.14 et la Figure 6.15 comparent les opportunités de départ selon la grille de référence pour une journée complète.

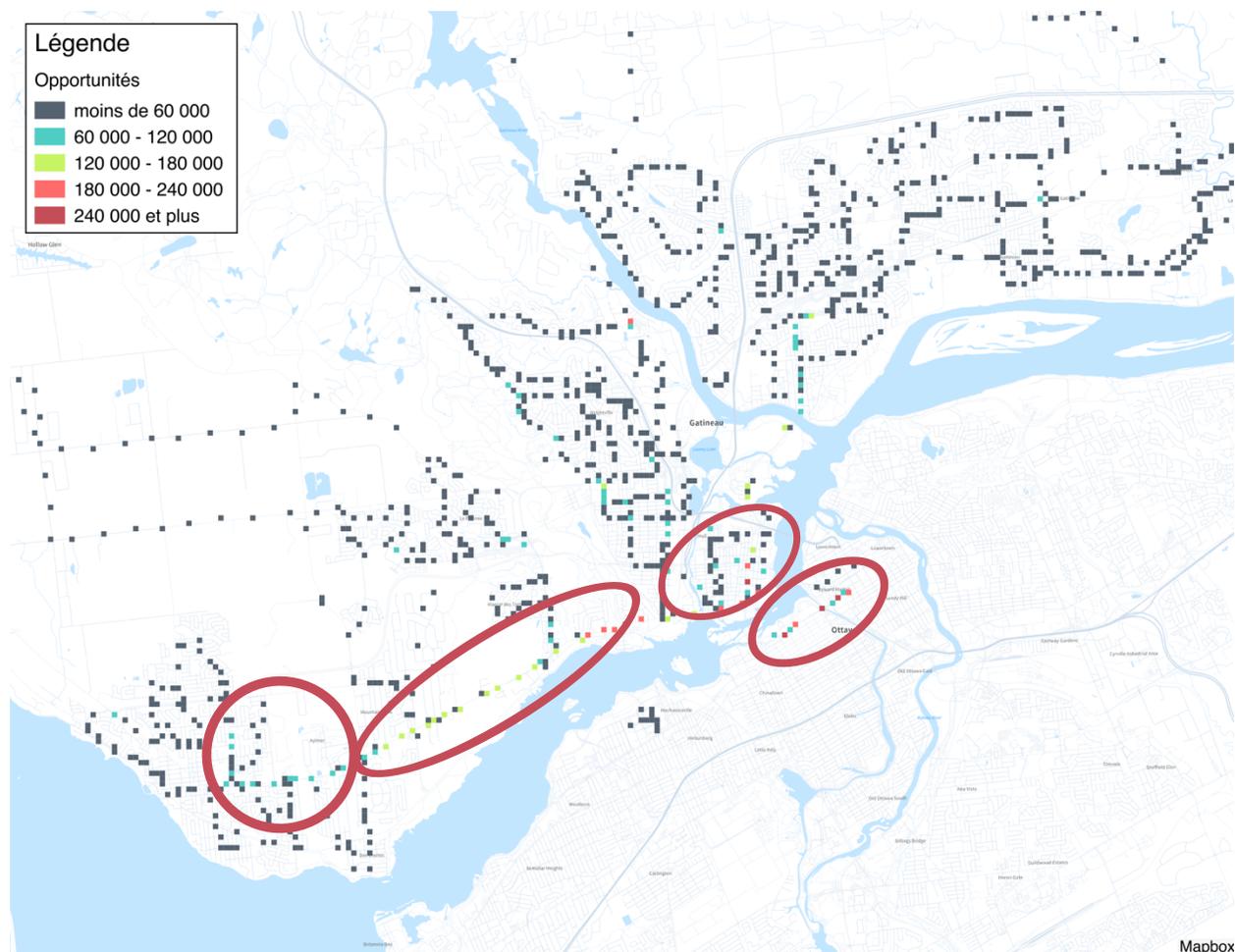


Figure 6.14 : Opportunités de départ selon la grille de référence (pointe AM) [av. Rapibus]

Les catégories d'opportunités offertes avant le Rapibus sont concentrées par axe et par secteur. Les fortes concentrations d'opportunités se trouvent au centre-ville d'Ottawa, terminus d'une grande partie des déplacements. Plusieurs opportunités sont aussi offertes sur la rive opposée du centre-ville. De plus, l'axe est-ouest souvent rapportée dans les analyses précédentes est nettement visible par sa couleur verte au centre de la figure. Celle-ci fait le lien entre les secteurs résidentiels et le secteur plus industriel de Gatineau. Le reste, étant des secteurs résidentiels à faible densité, ne présente que peu d'opportunités. La différence face aux opportunités après Rapibus est plutôt faible. Les mêmes pôles sont visibles. On note l'apparition toutefois des points correspondant aux stations Rapibus dans le nord de la ville qui marquent le corridor Rapibus, alors que les opportunités étaient plus diluées sur la carte avant Rapibus.

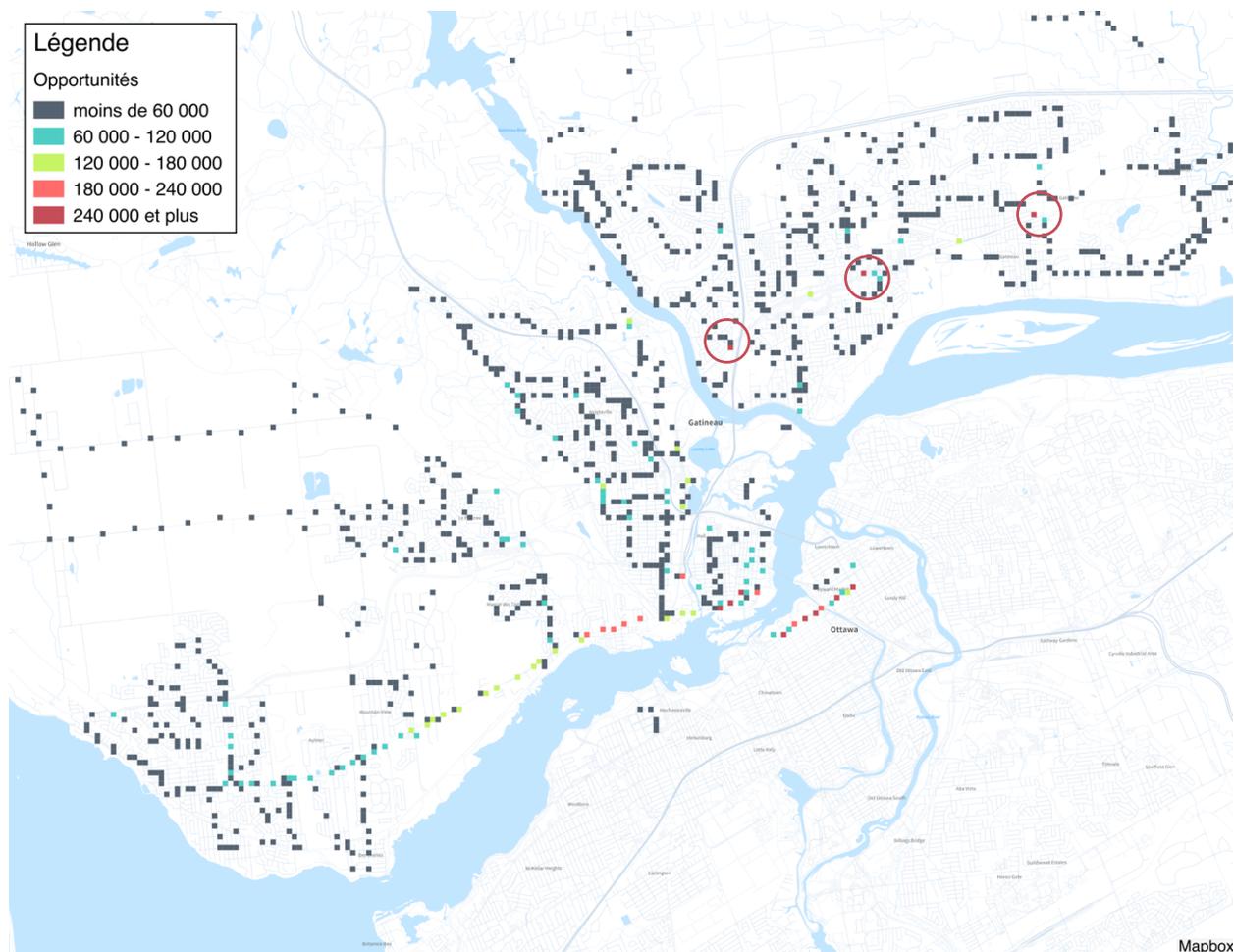


Figure 6.15 : Opportunités de départ selon la grille de référence (pointe AM) [ap. Rapibus]

L'analyse comparative avant et après l'instauration du Rapibus indique principalement des différences dans la portion nord, ce qui montre que les zones desservies demeurent sensiblement les mêmes et que le niveau de service est comparable d'un réseau à l'autre.

Toutefois, la grille de référence permet aussi de comparer aisément les opportunités d'un même réseau en fonction du nombre de correspondances. La Figure 6.16, la Figure 6.17 et la Figure 6.18 illustrent les opportunités de départ pour les trajets directs, à une correspondance et finalement deux correspondances pour le réseau avant Rapibus pour la pointe du matin. La tendance des résultats est sensiblement la même pour le réseau après Rapibus et sont omis dans l'analyse.

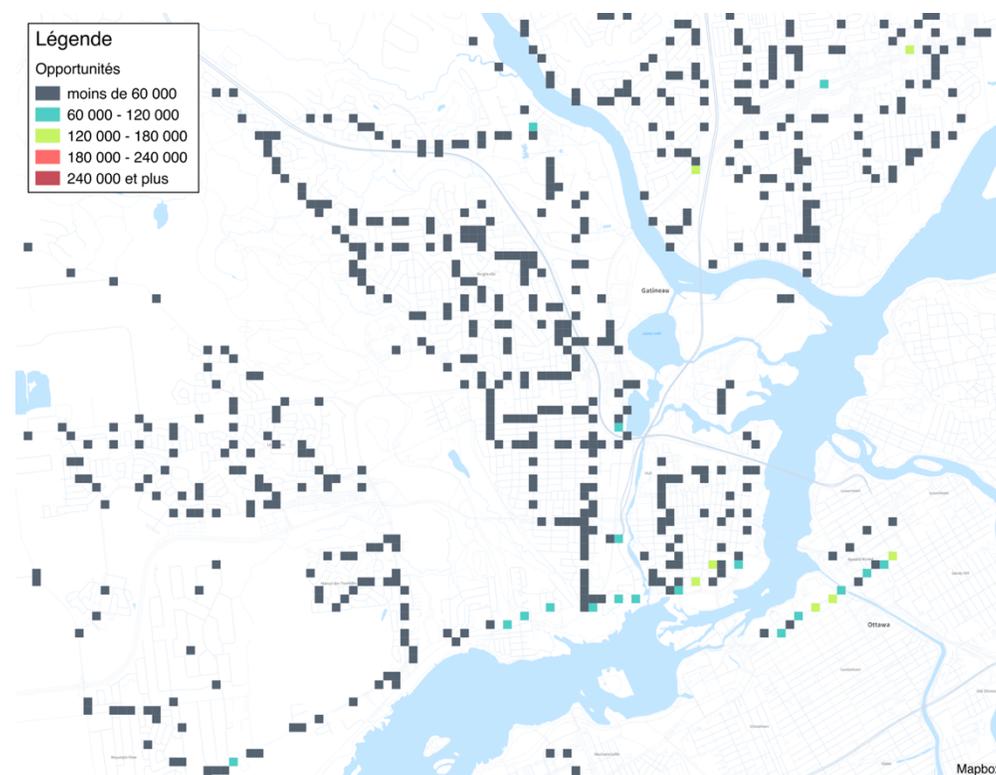


Figure 6.16 : Opportunités de départ pour un trajet direct (pointe AM) [ap. Rapibus]

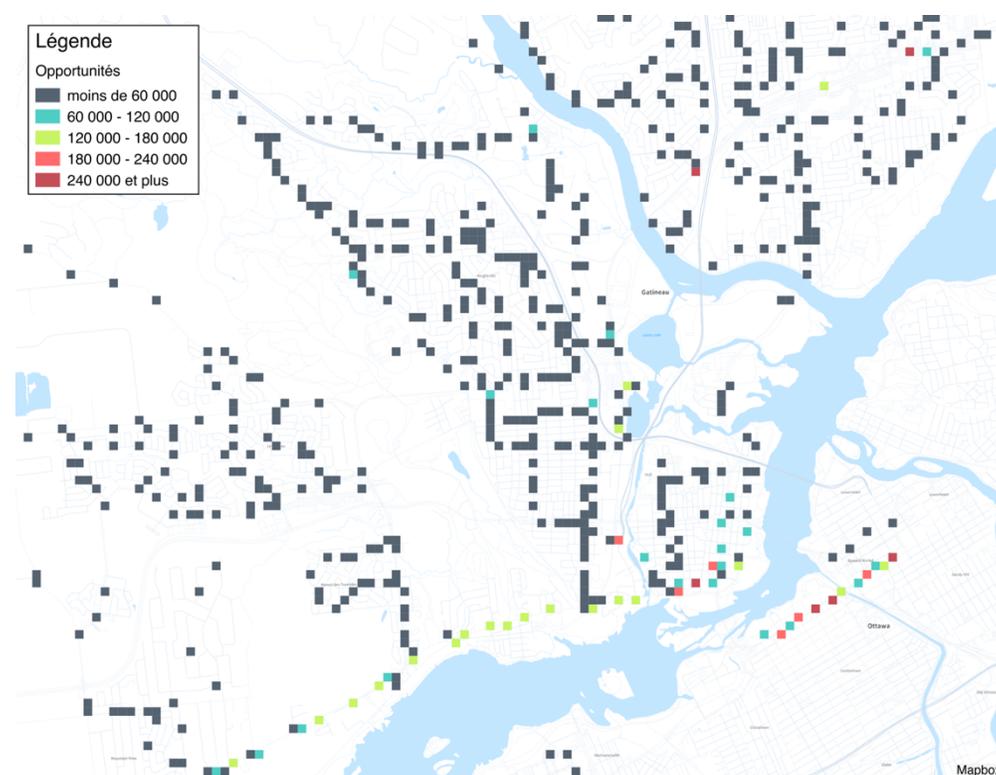


Figure 6.17 : Opportunités de départ pour une correspondance (pointe AM) [ap. Rapibus]

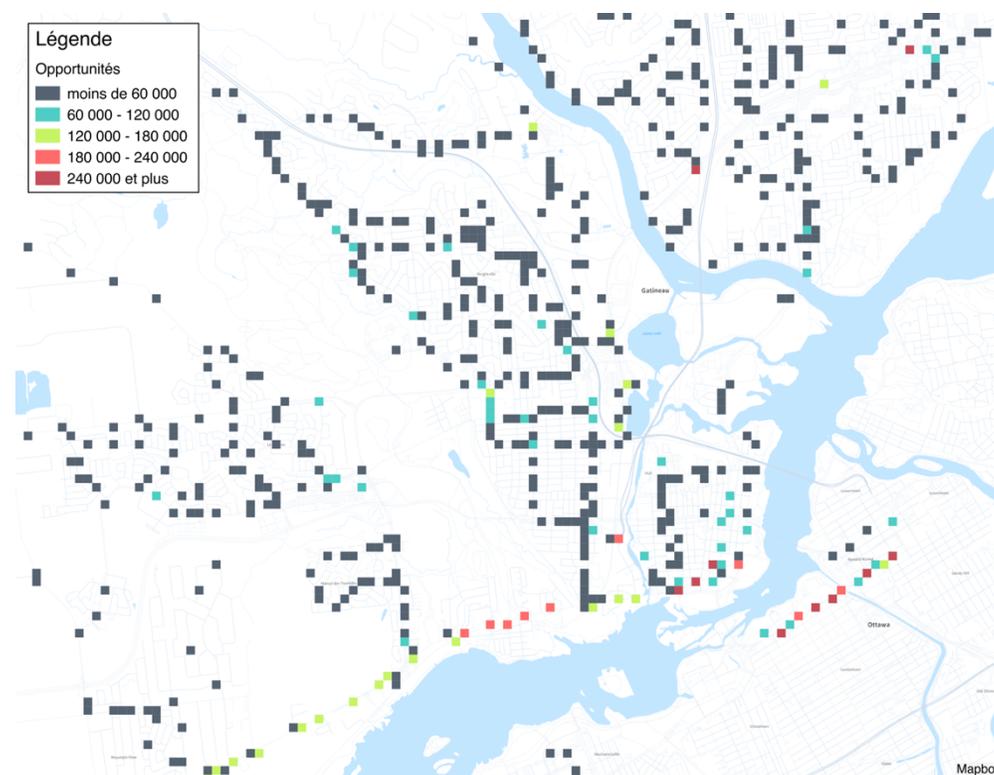


Figure 6.18 : Opportunités de départ pour deux correspondances (pointe AM) [ap. Rapibus]

Les trois figures confirment d’abord les propos avancés jusqu’à maintenant. Il existe peu d’opportunités ne nécessitant pas de correspondance. L’axe est-ouest devient apparent à partir de deux correspondances, ce qui montre bien sa principale fonction de ligne de rabattement des lignes locales. Cet effet est accentué pour le réseau après Rapibus. Ces illustrations ouvrent la porte à de nombreuses analyses ciblées. Elles pourraient, par exemple, limiter les origines à un secteur pour voir la desserte y étant offerte et les zones difficilement accessibles à partir des points de départ inclus dans ce secteur.

Finalement, afin de démontrer clairement les changements dans l’offre de service, la Figure 6.19 et la Figure 6.20 montrent la différence entre le nombre d’opportunités pour la pointe AM et pour la pointe PM. Les différentes catégories de la légende représentent des quantiles de la distribution, montrant que peu de valeurs sont situées dans les extrêmes. Les changements au service sont similaires pour les deux périodes de pointe. Une augmentation des opportunités est clairement visible à l’est de la carte, alors que les opportunités au centre semblent simplement être déplacées d’une zone à une autre adjacente.

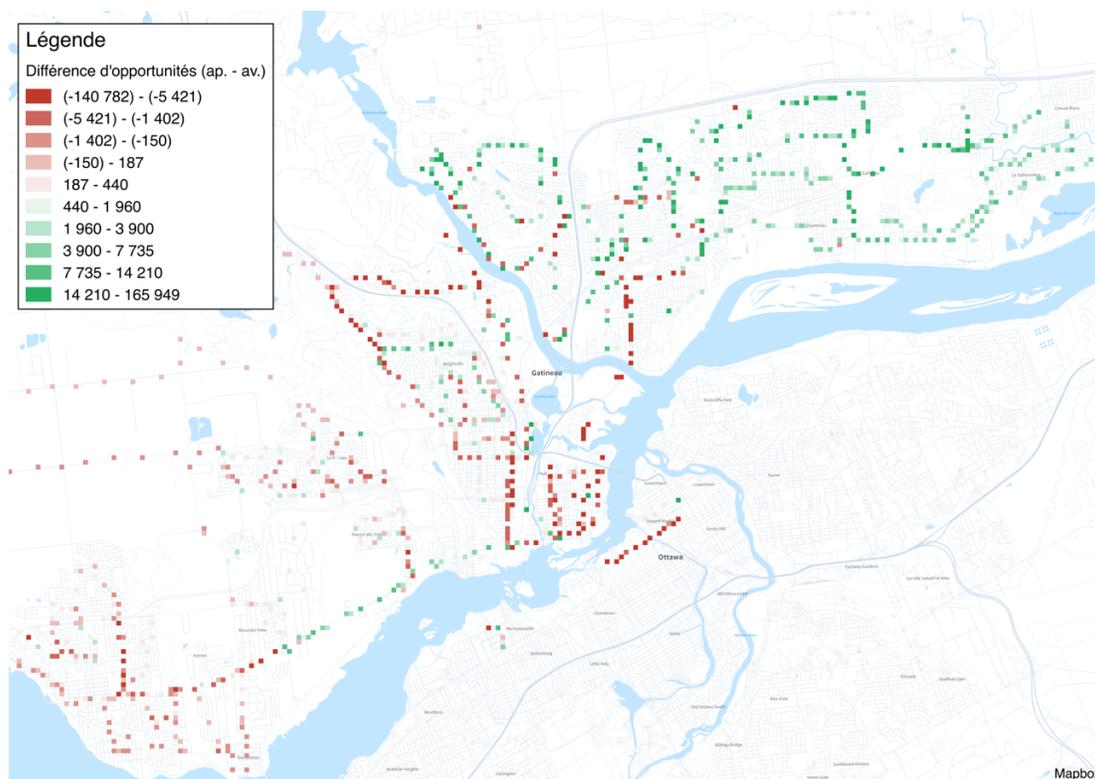


Figure 6.19 : Différence d'opportunités avant/après le Rapibus (pointe AM)

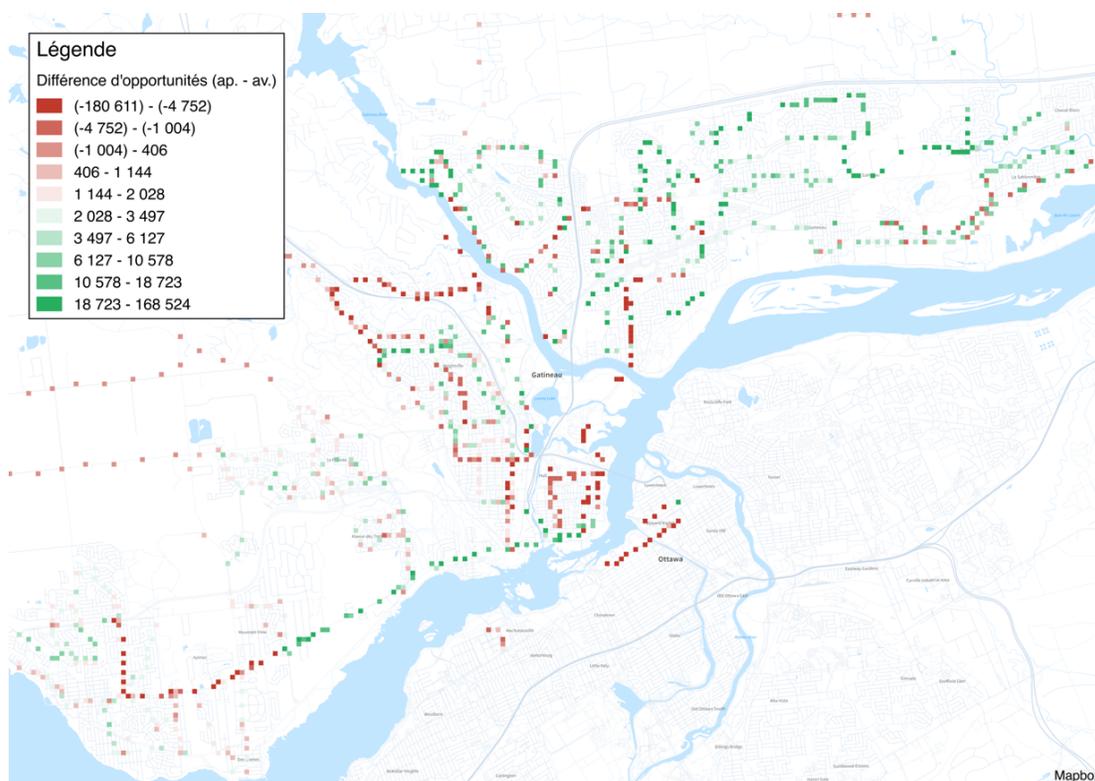


Figure 6.20 : Différence d'opportunités avant/après le Rapibus (pointe PM)

6.3.4 Distribution fréquentielle des opportunités

La Figure 6.21 quantifie finalement cette notion d'opportunité qui a été uniquement présentée jusqu'à maintenant sous la forme d'une analyse spatiale. La distribution fréquentielle des opportunités pour chaque heure de la journée y est présentée en fonction du nombre de correspondances nécessaires afin de réaliser l'opportunité.

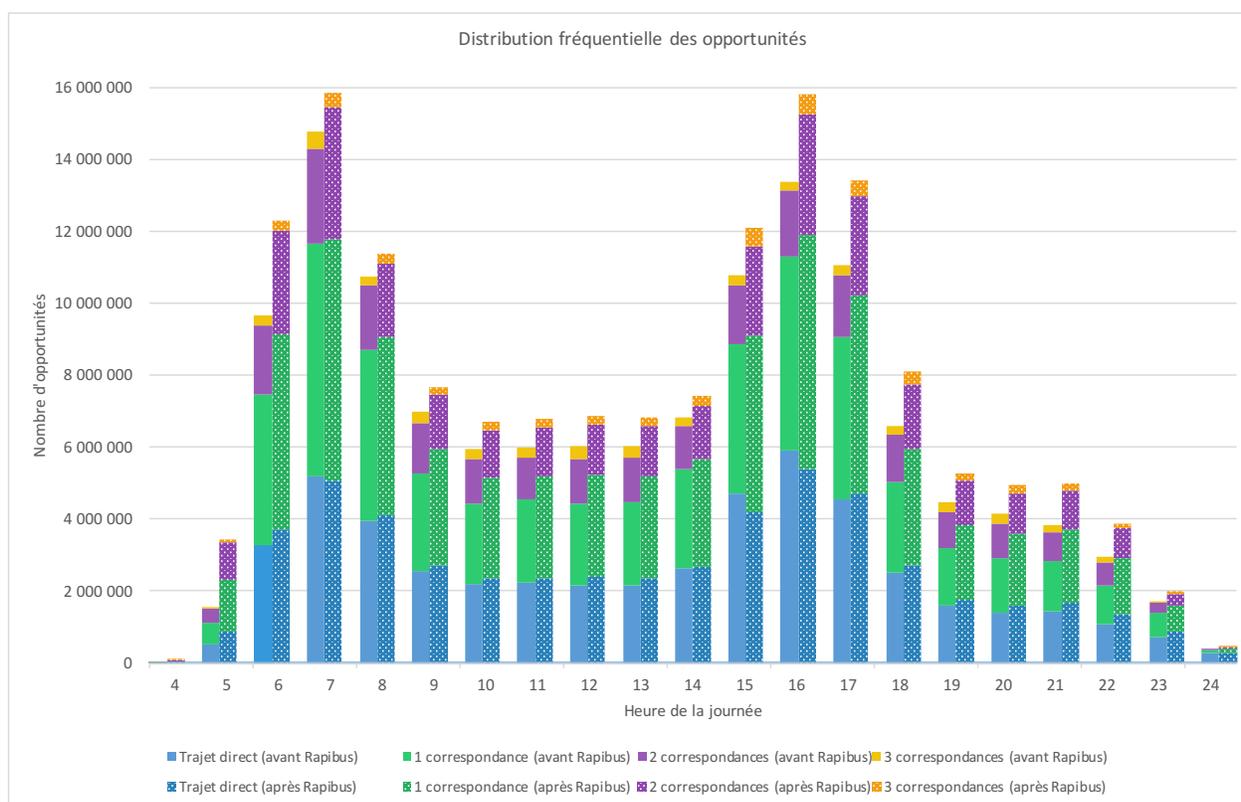


Figure 6.21 : Comparaison des distributions fréquentielles des opportunités avant et après le Rapibus

La tendance affichée par la connectivité des arrêts (Figure 6.12 et Figure 6.13) pouvait laisser prévoir soit une augmentation du nombre d'opportunités, soit une réaffectation dans l'espace des opportunités existantes après l'instauration du Rapibus. C'est finalement le premier scénario qui s'est concrétisé suivant la mise en service du Rapibus. Le nombre d'opportunités a augmenté pour chaque heure de la journée, en lien avec l'augmentation du service et de façon corrélée à la connectivité. Un réseau mieux connecté offre généralement un plus grand nombre d'opportunités de déplacement lorsque la fréquence est au rendez-vous. Finalement, la tendance annoncée concernant une réduction du nombre d'opportunités en trajets directs se confirme pour les heures

de pointe. Ce sont finalement le nombre d'opportunités à une correspondance qui augmentent. Ceci est un effet attendu puisque le corridor Rapibus agit comme une ligne de rabattement pour les lignes d'autobus locales. Il faut toutefois noter qu'aucune pénalité n'est pour l'instant appliquée aux opportunités quant aux correspondances nécessaires pour les accomplir. La prise en compte d'une telle pénalité pourrait influencer les résultats. La section 5.1.4 discute de façon plus détaillée de cet aspect.

Aussi, nous avons regardé de quelle façon les opportunités étaient réparties sur l'ensemble des zones de la grille de référence. La Figure 6.22 présente donc une comparaison de la répartition des opportunités sur la grille de référence pour le service avant et après Rapibus.

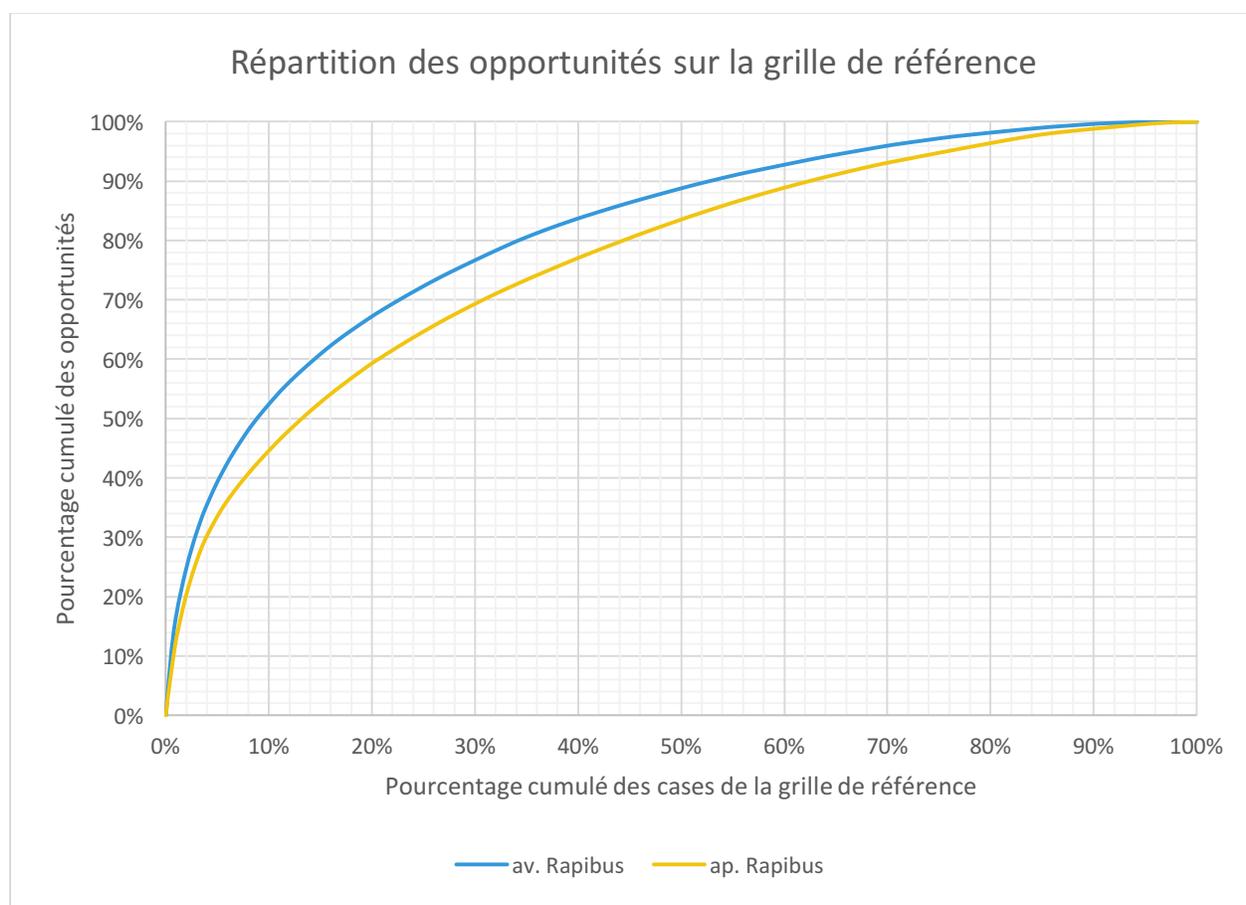


Figure 6.22 : Répartition des opportunités sur la grille de référence

L'allure des deux courbes est similaire. On note une augmentation rapide des opportunités pour un faible nombre de cases jusqu'à atteindre environ les 30%. La courbe après Rapibus est légèrement plus écrasée, indiquant une meilleure dispersion dans l'espace des opportunités sur l'ensemble des

zones de la grille. Les opportunités devraient donc atteindre un plus grand nombre de résidents. C'est aussi ce que laissait prévoir les indicateurs classiques du Tableau 6.1.

6.3.5 Opportunités-personnes

Les opportunités-personnes font un rapprochement entre le modèle statique d'accessibilité en traçant un rayon de 500m autour des arrêts pour capturer l'ensemble de la population ayant accès aux opportunités qui permettent au final de joindre l'accessibilité, la fréquence et les destinations accessibles en un seul et même indicateur. Le Tableau 6.3 compare les opportunités-personnes avant et après Rapibus. Celles-ci rapportent l'ensemble des points du réseau accessible par une personne en moins de 2 heures de parcours, sans pénalité sur les correspondances.

Tableau 6.3 : Comparaison des opportunités-personnes avant et après Rapibus

	OPPORTUNITÉS-PERSONNES	ÉCART
AV. RAPIBUS	217 266 999 583	
AP. RAPIBUS	249 849 221 950	+ 15 %

Les résultats en fonction des opportunités-personnes montrent une augmentation d'environ 15% de l'offre de service accessible aux résidents de Gatineau. Ceci signifie que le remaniement de réseau (changement de tracé et retrait et déplacement des arrêts) et la modification des fréquences de service a été bénéfique au niveau de l'offre de service et que les opportunités offertes peuvent être utilisées par utilisateurs. Ces données pourraient être croisées à l'analyse de la demande pour vérifier de quelle façon celle-ci s'est adaptée aux différents changements.

La Figure 6.23 reprend l'analyse des opportunités-personnes en fonction du nombre de correspondances pour chacune des opportunités. Les résultats viennent confirmer qu'un plus grand nombre d'opportunités de deux et trois correspondances est accessible aux résidents au détriment des opportunités en trajet direct. Ces résultats offrent aussi une visibilité intéressante à la notion de pénalité de correspondance. La prise en compte d'une telle pénalité changerait les résultats de façon plutôt significative. Comme les opportunités-personnes après Rapibus comportent un plus grand nombre de correspondances, plusieurs opportunités pourraient être perdues en appliquant une telle pénalité.

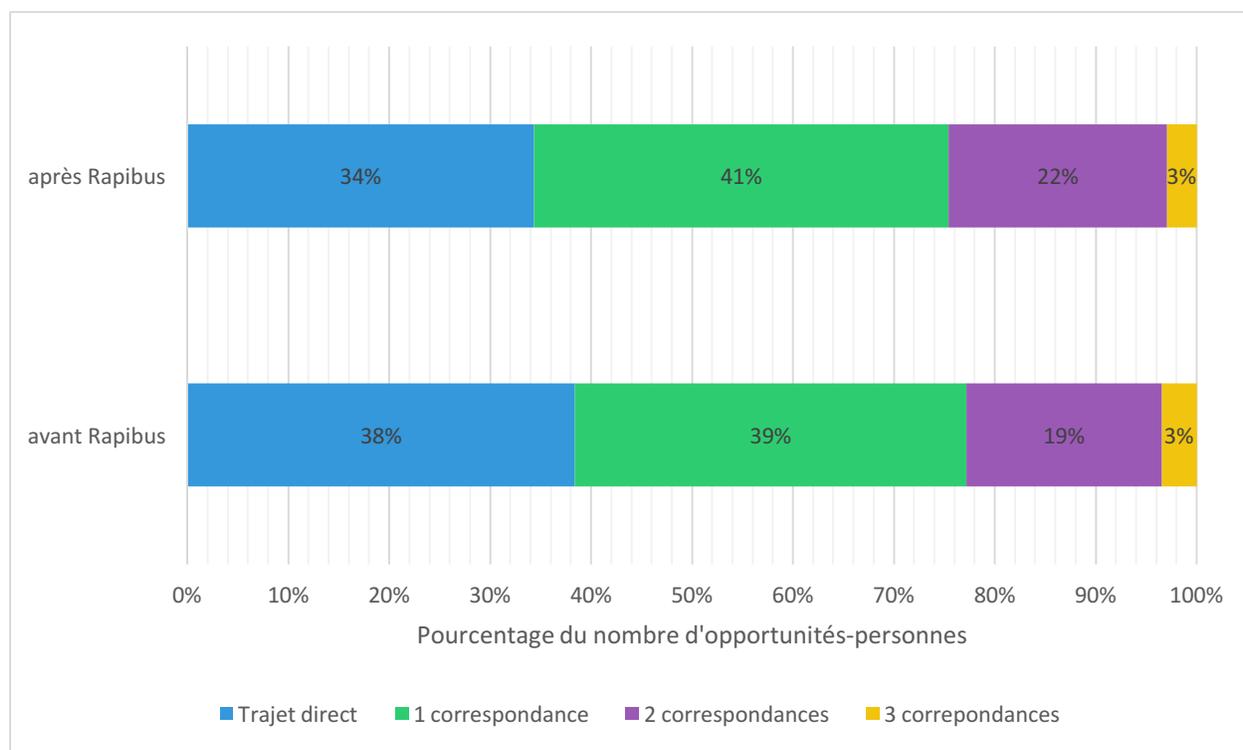


Figure 6.23 : Dispersion des opportunités-personnes selon le nombre de correspondances

6.3.6 Accessibilité réelle

Le calcul de l'accessibilité réelle se découle en trois étapes. À partir des données de CAP, la destination des déplacements enregistrés par le système de perception est calculée. Pour ce faire, les données de CAP et GTFS sont entrées dans l'algorithme présenté à la section 5.2. Les résultats de cet algorithme pour les transactions sur le réseau avant Rapibus sont présentés au Tableau 6.4.

Tableau 6.4 : Résultat de l'algorithme OD sur les données CAP de la STO

DESTINATIONS TROUVÉES	TOTAL DE TRANSACTIONS	TAUX DE SUCCÈS
916 885	1 795 230	51,1%

Le taux de succès pour l'attribution d'une destination est plutôt faible, ce qui influence directement les résultats dans les calculs de l'accessibilité réelle. Comme un calcul complet de l'accessibilité réelle pour un réseau ne serait pas représentatif, un seul exemple d'application sera effectué pour une ligne du réseau avant Rapibus. D'abord, le Tableau 6.5 explique en partie la source des erreurs.

Tableau 6.5 : Détail des erreurs de l'algorithme OD

ERREUR	NOMBRE DE TRANSACTIONS	POURCENTAGE
Arrêt inconnu	138 422	7,7
Ligne inexistante	404 711	22,5
Ne retrouve pas la ligne la plus proche	89 310	5,0
Arrêt et ligne incompatible	214 386	11,9

Les performances de l'algorithme sont en grande partie expliquées par une incompatibilité entre les données CAP et les données GTFS. Plusieurs des numéros de lignes et d'arrêts ne concordent pas entre les deux sources de données. Une vérification avec la STO pour mieux harmoniser les ensembles de données permettrait certainement d'obtenir de meilleurs résultats. Une étude approfondie de la demande, hors du mandat de cette recherche, pourrait répondre à ces interrogations.

En plein conscience des limitations des résultats, nous avons sélectionné une ligne d'autobus dont la concordance entre les données CAP et GTFS était correcte. La Figure 6.24 montre un aperçu des résultats de l'accessibilité réelle de la ligne 49 entre 7 et 8h.

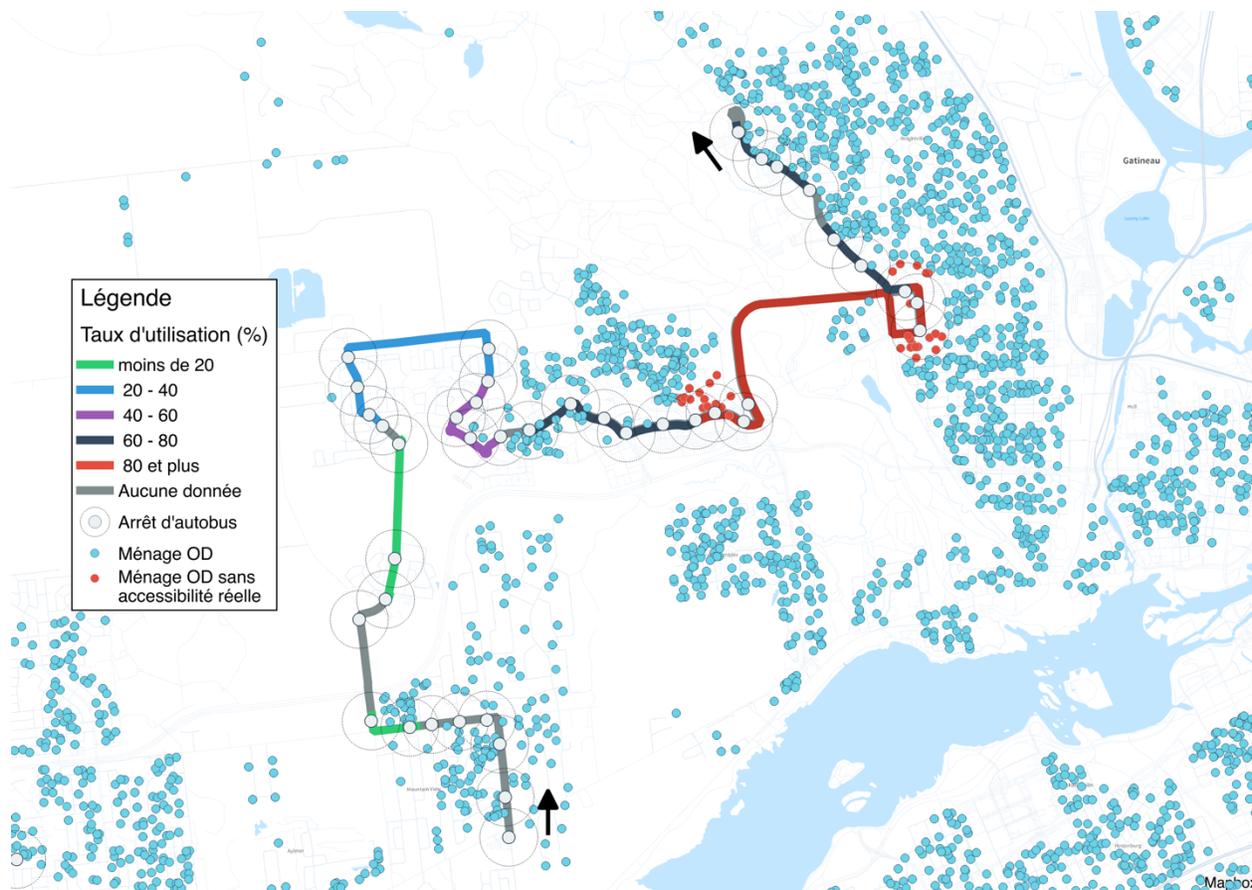


Figure 6.24 : Taux d'utilisation de la ligne 49 (entre 7 et 8h) [av. Rapibus]

Les résultats montrent les taux d'utilisation de chaque tronçon de la ligne 49. Suivant le parcours, les taux d'utilisation augmentent en fonction du kilométrage parcouru. Près du dernier tiers, les taux commencent à dépasser les 80% d'utilisation. En fixant un taux critique à ce niveau, on peut noter plusieurs ménages présents dans un rayon de 500m des points d'accès de ces tronçons qui pourraient difficilement accéder au service de TC, même s'ils le désiraient. L'accessibilité réelle au service serait donc moindre que l'accessibilité statique liée uniquement au rayon d'accès de 500m. Aussi, en y joignant la notion d'opportunité, on pourrait calculer les opportunités manquées qui ne pourrait être réalisées par les résidents. Ceci ferait diminuer la mesure d'opportunités-personnes du réseau.

La problématique dans la réalisation de cette méthodologie réside dans la combinaison de plusieurs tracés pour une même ligne d'autobus qui ne passent pas nécessairement par les mêmes arrêts. Un seul tracé global pour une ligne devrait pouvoir être automatiquement généré pour la présentation des résultats en considérant des segments inter-arrêts. La réalisation technique dépend grandement

de la qualité des données et de la précision des tracés. En ce sens, Mohsen, Tanguay et Spurr (2016), ont récemment développé une méthode pour générer les tronçons inter-arrêts ou inter-nœuds qui a été appliquée pour les réseaux de la région montréalaise. Ils ont aussi fait un plaidoyer sur la normalisation à la source des données GTFS pour une même région pour systématiser les analyses.

6.3.7 Temps de parcours

L'implantation du Rapibus à haute fréquence de service devrait normalement affecter les temps de parcours en ce qui a trait aux opportunités. Globalement, comme elles sont plus nombreuses et moins directes, il est difficile de prévoir les résultats. Comme l'instauration du Rapibus visait l'optimisation du réseau actuel et l'amélioration de l'offre de service, une diminution des temps de parcours est attendue. La Figure 6.25 compare les distributions fréquentielles des temps de parcours des opportunités offertes avant et après l'instauration du Rapibus.

À première vue, les deux distributions semblent présenter quelques différences. Déjà l'amplitude de la distribution après Rapibus est plus grande, ce qui laisse supposé que les nouvelles opportunités offrent des temps de parcours centrés, plutôt qu'aux extrémités de la distribution. Toutefois, en observant simplement les distributions, il est difficile de conclure si elles présentent des différences quantifiables. Afin d'approfondir l'analyse, nous avons effectué un test d'adéquation à la loi normale. Comme les distributions semblaient visuellement proches de la loi normale, leur adéquation aurait facilité les différentes analyses. Au final, aucune des deux distributions ne suit la loi normale. Le Tableau 6.6 résume les résultats du test d'adéquation.

Tableau 6.6 : Résultat du test d'adéquation à la loi normale

	AV. RAPIBUS	AP. RAPIBUS
MOYENNE	65,75	63,57
ÉCART-TYPE	27,33	25,86
RISQUE	0,05	0,05
DDL	21	21
KHI 2 CRITIQUE	36,41	36,41
KHI 2	114 556	72 688
La distribution ne suit pas une loi normale		

Le test non paramétrique de *Kolmogorov-Smirnov* a ensuite été appliqué pour s'assurer que les distributions sont statistiquement différentes. En conclusion, **les distributions sont statistiquement différentes** (voir Tableau 6.7). Afin de cerner et de quantifier ces différences, quelques indicateurs statistiques ont été calculés. Ils sont présentés au Tableau 6.8.

Tableau 6.7 : Résultats du test Kolmogorov-Smirnov

OB. AV. RAPIBUS	1 560 969
OB. AP. RAPIBUS	1 721 746
RISQUE	0,05
VALEUR CRITIQUE	0,0015
VALEUR K-S	0,0502
Les distributions sont statistiquement différentes	

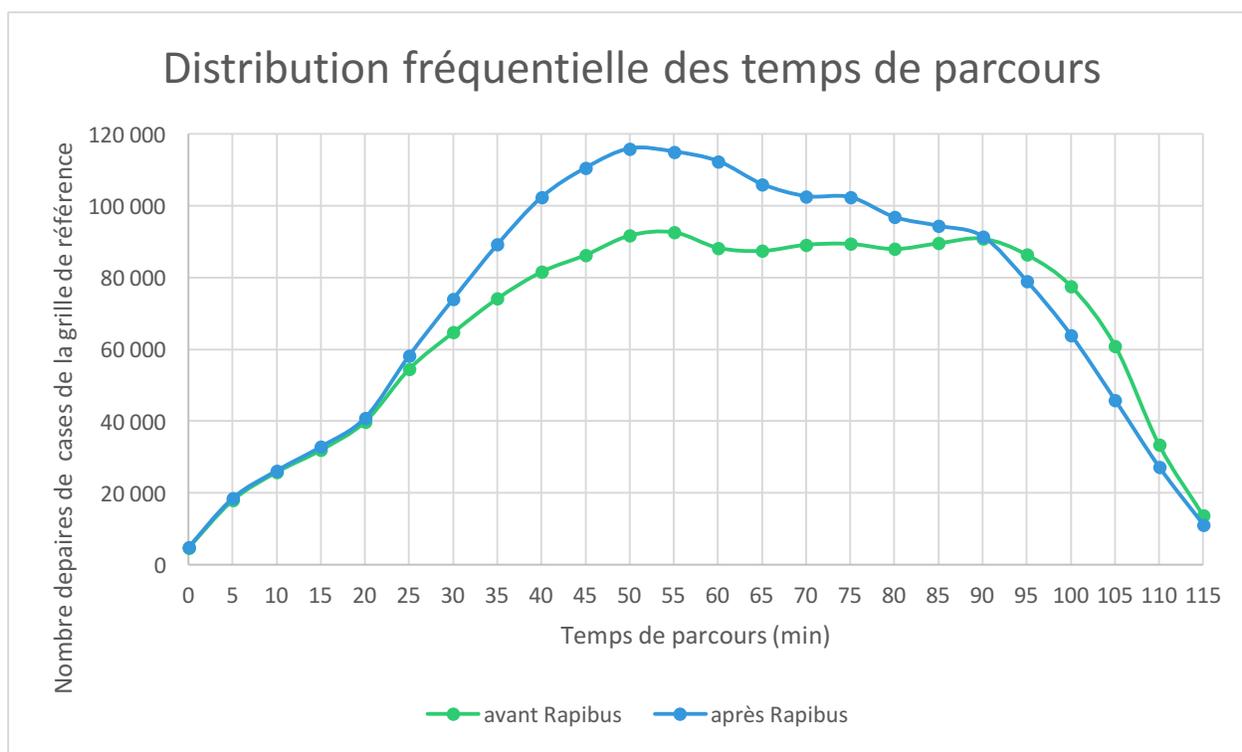


Figure 6.25 : Comparaison des distributions fréquentielles du temps de parcours des opportunités avant et après le. Rapibus

Tableau 6.8 : Indicateurs statistiques pour les temps de parcours

	AV. RAPIBUS	AP. RAPIBUS
MOYENNE	65,75	63,57
MÉDIANE	67,5	62,5
ÉTALEMENT	Gauche	Droite
ÉCART-TYPE	27,33	25,86
QUARTILES		
Q1	42,5	42,5
Q2	67,5	62,5
Q3	87,5	82,5
Q4	117,5	117,5
AFFAISSEMENT	-0,88	-0,78

Les indicateurs statistiques confirment une amélioration dans les temps de parcours moyens et médians. En moyenne, le temps de parcours des opportunités a diminué de 2,18 minutes. L'étalement de la distribution a aussi été évalué. Alors que les valeurs de la distribution avant Rapibus avaient un étalement à gauche, c'est le contraire qui est observé (étalement à droite) pour la distribution après Rapibus. Ceci signifie qu'une grande partie des valeurs se trouvent plus à gauche de l'axe horizontal (petites valeurs de temps de parcours) et qu'il y a étalement des valeurs pour les temps de parcours élevés. Les quartiles deux et trois confirment aussi une translation des valeurs vers des valeurs plus petites. Finalement, l'affaissement plus petit pour la distribution après Rapibus montre que les valeurs se situent de façon plus centrées et que moins de valeurs s'approchent des extrémités. Ceci pourrait signifier qu'il y a à la fois moins de longs trajets, mais aussi moins de trajets courts. Un retour rapide à la Figure 6.25 confirme qu'il y a en effet moins de trajets longs.

6.3.8 Temps de parcours sur le réseau

Pour confirmer les résultats prometteurs obtenus avec les temps de parcours des opportunités, le réseau de la STO a été mis à l'épreuve en utilisant les données de l'enquête Origine-Destination

2005. Les résultats pour l'évaluation de 43 625 déplacements (après pondération) en TC déclarés lors l'enquête sont présentés au Tableau 6.9.

Tableau 6.9 : Comparaison des temps de parcours sur le réseau avant et après le Rapibus

	AV. RAPIBUS	AP. RAPIBUS	ÉCART
Personnes-heures	36 940	34 800	-5,8 %
Moyenne (min)	50,8	47,9	2,9

La différence entre les temps globaux de parcours des utilisateurs sur le réseau concorde avec celle théorique obtenue avec les opportunités. On note un écart de 5,8% dans le temps total passé sur le réseau pour les utilisateurs, avec un écart de la moyenne des trajets de 2,9 minutes, très proche de la différence de 2,18 minutes obtenue pour les opportunités. L'implantation du Rapibus a donc été bénéfiques sur les temps de parcours des utilisateurs.

6.4 Discussion

La synthèse de l'étude de cas se divise en trois sous-sections. D'abord, la première fait un retour sur les indicateurs présentés et sur leur valeur dans l'analyse et la comparaison de réseaux. La deuxième sous-section fait un survol des effets de l'implantation du service Rapibus. Finalement, la troisième fait état de quelques pistes de perspectives qui pourraient améliorer les analyses effectuées lors de l'étude de cas.

6.4.1 Retour sur les indicateurs

L'étude de cas portant sur l'implantation du service Rapibus sur le réseau de la STO à l'automne 2013 offre un exemple d'application d'un cadre d'analyse basé sur trois objets d'analyse : l'arrêt, la ligne et le réseau.

Chaque niveau d'analyse démontre son utilité par l'entremise des indicateurs leur étant associés. Ainsi, l'arrêt est caractérisé par la connectivité et les opportunités aux arrêts, plus tard généralisées à une grille de référence. La notion d'opportunité se montre un outil versatile pouvant être interprété et utilisé pour calculer divers indicateurs et caractériser plusieurs aspects du réseau dont la connectivité ou les temps d'accès. Elle reste toutefois une notion théorique dont les résultats

gagnent à être comparés à la demande réelle pour valider certaines hypothèses et découvertes de résultats.

Une méthodologie d'analyse de l'accessibilité réelle d'une ligne a été proposée et appliquée sur une ligne du réseau de la STO. Cette approche offre un regard sur la problématique d'accès aux certaines parties des réseaux fortement sollicitées. Cette méthodologie est actuellement difficile à automatiser en raison des nombreux tracés existants pour une même ligne d'autobus, mais une piste de développement a été invoquée dans l'élaboration d'un tracé unique arrêt à arrêt pour des fins d'analyse.

Finalement, les indicateurs réseau présentés pour cette étude de cas font la comparaison entre les points d'offre et de demande, offre une vue d'ensemble de la notion d'opportunité avec des distributions fréquentielles. Ils généralisent aussi la notion d'opportunité avec les opportunités-personnes et montrent sa versatilité en évaluant les changements apportés aux temps de parcours avant et après Rapibus.

6.4.2 Effet du Rapibus sur l'offre de service

Globalement, le réseau de la STO a vu son nombre d'opportunités, en concordance aux hypothèses retenues, augmenté après la mise en place du service Rapibus. On note d'abord une amélioration des indicateurs classiques, notamment les véhicules-heures et véhicules-kilomètres qui sont le signe d'un ajout de service.

Les indicateurs présentés dans la suite de l'étude de cas viennent préciser les changements apportés à l'offre de service. On note d'abord une augmentation de la connectivité entre les arrêts, assurant un accès plus diversifié à l'ensemble du territoire pour les utilisateurs. Aussi, les points d'accès qui offrent le plus grand nombre d'opportunités se trouvent sur l'axe Rapibus, souvent à proximité d'un Parc-O-Bus, ce qui semble correspondre à la stratégie de développement de la STO. Les opportunités-personnes et la distribution fréquentielle des opportunités sont en hausse, mais font apparaître une baisse au niveau des opportunités directes et une augmentation de celles à deux ou trois correspondances. Les impacts de ces correspondances semblent toutefois atténués par la haute fréquence du service Rapibus qui agit comme un corridor de rabattement pour les lignes locales. En effet, les temps de déplacement ont globalement diminué, ce qui résulte en un parcours plus rapide pour la moyenne des utilisateurs.

Les correspondances affectent la perception des utilisateurs face à un trajet en transport en commun. Kaufmann et Messer (2012) ont montré que les utilisateurs surestimaient leur temps de trajet et que l'écart entre le temps de parcours réel et l'estimation tendait à augmenter avec l'ajout de correspondances. Le Transit Capacity and Quality of Service Manual (2013) présenté précédemment précise que les correspondances ajoutent une incertitude avec la possibilité de manquer le transfert entre deux lignes et quantifie cette incertitude en une pénalité allant de 12 à 17 minutes en surestimation du temps de parcours. Litman (2008) confirme aussi cette pénalité dans une fourchette de temps située entre 5 et 15 minutes. La notion de pénalité est aussi abordée par Currie (2005) en fonction de la qualité de la correspondance imposée aux utilisateurs. Une correspondance nécessitant moins de marche ou encore accompagnée d'infrastructures couvertes ou des escaliers mécaniques ont souvent une pénalité plus faible aux yeux des voyageurs. Cette notion de qualité est toutefois plus difficile à quantifier.

Une brève analyse de la sensibilité des opportunités aux correspondances a été effectuée. En conservant un temps de parcours maximal de deux heures, une pénalité de 5, 10 ou 15 minutes a été ajoutée aux temps initialement calculés. Les résultats sont présentés au Tableau 6.10.

Tableau 6.10 : Analyse de la sensibilité des opportunités
aux pénalités de correspondance (av. Rapibus)

PÉNALITÉ (MIN)	AV. RAPIBUS		AP. RAPIBUS	
	OPPORTUNITÉS	OPPORTUNITÉS- PERSONNES	OPPORTUNITÉS	OPPORTUNITÉS- PERSONNES
0	123 761 009	217 266 999 583	146 358 163	249 849 221 950
5	120 040 792	211 143 285 279	142 656 652	243 831 687 188
10	115 256 621	203 341 635 561	137 606 616	236 301 502 911
15	109 824 984	194 125 473 786	131 523 534	226 573 993 677

Cette brève analyse de la sensibilité des indicateurs d'opportunités et d'opportunités personnes aux pénalités de correspondance montre bien la pertinence d'approfondir la recherche sur les impacts possibles des correspondances sur le choix modal des utilisateurs. En effet, l'impact des pénalités est clairement visible dans les résultats, où les opportunités-personnes diminuent de l'ordre de 10% avec une pénalité de 15 minutes. Toutefois, les tendances sont similaires avant et après l'instauration du Rapibus. À première vue, l'impact de l'ajout d'une correspondance pour plusieurs

opportunités après Rapibus est donc modéré. Le niveau d'analyse à faire ne se situerait donc pas au niveau de la comparaison, mais bien de l'analyse globale de l'impact sur un service cible.

6.4.3 Perspectives d'analyse

Les analyses, principalement visuelles, sont limitées en raison de l'abondance d'arrêts souvent rapprochés dans certains secteurs. Comme les déplacements sont souvent pendulaires, les arrêts d'un côté de la rue sont utilisés lors des déplacements le matin, ceux de l'autre côté pour les déplacements en après-midi (le corridor Rapibus offre quelques exceptions). Les analyses pourraient être mieux ciblées en combinant certains arrêts, joignant l'idée des zones de destination évoquée à la section 2.4.2.

Cette exploration devrait être réalisée avant le développement des tracés uniques pour les lignes d'autobus afin de s'assurer que les deux méthodes soient implantées de façon compatible. Les résultats devraient offrir des outils de visualisation plus faciles à analyser et surtout moins encombrés visuellement. La combinaison de ces deux méthodes minimiserait par exemple les effets de deux arrêts, de part et d'autre de la rue, utilisés de façon complémentaire en début ou en fin de journée.

Il faut aussi noter que l'analyse du Rapibus offerte dans cette étude de cas ne correspond pas à une revue complète des effets de son implantation. Elle vise l'exploration de nouvelles méthodes pour enrichir les analyses classiques en ciblant certains indicateurs. Des analyses complémentaires devraient être réalisées afin de tenir compte de l'ensemble des facteurs d'influence entourant le projet du Rapibus.

CHAPITRE 7 EXPÉRIMENTATION : BDD ORIENTÉE GRAPHE

Le chemin parcouru pour aboutir à la méthodologie finale de ce projet (voir Chapitre 4) a d'abord été parsemé de diverses expérimentations. Cette exploration n'est pas partie intégrante des résultats de cette recherche, mais a toutefois permis d'orienter les discussions et de déceler les limitations des méthodes actuelles. Les découvertes effectuées durant cette étape exploratoire ont d'ailleurs été soumises pour publication dans le *Journal of Public Transportation* et ont fait l'objet d'une séance d'affichage lors du 95^e congrès annuel du TRB (Fortin, Morency et Trépanier, 2016). Les pages suivantes reprennent donc des éléments discutés dans ces publications.

La méthode exploratoire a été développée en ayant recours à une base de données orientée graphe. Les prochaines sous-sections commencent donc par définir ce qu'est une base de données orientée graphe et leur potentiel pour réaliser ce type de projet. La courte méthodologie développée est aussi détaillée, avant d'en présenter les quelques résultats préliminaires.

7.1 Base de données orientée graphe

Plusieurs des données présentes en recherche ou dans l'industrie, à l'instar des données GTFS, sont connectées (ou reliées) entre elles. Pour être utilisées, ces ensembles de données sont généralement entreposées dans des bases de données dites relationnelles. Toutefois, les bases de données relationnelles, comme le rapportent Robinson, Webber et Eifrem (2013), ont été initialement développées pour codifier des données tabulaires, mais, ironiquement, peuvent difficilement représenter et gérer les relations du monde réel qui peuvent exister entre les différentes tables de données.

Découlant de la théorie des graphes, les bases de données orientées graphe visent à combler cette lacune en proposant un modèle de stockage de données différents de ceux proposés jusqu'ici. En prenant les éléments fondamentaux de la théorie des graphes (nœuds et segments), elles stockent les données et leurs liens de façon explicite. Lors de requêtes relationnelles, le système peut parcourir uniquement les parties pertinentes du graphe plutôt que l'ensemble des données. De cette façon, les résultats peuvent être retournés plus rapidement, même avec des bases de données volumineuses.

Neo4j est le système de gestion de base de données orientée graphe le plus largement référencé et utilisé en industrie. Il intègre de nombreux algorithmes liés à la théorie des graphes permettant de

parcourir les données de différentes façons. Ces algorithmes incluent la recherche du chemin le plus court en nombre de connexions, la recherche de tous les chemins, ainsi que l'algorithme de Dijkstra pour tenir compte du poids des liens. Une interface de programmation (*API*) est disponible pour interagir avec les algorithmes et des greffons ont été développés pour s'intégrer avec les langages de programmation les plus répandus (i.e. : Python, Java, Ruby). (Neo4j, s.d.)

À la façon d'un logiciel SIG, différents greffons se rapportant aux bases de données relationnelles facilitent les analyses spatiales effectuées directement sur les données contenues dans les tables. On note principalement Oracle Spatial pour le système Oracle, MySQL Spatial pour le système Mysql et PostGIS pour le système PostgreSQL. Seul SQL Server inclut *de facto* des fonctions spatiales. Neo4j Spatial fait office de greffon pour le système de base de données orientée graphe Neo4j. Sans être aussi complet que son homologue PostGIS, il permet entre autres d'importer des *Shapefiles* et des fichiers de format OSM (OpenStreetMap) et inclut diverses fonctions spatiales de base (Baas, 2012).

7.2 Méthodologie

La méthodologie proposée vise à expérimenter les fonctionnalités mises de l'avant par les bases de données orientées graphe et à évaluer leur potentiel dans l'analyse de l'offre d'un réseau de transport en commun. Suite aux lectures effectuées, l'hypothèse initiale supposait que ce système devait proposer un temps de traitement relativement faible et fournir une méthode alternative efficace pour évaluer différents indicateurs.

La méthodologie comporte quelques éléments qui ont été repris plus largement dans le profil final de la recherche. Un bref aperçu de la méthodologie initiale misant sur les bases de données orientées graphe est proposé. Elle se décompose en quatre étapes.

1. Évaluation des indicateurs classiques

Une revue des indicateurs typiques présents dans la littérature a permis d'identifier leur rôle commun de caractérisation générale d'un réseau. Ainsi, une sélection de ces indicateurs a été évaluée pour d'abord obtenir une vue d'ensemble du réseau et offrir un contexte nécessaire aux analyses subséquentes.

2. Modélisation d'un graphe à partir des données horaires

Pour des fins d'importation et de traitement, les données GTFS, d'abord fournies sous une forme tabulaire, ont été modélisées en un graphe suivant la *modélisation temporelle étendue* (voir section 2.4.4.2). Ce modèle est plus versatile pour l'intégration des données GTFS et offre plus de flexibilité pour le développement d'indicateurs. Aussi, il s'intègre mieux avec les algorithmes proposés par Neo4j.

3. Importation dans une base de données orientée graphe

En suivant le schéma présenté à la Figure 2.3 B), un script Ruby a été développé pour automatiser l'importation des données GTFS au sein de Neo4j. Celui-ci prend les données tabulaires importées précédemment dans une base de données PostgreSQL, puis crée les nœuds avant de les relier avec les liens appropriés.

4. Développement d'indicateurs orientés graphe

Les indicateurs présentés sont basés sur le calcul du chemin le plus court entre chaque paire de nœud de départ et de nœud d'arrivée du graphe. Les résultats proposés par Neo4j se basent sur l'exécution de l'algorithme de Dijkstra.

7.3 Résultats préliminaires

Un petit réseau de transport de la région métropolitaine de Montréal est utilisé pour présenter les résultats obtenus. Le réseau du Conseil Intermunicipal de Transport de Chambly-Richelieu-Carignan (CITCRC) offre un service local au sein des villes de Chambly, Richelieu et Carignan, en plus d'un service de navette vers le centre-ville de Montréal. Le CITCRC utilise 10 autobus voyageurs, 12 autobus de ville et 2 taxibus pour desservir environ 45 000 habitants. (CITCRC, 2015).

Pour caractériser le service offert par le CITCRC et offrir une certaine comparaison, nous avons évalué de façon séparée les services en semaine et du samedi. Toutefois, le temps de calcul nécessaire pour évaluer l'ensemble des chemins les plus courts est la principale limitation de cette méthodologie (voir section 7.3.3). Il nous était donc impossible de calculer l'ensemble des chemins les plus courts entre chacune des 7 millions de paires Départ-Arrivée du service en semaine.

Pour parvenir à traiter ce grand nombre d'informations, plusieurs échantillons de 1 000 paires d'arrêts d'autobus ont été sélectionnés aléatoirement. Pour chaque paire d'arrêts, le chemin le plus court entre chaque Départ-Arrivée propre à cette paire d'arrêt a été calculé. Le service du samedi ne posant pas de problème majeur, l'ensemble des chemins les plus courts ont été évalués.

Ensuite, les résultats obtenus ont été analysés en suivant les trois niveaux d'analyse suivants : l'arrêt, la ligne et le réseau. Premièrement, les indicateurs classiques sont présentés, suivis des indicateurs orientés graphe.

7.3.1 Indicateurs classiques

Le Tableau 7.1 présente une liste d'indicateurs classiques, ainsi que leur valeur. La colonne *Note* propose certaines variations d'un indicateur alors que la colonne *Prérequis* liste les fichiers ou sources d'information additionnelles nécessaires au calcul de cet indicateur.

Les équations suivantes précisent de quelle façon certains de ces indicateurs ont été calculés.

$$D = \frac{\sum L_i}{\sum S_i} \quad (\text{éq. 1})$$

où
 D : Distance moyenne entre deux arrêts
 L_i : Longueur de la ligne d'autobus
 S_i : Nombre d'arrêt d'autobus desservant la ligne d'autobus

$$T = \frac{\sum t_b - t_a}{\sum S_i} \quad (\text{éq. 2})$$

où
 T : Temps de parcours moyen entre deux arrêts
 t_a : Heure de départ de la ligne
 t_b : Heure d'arrivée en fin de ligne
 S_i : Nombre d'arrêt d'autobus desservant la ligne d'autobus

Les résultats décrivent globalement le réseau et sa portée, mais demeurent toutefois limités quant aux interactions entre chacun des éléments. En considérant que les indicateurs pourraient gagner en précision et représenter mieux certains aspects (i.e. : fréquence ou longueur des lignes de bus), ils ne peuvent, à eux seuls, diagnostiquer de façon exhaustive le réseau. De plus, les requêtes nécessaires pour effectuer les calculs deviennent rapidement plus compliquées à mesure que les besoins d'un niveau de détails plus important augmentent. Finalement, des indicateurs plus précis nécessitent souvent des sources de données complémentaires.

7.3.2 Indicateurs orientés graphe

Les indicateurs orientés graphe se basent sur le même cadre d'analyse présenté dans la méthodologie générale du projet de recherche. Les indicateurs sont divisés selon trois niveaux d'analyse : l'arrêt, la ligne et le réseau.

Tableau 7.1: Indicateurs calculés à l'aide des données GTFS et d'une base de données SQL

INDICATEUR	VALEUR	NOTE	PRÉREQUIS
Longueur du réseau de TC	40,25 km	Agrégation en fonction des lignes, du type de ligne ou du mode de transport selon la disponibilité des données.	GTFS : Shapes.txt ou le champ stop_distance_traveled.
Nombre d'arrêts	365	Agrégation en fonction des lignes, du mode de transport ou du territoire, selon la disponibilité des données.	Territoire : Données sur les limites territoriales.
Nombre d'heures de service quotidiennes (en semaine)	19	L'agrégation des données pourrait représenter les heures de service quotidiennes pour chaque ligne.	Aucun
Distance moyenne entre deux arrêts	0,89 km	Agrégation en fonction des lignes, du mode de transport ou du territoire, selon la disponibilité des données.	Aucun
Temps de parcours moyen entre deux arrêts	3,37 min	Temps de parcours pour deux arrêts consécutifs.	Aucun
Couverture territoriale des arrêts (rayon de 500m)	27,5%	Prend en compte l'emplacement des arrêts seulement et n'inclut aucune considération de la fréquence de service.	Territoire : Données sur les limites territoriales.

7.3.2.1 Niveau d'analyse : Arrêt

Les arrêts d'autobus (ou toute autre station) représentent le point d'accès de l'ensemble des usagers de transport en commun. Comme les usagers interagissent avec ces arrêts, souvent de façon quotidienne, il est important de comprendre leur impact sur l'efficacité et la productivité du réseau. Deux concepts clés sont abordés : la connectivité et la fréquence. Premièrement, la Figure 7.1 aborde la dynamique existante entre les différentes paires d'arrêts. La proportion de paires d'arrêts actives est illustrée pour une journée de semaine typique (à l'aide de 10 échantillons indépendants) et pour un Samedi. Une paire d'arrêts est définie comme une combinaison de n'importe quels deux arrêts du réseau, peu importe leur position, les routes qu'ils desservent ou de leur connectivité. Puisque la direction est considérée, deux arrêts distincts peuvent générer deux paires différentes. Une paire d'arrêt est définie comme active si les arrêts la formant sont liés par au moins un trajet, sans égard aux transferts effectués. Une durée maximale de 2 heures est imposée pour l'inclusion des trajets dans les résultats. Les résultats sont ensuite agrégés en fonction du temps de départ. Pour les échantillons, le pourcentage de paires actives est calculé sur le total de paires du sous-ensemble de données.

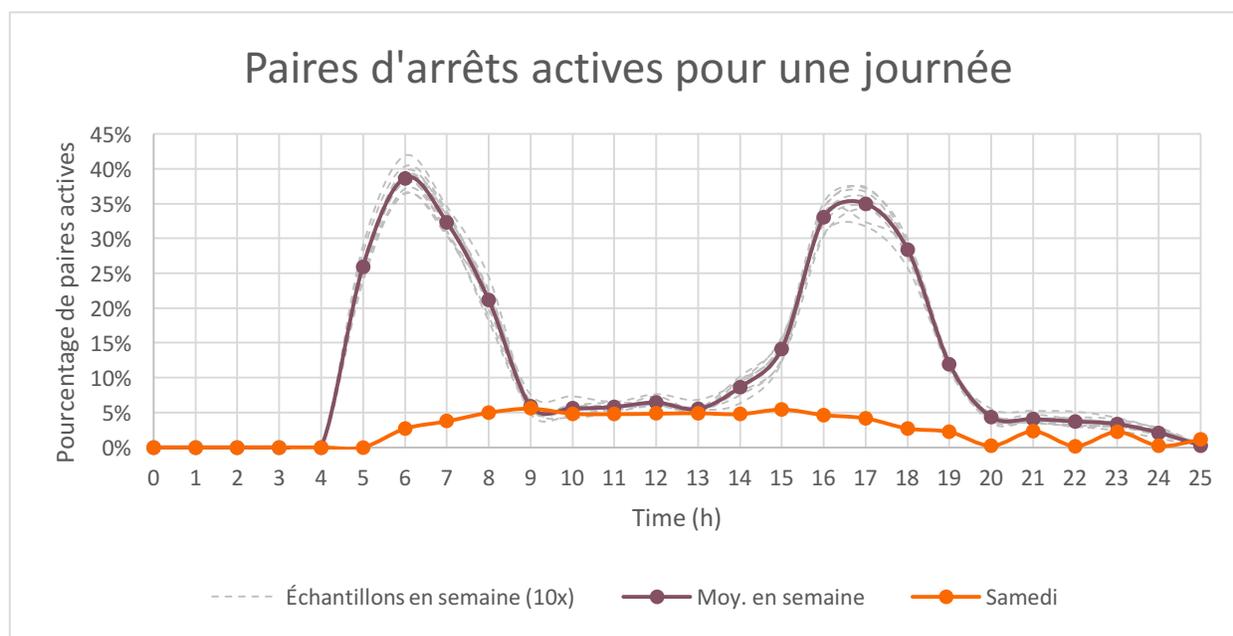


Figure 7.1: Paires d'arrêts actives durant une journée

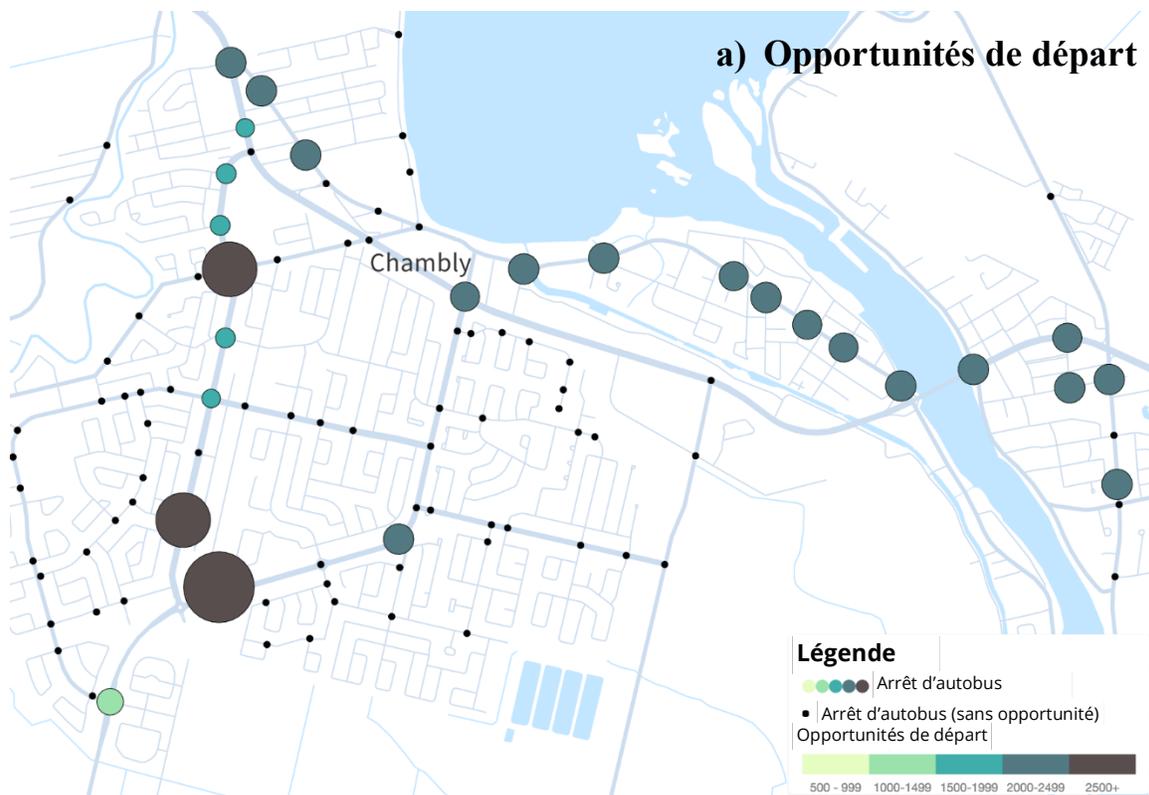
La Figure 7.1 met en lumière quelques observations intéressantes :

- Les échantillons pour les jours de semaine montrent une tendance similaire avec une certaine variabilité.
- Conformément aux attentes, les deux périodes de pointe sont facilement identifiables sur la ligne représentant la moyenne en semaine. La pointe du matin est plus concentrée que celle en après-midi, ce qui est cohérent avec les profils de demande typiques de la région.
- La variation des paires actives les samedis soirs est due à l'irrégularité du service offert. Une baisse de service pour certaines heures est visible en raison des fréquences de passage qui ne sont pas distribuées également dans le temps.
- Les arrêts d'autobus sont en grande partie situés dans l'une des trois municipalités, avec quelques arrêts au centre-ville de Montréal. Lorsque les pourcentages du graphique sont élevés, un meilleur service de TC local est offert, alors qu'un faible pourcentage indique des trajets plus directs vers Montréal et une plus faible desserte des arrêts locaux.
- Les pourcentages plafonnent à près de 40% durant la semaine et à 6% les samedis. En prenant en considération que le CITCRC possède un petit réseau qui assure le déplacement des travailleurs des villes de petite taille vers le centre-ville de Montréal, ces valeurs indiquent que plusieurs arrêts locaux ne sont pas connectés, réduisant ainsi la connectivité interne globale du réseau.

Le second indicateur se rapporte à l'étendue du service offert à chaque arrêt. La Figure 7.2 présente les opportunités de déplacements aux arrêts pour une journée complète (service du samedi). Dans ce contexte, l'existence d'un trajet entre deux arrêts pour une certaine heure de départ définit une opportunité. En conséquence, un simple départ pourrait générer plusieurs opportunités ayant différentes destinations, comme spécifié en détail à la section 5.1.1. Les résultats révèlent certains faits intéressants :

- Globalement, la tendance des opportunités de départ et d'arrivée est similaire, avec quelques différences aux niveaux de l'amplitude des valeurs.
- La notion d'opportunité considère la fréquence de service et les destinations accessibles en fonction d'une plage horaire.
- La notion d'opportunité laisse place à plusieurs analyses intéressantes pour des réseaux plus complexes ou pour un service en semaine complet comme la comparaison de l'accessibilité

d'un secteur en fonction de différents points d'origine ou la segmentation en fonction d'une plage horaire. Toutefois, l'algorithme utilisé dans le cadre de cette exploration ne supporte pas des ensembles de données aussi larges.



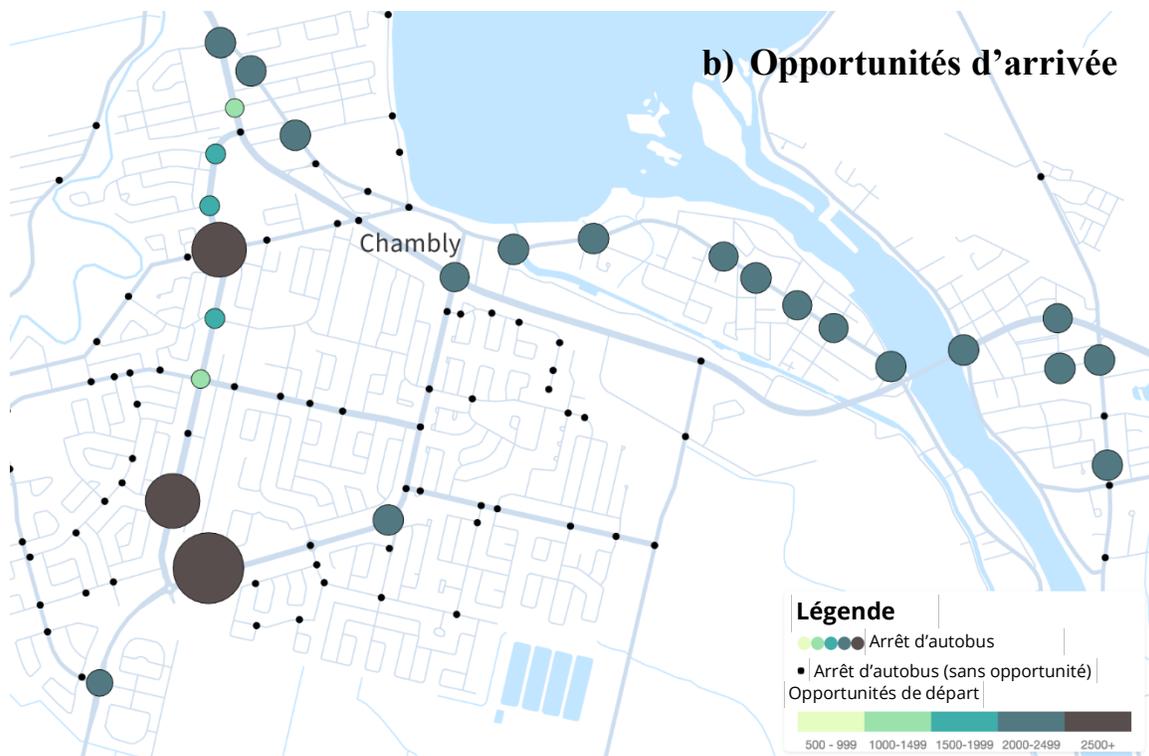


Figure 7.2: Étendue du service pour chaque arrêt (service du samedi)

a) Opportunités de départ b) Opportunités d'arrivée

7.3.2.2 Niveau d'analyse : Réseau

Les différentes paires d'arrêts peuvent être connectées par plus d'une ligne d'autobus. La distance totale parcourue et la durée du déplacement varient en fonction du trajet sélectionné. En conséquence, la vitesse commerciale varie aussi selon, par exemple, le nombre d'arrêts et les conditions routières.

D'un aspect opérationnel, l'analyse des vitesses commerciales par tronçons routiers en fonction du temps de départ peut être intéressante. Les agences de transport en commun veulent en général augmenter la vitesse commerciale, alors que les utilisateurs veulent également éviter les segments avec une vitesse faible. Ainsi, la vitesse commerciale constitue un bon point de comparaison pour évaluer l'efficacité d'un réseau pour une journée typique, mais aussi pour suivre son évolution au cours du temps. Les vitesses commerciales sont calculées à partir des temps de passage aux arrêts déclarés et de la distance des parcours, tous inscrits dans les fichiers GTFS. Ainsi, cette analyse permet de vérifier si les données fournies dans les fichiers GTFS sont cohérentes avec les périodes

de pointe ou si elles changent en fonction des conditions routières locales. La Figure 7.3 montre la vitesse commerciale moyenne par segment pour le service du samedi.

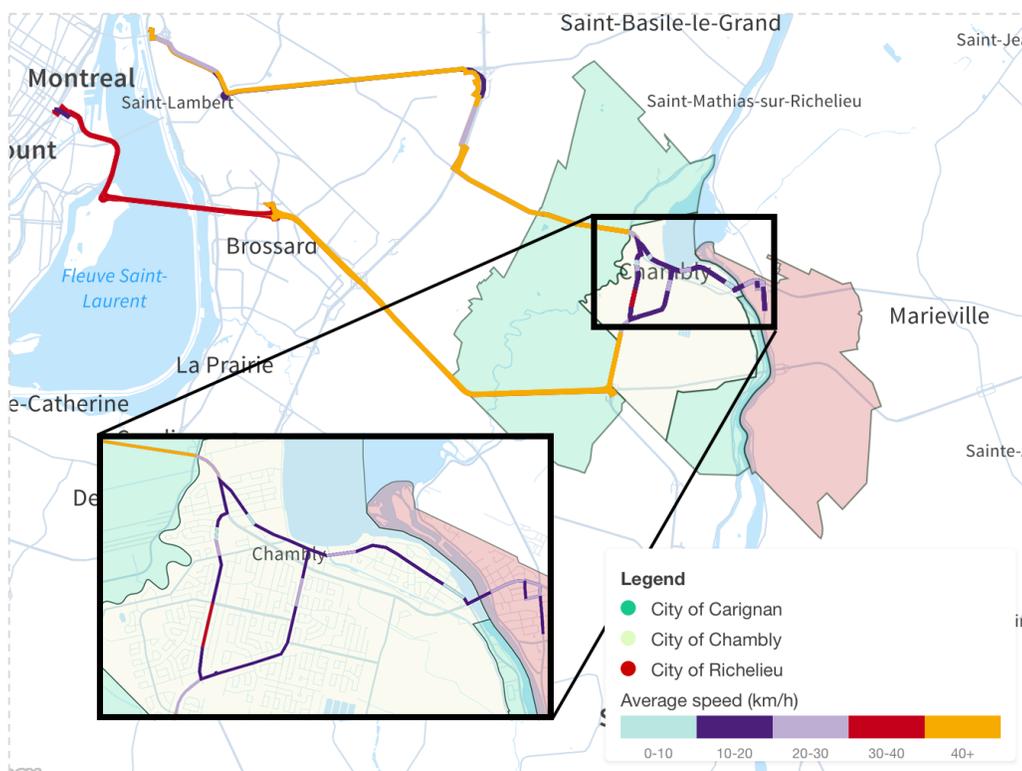


Figure 7.3: Vitesse commerciale pour le service du samedi

Les résultats montrent une différence marquée dans les vitesses le long des segments. Les vitesses commerciales demeurent considérablement faibles pour les routes locales (près de la ville de Chamby) et légèrement à la hausse sur les segments autoroutiers. Néanmoins, la vitesse commerciale observée maximale se situe sous la barre des 70 km/h et pourrait être améliorée sur certains segments autoroutiers. En mettant en évidence les segments routiers problématiques et en y superposant des données externes (i.e. : trafic, voie réservée pour autobus), les analyses faites peuvent fournir des informations pertinentes à l'optimisation du service et au développement de stratégies de planification.

7.3.3 Conclusions tirées de l'exploration

L'exploration conduite dans les premiers balbutiements du projet a permis de confirmer le potentiel des données GTFS dans un autre objectif que la distribution de l'information au client, dont la caractérisation de réseau.

Le cadre d'analyse basé sur les objets (arrêt, ligne et réseau) s'est aussi démontré comme une façon efficace d'ordonner les analyses et s'est vu réimplanté dans la méthodologie générale du projet de recherche.

Les principaux apprentissages s'articulent toutefois autour de la méthode orientée graphe. La méthode et la modélisation se sont avérées efficaces et intuitives. La définition des indicateurs et des analyses basées sur la notion de graphe (notamment les opportunités) a dû être revue lorsque l'algorithme proposé par Neo4j a été abandonné au profit d'un calculateur de trajet plus classique. Au final, c'est cet algorithme qui représente la grande limitation de la méthode utilisée. Comme les bases de données orientées graphe sont une technologie en plein développement, plusieurs produits ne sont pas pleinement développés et sont encore peu flexibles quant à leur utilisation. Ainsi, chaque exécution de l'algorithme de Dijkstra proposé par Neo4j doit recalculer la totalité de l'arbre des coûts pour chaque exécution. En raison de la grande quantité de paires Départ-Arrivée, le calcul de tous les chemins les plus courts prend un temps considérable, même pour un réseau de la taille de cette expérimentation. Pour soutenir les calculs d'un grand réseau de TC, ces algorithmes devraient être optimisés et permettre une certaine flexibilité quant à la sortie des résultats.

CHAPITRE 8 CONCLUSION

L'objectif de cette recherche était de développer un cadre d'analyse permettant le diagnostic systématique d'un réseau de transport en commun à l'aide des données GTFS en valorisant d'abord l'utilisation des données GTFS, puis en proposant un ensemble d'indicateurs spatiotemporels pour caractériser une offre de transport en commun. Ce dernier chapitre se décline en quatre sous-sections : 1) une synthèse des travaux ayant mené à sa réalisation, 2) les contributions méthodologiques et analytiques du projet, 3) les limitations associées à la méthodologie qui laisse finalement place 4) aux perspectives de recherche en fin de section.

8.1 Synthèse des travaux

D'abord, la revue de littérature réitérait l'importance des réseaux de TC en milieu urbain en soulignant le rôle structural de ces réseaux quant au développement de la trame urbaine et de ses impacts positifs sur les habitudes de vie des résidents. Elle proposait aussi les méthodes actuelles de conception et d'analyse des réseaux. La norme GTFS a aussi été présentée, allant de sa syntaxe aux utilisations classiques et innovatrices répertoriées. Un survol de l'analyse des données de cartes à puce a aussi été fait, afin de montrer les avantages d'enrichir les données GTFS pour caractériser l'offre de service. Finalement, on y présentait un large inventaire des indicateurs de performance, classiques, évolués et découlant de la théorie des graphes. On a principalement retenu que les indicateurs classiques sont statiques et ne peuvent à eux seuls bien cerner l'ensemble des facteurs liés à un réseau de TC.

Ensuite, une description détaillée des ensembles de données utilisés a été proposée. On y décrivait notamment les ensembles de données GTFS de la STO et de la CITCRC. Les données de cartes à puce y étaient présentées, avant de décrire brièvement les ensembles de données complémentaires du réseau routier, de la délimitation des villes et de l'enquête Origine-Destination.

Puis, la méthodologie générale du projet a été présentée. Celle-ci expliquait de quelle façon les données GTFS et de cartes à puce ont été validées avant de les importer dans la base de données. Trois objets d'analyse ont ensuite été identifiés : l'arrêt, la ligne et le réseau. Finalement, on y précisait la méthode pour le développement des indicateurs et leur généralisation pour des fins de comparaison, avant d'identifier quelques détails sur l'automatisation de la méthode.

Quatrièmement, les aspects plus techniques ont été apportés avec le développement des indicateurs. Quatre indicateurs ont été développés, en mettant d'abord l'emphase sur la notion d'opportunité qui, étant flexible, permet d'en dériver plusieurs indicateurs. Le concept d'accessibilité a aussi été présenté et expliqué à l'aide d'un exemple simple. Finalement, la compétitivité des modes a été abordée avec la mention de l'indicateur de directitude et de vulnérabilité des utilisateurs face aux alternatives.

Cinquièmement, la méthodologie générale a été mise à l'épreuve avec une étude de cas portant sur l'instauration du Rapibus sur le réseau de la STO à l'automne 2013. Cette étude a permis de montrer l'utilité, mais aussi les limitations des indicateurs classiques à fournir une vue d'ensemble d'un réseau. Le potentiel d'utilisation de la notion d'opportunité et surtout sa capacité à caractériser de façon systématique un réseau de TC ont ensuite été abordés. Les impacts avant et après Rapibus ont aussi été évalués en terme de directitude, d'opportunités, d'opportunités-personnes, d'accessibilité réelle et en comparant les temps de parcours des opportunités et sur le réseau.

Finalement, un retour en arrière a été fait, portant sur l'exploration effectuée en début de projet. Une synthèse de la méthodologie axée sur les bases de données orientées graphe a été présentée, accompagnée de ses avantages et ses limitations. Des exemples d'indicateurs orientés graphe y étaient aussi présentés dans une étude de cas du réseau du CITCRC. Au final, on expliquait comment cette exploration a façonné le projet final et guidé plusieurs choix méthodologiques.

8.2 Contributions

Les contributions apportées par le présent projet se situent à trois niveaux. Premièrement, ce projet permet de combler une lacune dans la littérature existante en mettant en relation diverses préoccupations entourant les réseaux de transport en commun dans un même environnement et alimenter la réflexion sur leur intégration dans un cadre d'analyse. Plusieurs ouvrages présentent des guides d'évaluation des performances d'un réseau ou encore l'exploration de nouveaux indicateurs de caractérisation, mais rarement les deux. Cette revue de littérature fait la balance entre ces deux cibles et montre comment l'ensemble des facteurs d'analyse peuvent être intégrés au sein d'un même projet.

Deuxièmement, il apporte des contributions de nature méthodologique. Le Chapitre 4 propose une méthodologie systématique pouvant s'appliquer à n'importe quel réseau de TC, pour peu que les

données soient disponibles dans le format GTFS. Les données sont ensuite importées dans un outil de gestion de données GTFS (Transcasapp) dans l'optique de développer un outil intégré de gestion et d'analyse des réseaux de TC. Le développement des indicateurs offre aussi une réflexion sur l'intégration des différents concepts liés aux réseaux en un indicateur synthèse. C'est la notion d'opportunité qui permet d'intégrer l'accessibilité statique, la fréquence de passage et les destinations accessibles et d'en dériver une série d'indicateurs variés. Aussi, plusieurs indicateurs ont été généralisés de façon à permettre une comparaison entre deux états (ou scénario) d'un même réseau et à terme de comparer deux réseaux indépendants sur une base commune.

Finalement, ce projet apporte également des contributions analytiques. Les résultats finaux proposent un cadre d'analyse basé sur trois objets : l'arrêt, la ligne et le réseau. Ce cadre est hautement adaptatif au contexte unique de chaque réseau de TC, mais permet de conserver une structure comparative pour évaluer différents projets. Ce projet met aussi de l'avant une étude de cas, montrant le potentiel réel des indicateurs proposés et offrant un aperçu des nombreuses opportunités d'évolution de la méthodologie.

8.3 Limitations

Quatre principales limites méritent d'être soulignées.

1) Indicateurs et théorie des graphes

La méthode initialement explorée (voir Chapitre 7) se concentrait sur l'utilisation de la théorie des graphes dans le but de caractériser un réseau de TC. Cette méthode faisait appel à des outils n'étant pas optimisés dans une optique de recherche (et plutôt dans une optique opérationnelle). Ainsi, cette approche a été mise de côté malgré son potentiel analytique. Pour cette raison, les indicateurs présentés au Tableau 2.1 ne sont finalement pas évalués, analysés et comparés faute de disposer d'un graphe fonctionnel avec le réseau de la STO.

2) Cerner l'ensemble des besoins

L'objectif initial de la recherche était relativement large : caractériser de façon systématique un réseau de transport en commun. La solution proposée est certainement un avancement dans la bonne direction, mais ne couvre pas l'ensemble de la problématique. Sans un objectif d'analyse précis, cerner tous les besoins et les indicateurs liés pose un défi important. Les indicateurs proposés dans le cadre de ce projet sont le résultat d'une réflexion visant à baliser l'analyse générale d'un réseau d'un point de vue de l'opérateur. Afin de considérer et de répondre à toutes les préoccupations des agences, des discussions et des ajustements d'indicateurs restent à développer.

3) Intégration et analyse des correspondances

D'un point de vue de l'utilisateur, les correspondances sont souvent un inconvénient et influent dans le choix modal ou dans le choix d'un trajet. La méthode actuelle ne prend pas en considération les correspondances ou encore la qualité de ces correspondances (facilité de correspondre entre deux lignes d'autobus, sécurité, accessibilité universelle).

En appliquant une pénalité de correspondance pour les trajets, les résultats concernant les opportunités pourraient être influencés. La notion de qualité de correspondance devrait prendre une grande place dans cette recherche, en particulier en présence d'une ligne de rabattement comme le service Rapibus qui tend à faire augmenter le nombre de correspondances nécessaires à un trajet.

4) Comparaison de réseaux distincts

L'approche par grille utilisée dans le cadre de cette recherche permet de facilement comparer deux scénarios d'un même réseau où les grilles de référence se superposent de façon égale sur le territoire. La comparaison de deux réseaux différents demeure encore difficile et une réflexion supplémentaire devrait être faite pour assurer une base comparative valide. Cette généralisation de la méthode permettrait d'effectuer un étalonnage entre les différents réseaux en suivant une méthode d'analyse systématique.

8.4 Perspectives

L'analyse de réseaux de transport en commun est un sujet complexe impliquant de nombreux enjeux et divers points de vue, laissant place du même coup à de nombreuses perspectives de recherche et de perfectionnement méthodologique.

Avant même de penser à développer de nouveaux indicateurs ou d'impliquer de nouvelles variables, une étude de sensibilité des hypothèses posées jusqu'à maintenant devrait être réalisée. Il s'agit entre autres des hypothèses d'inclusion des opportunités (durée maximale de 2 heures, exclusion de la marche unique) qui constituent une notion centrale aux analyses et dans le choix de la journée d'analyse (ici un lundi d'octobre).

Les indicateurs proposés pourraient aussi être approfondis en incluant diverses formes de pondération des résultats. On pense notamment à une pondération des résultats en fonction d'une charge présumée sur le réseau. Ainsi, une ligne ou un arrêt plus utilisé pourrait obtenir un poids plus important sur l'analyse globale. Le même raisonnement pourrait être fait en fonction de la densité de population ou autres facteurs d'analyse jugés pertinents à la pondération.

Aussi, la théorie des graphes présentait un bon axe de recherche pour l'analyse des réseaux en TC. Une perspective de recherche intéressante serait de modifier les algorithmes des bases de données orientées graphe afin de comparer les résultats obtenus avec les méthodes conventionnelles et d'adapter les indicateurs listés en revue de littérature à une complexité plus grande.

Finalement, un axe de recherche potentiel important se situe au niveau de la combinaison des données de demande. En effet, étudier l'offre de transport en commun vise principalement à développer une connaissance permettant de mieux comprendre la demande observée et latente. On pense notamment à expliquer l'apparition de nouveaux clients (en comparant les nouvelles cartes dans le système) ou à analyser les changements dans les habitudes de déplacement à la suite d'une modification de l'offre de service. Il est possible que de nouveaux points d'entrée dans le réseau (arrêt, station) changent les choix modaux. Cette grande connaissance de l'offre et éventuellement une meilleure compréhension joueront un rôle important dans la modélisation des phénomènes de transport, notamment au niveau des modèles de choix modaux.

BIBLIOGRAPHIE

- Agence Métropolitaine de Transport. (2015). Enquête Origine-Destination 2013 : La mobilité des personnes dans la région de Montréal. Tiré de <https://www.amt.qc.ca/Media/Default/pdf/section8/enquete-od-2013-mobilite-personnes-region-montreal.pdf>
- Al Mamun, M. et Lownes, N. E. (2011). A composite index of public transit accessibility. *Journal of Public Transportation*, 14(2), 69–87. doi:10.5038/2375-0901.14.2.4
- Anderson, P., Owen, A. et Levinson, D. (2012). *The Time Between: Continuously-defined accessibility functions for schedule-based transportation systems*. Communication présentée au 1st European Symposium on Quantitative Methods in Transportation Systems, Lausanne, Suisse. Tirée de <http://nexus.umn.edu/papers/TheTimeBetween.pdf>
- Antrim, A. et Barbeau, S. J. (2013). The many uses of GTFS data—opening the door to transit and multimodal applications. *Location-Aware Information Systems Laboratory at the University of South Florida*. Tiré de <https://www.locationaware.usf.edu/wp-content/uploads/2010/02/The-Many-Uses-of-GTFS-Data-%E2%80%93-ITS-America-submission-abbreviated.pdf>
- Baas, B. (2012). NoSQL spatial – Neo4j versus PostGIS. (Mémoire de maîtrise, Université d'Utrecht, Pays-Bas). Tiré de <http://dspace.library.uu.nl/handle/1874/253635>
- Beaudet, G., Morency, C., Sioui, L. Wolff, P. (2010). Étude sur la contribution du transport en commun au développement durable. Tiré de http://atuq.com/Portals/0/ressources/Publications/Etudes/ET_contribution_transport_comm_un_developpement_durable_2010_neuf_societes.pdf
- Bourbonnais, P.L. (2015). Transcasapp Démo AQTr [Vidéo en ligne]. Tiré de <https://vimeo.com/117742667>
- Catala, M. (2011). Expanding the Google Transit Feed Specification to Support Operations and Planning. Tiré de <http://www.nctr.usf.edu/wp-content/uploads/2012/02/77902.pdf>
- Calthorpe, P. (1993). *The Next American Metropolis*. New-York : Princeton Architectural Press.

- Ceder, A. (2007). *Public Transit Planning and Operation: Theory, Modeling and Practice*. Oxford : Taylor & Francis.
- Ceder, A. et Teh, C. S. C. (2010). Comparing public transport connectivity measures of major New Zealand cities. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2143(1), 24-33. doi:10.3141/2143-04
- Cervero, R., Murphy, S., Ferrel, C., Goguts, N., Tsai Y.-H., ... Witenstein, Nicole. (2004). *Transit-oriented Development in the United States : Experiences, Challenges, and Prospects (Rapport n° 102)*. Washington, D.C. : Transit Cooperative Research Program. Tiré de http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/tcrp/tcrp_rpt_102.pdf
- Chambre de Commerce du Montréal Métropolitain. (2010). *Le Transport en Commun : Au cœur du développement économique de Montréal*. Tiré de http://www.ccm.ca/documents/etudes/2010_2011/10_11_26_ccmm_etude-transport_fr.pdf
- Chapleau, R., Allard, B. et Trépanier, M. (1996). Transit path calculation supported by special geographic information system-transit information system. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1521, 98–107. doi:10.3141/1521-14
- Chen, A., Yang, C., Kongsomsaksakul, S. et Lee, M. (2006). Network-based Accessibility Measures for Vulnerability Analysis of Degradable Transportation Networks. *Networks and Spatial Economics*, 7(3), 241–256. doi:10.1007/s11067-006-9012-5
- Chen, X., Yu, L., Zhang, Y. et Guo, J. (2009). Analyzing urban bus service reliability at the stop, route, and network levels. *Transportation Research Part A*, 43(8), 722–734. doi:10.1016/j.tra.2009.07.006
- Cipriani, E., Gori, S. et Petrelli, M. (2012). Transit network design: A procedure and an application to a large urban area. *Transportation Research Part C*, 20(1), 3-14. doi:10.1016/j.trc.2010.09.003
- CITCRC. (2015) Statistiques. Tiré de <http://www.monblus.ca/CITStatistics.aspx>.
- Collectivités Viabes. (s.d.). *Réseau Structurant de Transport en Commun*. Consulté le 26 janvier 2016. Tiré de <http://collectivitesviabes.org/articles/reseau-structurant-de-transport-en-commun/>

- Corriveau, J. (7 avril 2016). Montréal obtient 775 millions du fédéral pour son réseau. *Le Devoir*. Tiré de <http://www.ledevoir.com/politique/montreal/467419/775-millions-pour-les-transports-en-commun-dans-le-grand-montreal>
- Currie, G. (2005). The demand performance of bus rapid transit. *Journal of Public Transportation*, 8(1), 41–55. doi:10.5038/2375-0901.8.1.3
- Currie, G. (2010). Quantifying spatial gaps in public transport supply based on social needs. *Journal of Transport Geography*, 18(1), 31–41. doi:10.1016/j.jtrangeo.2008.12.002
- Derrible, S. et Kennedy, C. (2009). Network Analysis of World Subway Systems Using Updated Graph Theory. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2112, 17–25. doi:10.3141/2112-03
- Derrible, S. et Kennedy, C. (2011). Applications of graph theory and network science to transit network design. *Transport Reviews*, 31(4), 495–519. doi:10.1080/01441647.2010.543709
- Dibbelt, J., Pajor, T., Ben Strasser et Wagner, D. (2013). Intriguingly Simple and Fast Transit Routing. Dans *Experimental Algorithms* (vol. 7933, pp. 43–54). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-38527-8_6
- Dionne, V. (2006). Diagnostic et performance d'une ligne de train de banlieue à l'aide de données GPS. (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal, Québec). Tiré de http://www.cubiq.ribg.gouv.qc.ca/in/faces/details.xhtml?id=p%3A%3Ausmarcdef_0000954402
- Eboli, L. et Mazzulla, G. (2009). A New Customer Satisfaction Index for Evaluating Transit Service Quality. *Journal of Public Transportation* 12(3), 21-37. Tiré de <http://nctr.usf.edu/jpt/pdf/JPT12-3Eboli.pdf>
- Eboli, L. et Mazzulla, G. (2012). Performance indicators for an objective measure of public transport service quality. *European Transport* 51(1). Tiré de https://www.openstarts.units.it/dspace/bitstream/10077/6119/1/ET_2012_51_3%20-%20Eboli%20e%20Mazzulla.pdf
- ÉvoluCité. (2011). Laval 2031. Une ville en mouvement. Plan de mobilité durable. Tiré de <http://www.laval.ca/Documents/Pages/Fr/Citoyens/urbanisme-et-zonage/plan-mobilite-durable-consultation.pdf>

- Farber, S., Morang, M. Z. et Widener, M. J. (2014). Temporal variability in transit-based accessibility to supermarkets. *Applied Geography*, 53(C), 149–159. doi:10.1016/j.apgeog.2014.06.012
- Ferrari, L., Berlingiero, M., Calabrese, F. et Curtis-Davidson, B. (2013). Measuring Public-Transport Accessibility Using Pervasive Mobility Data. *Ieee Pervasive Computing*, 12(1), 26–33. doi:10.1109/ITSC.2009.5309679
- Ferris, B., Watkins, K. et Borning, A. (2011). OneBusAway: Behavioral and Satisfaction Changes Resulting from Providing Real-Time Arrival Information for Public Transit. Communication présentée au *90th Transportation Research Board Annual Meeting*.
- Fortin, P., Morency, C. et Trépanier, M. Innovative Use of GTFS Data for Transit Network Analysis Using a Graph-Oriented Method. Séance d’affichage présentée à : TRB 95th Annual Meeting; 2016 Jan 10-14; Washington, D.C.
- Fransen, K., Neutens, T., Farber, S., De Maeyer, P., Deruyter, G. et Witlox, F. (2015). Identifying public transport gaps using time-dependent accessibility levels. *Journal of Transport Geography*, 48(C), 176–187. doi:10.1016/j.jtrangeo.2015.09.008
- Frappier, A. (2016). Méthode d’évaluation de la diversité et de la qualité des alternatives de déplacement de transport en commun. (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal, Montréal, Québec). Tiré de <https://publications.polymtl.ca/1983/>
- Gaudette. (2015). Microsimulation d'un réseau d'autobus défini dans le format GTFS. (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal, Montréal, Québec). Tiré de <https://publications.polymtl.ca/1753/>
- Gehl, J. (2012). Pour des villes à échelle humaine. Montréal : Éditions Écosociété.
- Geofabrik. (2016). Download OpenStreetMap data for this region: Canada. Tiré de <http://download.geofabrik.de/north-america/canada.html>
- GéoGratis. (2010). Limites municipales - QC – Québec. Tiré de <http://geogratias.gc.ca/api/fr/nrcan-rncan/ess-sst/f30dc85d-d574-4606-8ab7-11cc8ba03751.html>

- Gerson, A. (2011). Analyse comparée de corridors importants de transport de surface à Montréal. (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal, Québec). Tiré de <https://publications.polymtl.ca/512/>
- Giraud. (2016). Outils de Visualisation de Données de Cartes à Puce pour une Société de Transport Collectif. (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal, Montréal, Québec).
- Gleyze, J.-F. (2001). *Réseaux, Territoires et Accessibilité*. Tiré de http://recherche.ign.fr/labos/cogit/pdf/RAPPORTS/Gleyze_rapport_reseaux.pdf
- Godin, A. (2012). L'accessibilité en transport : Méthodes et indicateurs. (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal, Québec). Tiré de <https://publications.polymtl.ca/814/>
- Google. (2014). Feed Validator Errors And Warnings. Tiré de <https://github.com/google/transitfeed/wiki/FeedValidatorErrorsAndWarnings>
- Google. (2015a). General Transit Feed Specification : Changes. Tiré de <https://developers.google.com/transit/gtfs/changes>
- Google. (2015b). Tools : Testing Your GTFS Feeds. Tiré de <https://developers.google.com/transit/tools#testing-your-gtfs-feeds>
- Google. (2015c). What is GTFS-realtime?. Tiré de <https://developers.google.com/transit/gtfs-realtime/>
- Gouvernement du Canada. (2015). Un Leadership Fort : Un budget équilibré et un plan axé sur des impôts bas pour favoriser l'emploi, la croissance et la sécurité. Tiré de <http://www.budget.gc.ca/2015/docs/plan/budget2015-fra.pdf>
- Huang, Z., Liu, X. et Peng, M. (2008). Measuring transit accessibility based on disaggregate data in GIS: the case of Wuhan, China. Dans L. Liu, X. Li, K. Liu, X. Zhang et X. Wang (dir.), (vol. 7144, pp. 71442V–71442V–8). Communication présentée au Geoinformatics 2008 and Joint conference on GIS and Built Environment: The Built Environment and its Dynamics, SPIE. doi:10.1117/12.812853
- Industrie Canada. (2016). Transport en commun et transport terrestre de voyageurs (SCIAN 485): Définition. Tiré de <https://www.ic.gc.ca/app/scr/sbms/sbb/cis/definition.html?code=485&lang=fra>

- Institut de la Gestion Déléguée. (2008). Indicateurs de performance des services de transport public. Tiré de http://www.fondation-igd.org/files/pdf/IGD_transport_collectif.pdf
- Institut de la statistique du Québec. (2015). Décret de population. Tiré de <http://www.mamrot.gouv.qc.ca/organisation-municipale/decret-de-population/>
- Ippoliti, L. (2011). Méthode d'évaluation de la performance du réseau de transport en commun de l'agglomération grenobloise. Communication présentée à la 16^{ème} journée doctorale de l'AFITL, Lyon, France. Tiré de http://afitl.ish-lyon.cnrs.fr/tl_files/documents/vie-association/journee-doctorale/presentations2011/Lucas%20Ippoliti.pdf
- Jariyasunant, J., Mai, E. et Sengupta, R. (2011). Algorithm for finding optimal paths in a public transit network with real-time data. Communication présentée au *90th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C.*. Tiré de <http://trjournalonline.trb.org/doi/pdf/10.3141/2256-05>
- Kittelson & Associates, Inc., Urbitran, Inc., LKC Consulting Services, Inc., MORPACE International, Inc. Et Queensland University of Technology et Nakanishi, Y. (2003). A Guidebook for Developing a Transit Performance-Measurement System (Rapport n° 88). Washington, D.C. : Transit Cooperative Research Program. Tiré de http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp_report_88/Guidebook.pdf
- Kaufmann, V. et Messer, M. A. (2012). Analyse critique et propositions d'amélioration du réseau de tram genevois. Lausanne, Suisse : Communauté d'études pour l'aménagement du territoire, EPFL.
- KRW, Inc.. (2003). Measuring Transportation Network Performance (Rapport n° 664). Washington, D.C. : National Cooperative Highway Research Program. Tiré de http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_664.pdf
- Lebbar, E. et Schabanel, N. (2007). Routage dans les petits mondes. Tiré de https://interstices.info/jcms/c_15920/routage-dans-les-petits-mondes
- Lee, S. G., Hickman, M. et Tong, D. (2012). Stop Aggregation Model. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2276(1), 38-47. doi:10.3141/2276-05

- Lee, S. G., Tong, D. et Hickman, M. D. (2012). Modified empty space distance with Google's GTFS for measuring transit accessibility. Tiré de http://www.giscience.org/past/2012/proceedings/abstracts/giscience2012_paper_139.pdf
- Legara, E. F., Monterola, C., Lee, K. K. et Hung, G. G. (2014). Critical capacity, travel time delays and travel time distribution of rapid mass transit systems. *Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications*, 406, 100–106. doi:10.1016/j.physa.2014.02.058
- Lessard, D. (9 avril 2016). Philippe Couillard à La Presse: feu vert à trois mégaprojets de transport. *La Presse*. Tiré de <http://www.lapresse.ca/actualites/politique/politique-quebecoise/201604/09/01-4969407-philippe-couillard-a-la-presse-feu-vert-a-trois-megaprojets-de-transport.php>
- Lina, A. (1999). Transformée en ondelettes, tortuosité et lacunarité fractale pour la caractérisation de surfaces rugueuses. Application à la mesure de rugosité du pavage. (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal, Montréal, Québec). Tiré de http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk1/tape4/PQDD_0017/MQ53588.pdf
- Litman, T. (2008). Valuing Transit Service Quality Improvements. *Journal of Public Transportation*, 11(2), 43-63. Tiré de <http://www.nctr.usf.edu/jpt/pdf/JPT11-2Litman.pdf>
- Lu, H. K. (2007). Network smart card review and analysis. *Computer Networks*, 51(9), 2234–2248. doi:10.1016/j.comnet.2007.01.009
- Ma, T. et Knaap, J. (2014). Analyzing Employment Accessibility in a Multimodal Network using GTFS: A Demonstration of the Purple Line, Maryland. Communication présentée au *Association of Collegiate Schools of Planning (ACSP) Annual Conference Philadelphia, Pennsylvania*. http://smartgrowth.umd.edu/assets/documents/research/acsp_tingma_20141029.pdf
- McHugh, B. (2013). Pioneering Open Data Standards: The GTFS Story. Dans Goldstein, B., Dyson, L. (Eds), *Beyond Transparency: Open Data and the Future of Civic Innovation* (p.125-135). San Francisco: Code for America Press.
- Metrolinx. (2013). *The Big Move : Baseline Monitoring Report*. Tiré de http://www.metrolinx.com/en/regionalplanning/bigmove/The_Big_Move_Baseline_Monitoring_Full_Report_EN.pdf

- Metropolitan Knowledge International, McCormick Rankin Corporation et Casello, J. (2010). The Economic Impact of Transit Investment: A National Survey. Tiré de http://cutaactu.ca/sites/default/files/final_cuta-economicbenefitsoftransit-finalreportsept2010.pdf
- Ministère des Finances du Québec. (2015). Le Plan Économique du Québec. Tiré de <http://www.budget.finances.gouv.qc.ca/budget/2015-2016/fr/documents/Planeconomique.pdf>
- Ministère des Transports du Québec. (2015a). Plan d'action en électrification des transports 2015-2020. Tiré de http://medias.mtq.fabrique3.net.s3.amazonaws.com/wp-content/uploads/2015/10/CIAO-047_-_MTQ_-_LGS_-_Rapport_FR_v5_V.pdf
- Ministère des Transports du Québec. (2015b). Programme d'aide au développement du transport collectif. Tiré de <https://www.mtq.gouv.qc.ca/partenairesprives/entrepriseservicestransportroumier/programmes-aide/Pages/Amelioration-transport-commun.aspx>
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2015). Cible de réduction d'émission de gaz à effet de serre du Québec pour 2030 – Document de consultation. Tiré de <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/consultations/cible2030/consultationPost2020.pdf>
- Mishra, S., Welch, T. F. et Jha, M. K. (2012). Performance indicators for public transit connectivity in multi-modal transportation networks. *Transportation Research Part A*, 46(7), 1066–1085. doi:10.1016/j.tra.2012.04.006
- Mishra, S., Welch, T. F., Torrens, P. M., Fu, C., Zhu, H. et Knaap, E. (2014). A tool for measuring and visualizing connectivity of transit stop, route and transfer center in a multimodal transportation network. *Public Transport* 7(1), 77-99. doi:10.1007/s12469-014-0091-2
- Mony, N. (2011). Éléments d'analyse et de planification du transport en commun en lointaine banlieue de Montréal. (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal, Montréal, Québec). Tiré de <https://publications.polymtl.ca/517/>

- Mohsen, N. Tanguay, N. et Spurr, T. (2016). Valorisation des données GTFS dans la grande région de Montréal. Communication présentée au 51^e Congrès de l'AQTr.
- Nair, R., Bouillet, E., Gkoufas, Y., Verscheure, O., Mourad, M., Yashar, F., Perez, R., Perez, J. et Bryant, G. (2015). Data as a resource: real-time predictive analytics for bus bunching. Communication présentée au *94th Transportation Research Board Annual Meeting*. Tiré de <http://docs.trb.org/prp/15-2129.pdf>
- Nayeem, M. A., Rahman, Md. K., et Rahman M S. (2014). Transit network design by genetic algorithm with elitism. *Transportation Research Part C*, 46(C), 30-45. doi: 10.1016/j.trc.2014.05.002
- Neff, J. et Dickens, M. (2015). 2015 Public Transportation Fact Book (66^e éd.). Washington, DC : American Public Transportation Association.
- Neo4j. (s.d.) Graph Algorithms. Tiré de <http://neo4j.com/docs/stable/rest-api-graph-algos.html>
- Nikolic, M., Teodorovic, D. (2013). Transit network design by Bee Colony Optimization. *Expert Systems with Applications*, 40(15), 5945–5955. doi: 10.1016/j.eswa.2013.05.002
- Novabus. (2010). Caractéristiques techniques. Tiré de http://www.novabus.com/documents/Feuil_Spec_FINAL.pdf
- Orth, H., Weidmann, U. et Dorbritz, R. (2012). Development of Measurement System for Public Transport Performance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2274(1), 135-143. doi:10.3141/2274-15
- Pajor, T. (2009). Multi-Modal Route Planning. (Mémoire de maîtrise, Institut de technologie de Karlsruhe, Karlsruhe, Allemagne). Tiré de https://i11www.iti.uni-karlsruhe.de/_media/teaching/theses/files/da-pajor-09.pdf
- Pelletier, M.-P., Trépanier, M. et Morency, C. (2011). Smart card data use in public transit: A literature review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(4), 557–568. doi:10.1016/j.trc.2010.12.003
- Porter, D. J., Kim, D. S. et Ghanbartebrani, S. (2014). *Proof Of Concept: GTFS Data As A Basis for Optimization of Oregon's Regional And Statewide Transit Networks* (n° FHWA-OR-RD-14-12) (pp. 1–72). Oregon Department of Transportation.

- Rafiee, P. (2009). Caractérisation systémique des corridors de transport en commun. (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal, Montréal, Québec). Accessible par ProQuest Dissertations & Theses. (MR53921). Tiré de <http://search.proquest.com/docview/305137695?accountid=40695>
- Raveau, S., Muñoz, J. C. et de Grange, L. (2011). A topological route choice model for metro. *Transportation Research Part A*, 45(2), 138–147. doi:10.1016/j.tra.2010.12.004
- Robinson, I., Webber, J. et Eifrem, E. (2013). *Graph Databases*. « O'Reilly Media, Inc ».
- Ryus, P., Danaher, A., Walker, M., Nichols, F., Carter, W. Ellis, E., ... Bruzzone, A. (2013). Transit Capacity and Quality Service Manual. Tiré de <http://www.trb.org/Main/Blurbs/169437.aspx>
- Société de Transport de Montréal. (2015). Budget 2015. Tiré de <http://www.stm.info/sites/default/files/pdf/fr/budget2015.pdf>
- Saberi, M., Zockaie, A. K., Feng, W. et El-Geneidy, A. (2013). Definition and properties of alternative bus service reliability measures at the stop level. *Journal of Public Transportation* 16(1), 97-122. Tiré de <http://tram.mcgill.ca/Research/Publications/BusReliability.pdf>
- Shah, Y., Manaugh, K., Badami, M. et El-Geneidy, A. (2013). Diagnosing Transportation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2357, 1–12. doi:10.3141/2357-01
- Société de Transport de l'Outaouais. (s.d.). Qu'est-ce que le Rapibus?. Tiré de <http://www.rapibus.sto.ca/index.php?id=42>
- Song, J.-Y., Eom, J. K., Lee, K. S., Min, J. H. et Yang, K. Y. (2015). Public Transportation Service Evaluations Utilizing Seoul Transportation Card Data. *Procedia - Procedia Computer Science*, 52, 178–185. doi:10.1016/j.procs.2015.05.053
- Suchkov, B., Boguslavsky, M. et Reddy, A. (2015). Development of a New, Lightweight GTFS Real Time Stringlines Tool to Visualize Subway Operations and Manage Service at New York City Transit. Communication présentée au 94th TRB Annual Meeting, Washington, DC. Tiré de <http://amonline.trb.org/trb57535-2015-1.1793793/t006-1.1818822/223-1.1807429/15-4665-1.1820389/15-4665-1.1955470>

- SWITCH. (2016). Au tour du secteur des transports de faire sa part dans la lutte aux changements climatiques : Plan d'action. Tiré de http://allianceswitch.ca/wp-content/uploads/2016/03/Plan-action-transport_SWITCH_FINAL.pdf
- The world bank. (2013). Open Source Tools for Transport Planning: Indicator Calculation Methodology Report. Tiré de <https://drive.google.com/file/d/0B5Ot4FPs1rW6TDV2bWNUrVfZNTA/>
- Torres, J., Izquierdo, A. et Sierra, J. M. (2007). Advances in network smart cards authentication. *Computer Networks*, 51(9), 2249–2261. doi:10.1016/j.comnet.2007.01.010
- TRANS Committee. (2013). 2011 NCR Household Origin-Destination Survey : Summary of Results. Tiré de <http://www.ncr-trans-rcn.ca/wp-content/uploads/2013/04/TRANS-2011-OD-Survey-Final-Report-January-2013.pdf>
- TranSystems Corporation, Planners Collaborative, Inc. et Tom Crikelair Associates. (2006). Elements Needed to Create High Ridership Transit Systems : Interim Guidebook. Tiré de http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp_webdoc_32.pdf
- Trépanier, M. (2011). L'exploitation des données de cartes à puce à des fins de planification des transports collectifs urbains. *Recherche Transports Sécurité*, 28(2), 139–152. doi:10.1007/s13547-011-0019-z
- Trépanier, M., Chapleau, R. et Allard, B. (2005). Can trip planner log files analysis help in transit service planning? *Journal of Public Transportation*, 8(2), 79–103. doi:10.5038/2375-0901.8.2.5
- Trompet, M. et Anderson, R. J. (2009). Variability in comparable performance of urban bus operations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2111(1), 177-184. doi:10.3141/2111-20
- Ville de Gatineau. (2013). Le plan de déplacements durables de la ville de Gatineau : Pétion, avant tout!. Tiré de http://www.gatineau.ca/docs/guichet_municipal/urbanisme_habitation/revision_schema_a_menagement_developpement/documents_references/20131024_plan_deplacements_durables.fr-CA.pdf

- Ville de Montréal. (2008). Plan de Transport 2008. Tiré de http://servicesenligne.ville.montreal.qc.ca/sel/publications/htdocs/porteaccespublication_Fr/porteaccespublication.jsp?systemName=68235660
- Welch, T. F. et Mishra, S. (2013). A measure of equity for public transit connectivity. *Journal of Transport Geography*, 33(1), 29-41. doi:10.1016/j.jtrangeo.2013.09.007
- Wong, J. C. (2013a). Leveraging the General Transit Feed Specification for Efficient Transit Analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2338(-1), 11–19. doi:10.3141/2338-02
- Wong, J.C. (2013b). Use of the general transit feed specification (GTFS) in transit performance measurement. (Mémoire de maîtrise, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Etats-Unis). Tiré de <http://www.nctspm.gatech.edu/sites/default/files/u60/WONG-THESIS-2013.pdf>
- YU, C. et He, Z.-C. (2014). Passenger Flow Estimation Based on Smart Card Data in Public Transit (pp. 658–670). Communication présentée au 14th COTA International Conference of Transportation Professionals, Reston, VA: American Society of Civil Engineers. doi:10.1061/9780784413623.064
- Zhang, T., Chen, M.-H. et Lawson, C. (2014). General Transit Feed Specification data visualization (pp. 1–6). Communication présentée au Geoinformatics (GeoInformatics), 2014 22nd International Conference on, IEEE. doi:10.1109/GEOINFORMATICS.2014.6950839