

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MÉTHODOLOGIE DE GÉNÉRATION DE TRAJETS MULTIMODAUX DANS UN
CONTEXTE DE COVOITURAGE

THIBAUT JAUROU

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)

AOÛT 2016

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

MÉTHODOLOGIE DE GÉNÉRATION DE TRAJETS MULTIMODAUX DANS UN
CONTEXTE DE COVOITURAGE

présenté par : JAUROU Thibaut

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

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

M. SAUNIER Nicolas, Ph. D., président

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

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

M. ROUSSEAU Louis-Martin, Ph. D., membre

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, merci à mes directeurs de recherche Catherine MORENCY et Martin TRÉPANIÉRIER,

Merci à l'entreprise NETLIFT, et particulièrement à Marc-Antoine DUCAS et à Guillaume BOUDREAU,

Merci aussi aux autres participants du projet que sont Mathieu GAGNON et Louis-Martin ROUSSEAU,

Enfin, merci aux copains et QLF

RÉSUMÉ

Ce projet de recherche consiste à créer une méthode de génération de trajets multimodaux dans un contexte d'outil de covoiturage. À la suite d'une demande de déplacement d'un utilisateur pour se rendre d'une origine O à une destination D, le système génère un ensemble de trajets multimodaux (voiture, bus, train, métro) répondant à cette demande et se prêtant au covoiturage. Le segment routier est alors considéré comme réalisable en covoiturage. Les différents conducteurs ayant proposé leur trajet dans l'outil de covoiturage sont alors classés en fonction du détour que leur entraînerait le covoiturage et les meilleurs jumelages sont alors étudiés plus finement grâce à un calculateur de chemin pour finalement proposer à l'utilisateur les meilleures options de covoiturage. Ces options peuvent contenir des segments de transport en commun.

La génération de trajets multimodaux se fait grâce à un graphe multimodal, qui est la jonction d'un graphe routier, d'un graphe de transport en commun et d'un graphe de transition qui a pour rôle de simuler la transition entre ces deux réseaux. Le graphe multimodal se base sur les données géographiques telles que les fichiers GTFS, le réseau routier et des données d'utilisation du sol issues de la plateforme OSM. Grâce à la théorie des graphes, les meilleurs chemins sur ce graphe représentent alors les meilleurs trajets multimodaux sur le réseau. Un trajet multimodal généré par le graphe comprend l'origine et la destination des différents segments unimodaux, les lignes de transport en commun empruntées s'il y a lieu, ainsi que le lieu exact de rencontre si un covoiturage doit être effectué.

Le graphe multimodal du réseau montréalais est enfin créé afin de mettre à l'épreuve la méthodologie énoncée et de quantifier les erreurs et approximations du système. D'abord, les temps de parcours prévus par le graphe multimodal sont comparés aux temps de parcours calculés par Google Maps pour les mêmes trajets. Ces comparaisons sont réalisées successivement sur le graphe routier artériel (graphe simulant l'utilisation des autoroutes et grandes artères du réseau de Montréal), sur le graphe routier dans son ensemble puis sur le graphe de transport en commun. Ensuite, la méthodologie est mise face à une situation réelle où les 19 386 trajets de l'enquête Origine-Destination 2008 sont considérés comme des demandes de covoiturage. On analyse alors la pertinence des jumelages entre covoitureurs que la méthodologie propose.

Pour ces tests, c'est un graphe allégé qui a été construit, un graphe dont la construction suit la méthodologie énoncée pour sa géométrie, mais dont le calcul des temps de parcours sur les liens

est simplifié par rapport à ses directives, le but premier étant de valider la capacité de la méthodologie générale à générer des trajets multimodaux comprenant du covoiturage. Ce graphe allégé montre ses lacunes dans le calcul des temps de parcours en transport en commun notamment. Néanmoins, la plupart des erreurs relevées lors des tests sont facilement corrélables à la simplification du processus de construction du graphe. Les résultats restent très encourageants, avec en moyenne une différence de temps de parcours routier entre le graphe et le calcul par Google Maps d'une dizaine de minutes et avec un système dont 2 fois sur 3 le meilleur jumelage calculé par Google Maps. Finalement, la méthodologie en question, pouvant toujours être améliorée, semble être une bonne piste pour générer des trajets multimodaux et jumeler des covoitureurs autour de ces mêmes trajets. Des tests menés sur un graphe multimodal complet, dont la construction suivrait parfaitement les règles de la méthodologie, permettraient de bien quantifier les erreurs commises et de voir les perspectives d'amélioration potentielles de la méthodologie.

ABSTRACT

This research project aims to create a multimodal trips generation method in a carpooling tool context. In response to a user need to go from an origin O to a destination D , the system has to generate some multimodal trips (car, bus, trains, metro) to respond to this demand. Then, the car segment is considered to be completed by carpooling. All the drivers who have proposed their trips in the carpooling tool are ordered by the deviation which would be added if they would complete the carpooling, and the fastest among them are studied more precisely by a route planner to finally propose to the user the best carpooling options. These options can include public transportation segments.

The multimodal trips generation is done by the use of a multimodal graph, which is the junction between a driving graph, a public transportation graph and a transition graph, which aims to simulate the transition between this two first networks. The multimodal graph is built from geographical datas such as GTFS files, road networks and land use datas from OSM platform. Thanks to graph theories, the best paths on the graph represent the best multimodal trips on the real transportation network. A multimodal path generated by the graph consists of the origins and destinations of the unimodal segments, the transit routes used and the meeting point, if a carpooling is performed.

Finally, the multimodal graph of the Montreal network is built to test the method and to quantify the system errors and approximations. First of all, the travel times calculated by the multimodal graph are compared to the Google Maps travel times. These comparisons are performed successively on the arterial graph (graph simulating Montreal highways and major arterial roads use), on the entire road network, and then on the public transportation network. On a second time, the method is tested in a real environment where all the 19 386 trips from the Origin-Destination Study 2008 are considered as ridesharing demands. Then, we analyse the relevance of the ridesharing propositions.

During these tests, this is a lightened graph which has been built, a graph which is built by following the directives of the method for the geometry but by simplifying the travel time calculations on the links. The purpose of lightening the graph for the tests is because, first of all, the goal of the tests is to validate the general methodology capacity to generate multimodal trips with ridesharing. This lightened graph shows its limits to predict the travel time by public transport.

However, the majority of the inaccuracies noted during the tests can be easily linked to the graph building process simplification. The results remain very encouraging, considering a mean travel time prediction difference between the graph and the reality around ten minutes, and with a ridesharing system which, two thirds of the time, proposes the best matching in its 10 best propositions generated by the graph. Finally, this methodology, being enhanced, seems to be a good lead to generate multimodal trips and to match users using these trips. Some tests, performed on a multimodal graph built following the method rules, could be a good way to better quantify the method errors and to foresee the potential enhancement to create.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|-----------|
| REMERCIEMENTS | III |
| RÉSUMÉ..... | IV |
| ABSTRACT | VI |
| TABLE DES MATIÈRES | VIII |
| LISTE DES TABLEAUX..... | XII |
| LISTE DES FIGURES..... | XIII |
| LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS | XV |
| LISTE DES ANNEXES..... | XVI |
| CHAPITRE 1 INTRODUCTION..... | 1 |
| 1.1 Contexte | 1 |
| 1.2 Contexte de l'étude..... | 2 |
| 1.3 Définitions..... | 5 |
| 1.3.1 Multimodalité..... | 5 |
| 1.3.2 Covoiturage régulier..... | 5 |
| 1.3.3 Covoiturage dynamique | 6 |
| 1.4 Schéma méthodologique | 6 |
| CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE | 8 |
| 2.1 Introduction du covoiturage | 8 |
| 2.2 Classification des systèmes de covoiturage | 8 |
| 2.3 Génération de trajets multimodaux | 11 |
| 2.4 Objectifs d'optimisation..... | 13 |
| CHAPITRE 3 ÉNONCÉ D'UNE MÉTHODOLOGIE DE JUMELAGE MULTIMODAL ... | 15 |
| 3.1 Introduction de phénomènes de transport à considérer..... | 15 |

| | | |
|-----------------------------------|---|----|
| 3.1.1 | Phénomène de variation horaire de la demande..... | 15 |
| 3.1.2 | Phénomène de variation géographique de la demande | 16 |
| 3.1.3 | Phénomène de répétabilité de la demande | 16 |
| 3.2 | Introduction générale du système de covoiturage multimodal..... | 17 |
| 3.2.1 | Objectif du système de jumelage multimodal | 17 |
| 3.2.2 | Présentation de l’algorithme de jumelage | 18 |
| 3.2.3 | Contextualisation de la méthodologie de génération de trajets multimodaux | 19 |
| 3.3 | Méthodologie de détermination des points de jonction | 20 |
| 3.3.1 | Définition d’un point de jonction | 20 |
| 3.3.2 | Données sources pour la définition des points de jonction | 21 |
| 3.3.3 | Création des points de jonction | 24 |
| 3.3.4 | Dispositif technique de création des points de jonction | 25 |
| CHAPITRE 4 GRAPHE MULTIMODAL..... | | 27 |
| 4.1 | Définition et objectifs d’un graphe multimodal | 27 |
| 4.1.1 | Notion de graphe multimodal..... | 27 |
| 4.1.2 | Les enjeux du graphe multimodal | 27 |
| 4.1.3 | Intervalle de temps du graphe | 28 |
| 4.1.4 | Découpage de la ville en zones | 29 |
| 4.2 | Graphe routier | 29 |
| 4.2.1 | Introduction du graphe routier de base..... | 29 |
| 4.2.2 | Influence de la directionnalité des liens | 30 |
| 4.2.3 | Temps de parcours sur les liens du graphe routier de base | 30 |
| 4.2.4 | Limites d’un tel réseau routier | 31 |
| 4.2.5 | Présentation du graphe routier artériel | 32 |

| | | |
|------------|--|----|
| 4.2.6 | Conclusion sur le graphe routier | 39 |
| 4.3 | Graphe TC | 43 |
| 4.3.1 | Introduction du graphe TC | 43 |
| 4.3.2 | Création du graphe TC | 44 |
| 4.3.3 | Conclusion sur le graphe TC | 49 |
| 4.4 | Graphe de transition | 53 |
| 4.4.1 | Introduction du graphe de transition | 53 |
| 4.4.2 | Conclusion sur le graphe de transition | 55 |
| 4.5 | Points de départ et d'arrivée sur le graphe | 57 |
| 4.5.1 | Points de départ sur le graphe | 57 |
| 4.5.2 | Points d'arrivée sur le graphe | 58 |
| CHAPITRE 5 | RÉSULTATS | 60 |
| 5.1 | Données utilisées | 60 |
| 5.2 | Validation du zonage de Montréal | 60 |
| 5.3 | Résultats via l'algorithme | 61 |
| 5.3.1 | Temps de parcours sur le graphe | 61 |
| 5.3.2 | Mise en situation | 76 |
| CHAPITRE 6 | CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS | 81 |
| 6.1 | Résumé des travaux | 81 |
| 6.2 | Limites | 82 |
| 6.2.1 | Limites du graphe multimodal | 83 |
| 6.2.2 | Limites de la méthodologie | 84 |
| 6.3 | Perspectives de recherche et recommandations | 84 |
| 6.3.1 | Pistes d'amélioration du graphe | 85 |

| | |
|--|-----|
| 6.3.2 Pistes d'amélioration de la méthodologie | 88 |
| BIBLIOGRAPHIE | 90 |
| ANNEXES | 109 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau 4.1: Influences des différents paramètres à fixer..... | 40 |
| Tableau 4.3: Extrait de la table des liens routiers | 42 |
| Tableau 4.5: Extrait de la table des liens TC..... | 52 |
| Tableau 4.6: Extrait de la table des nœuds TC..... | 57 |
| Tableau 5.1: Comparaison statistique entre T_G et T_{Maps} sur l'ensemble des trajets entre nœuds artériels | 64 |
| Tableau 5.2: Comparaison statistique entre T_G et T_{Maps} sur l'ensemble des trajets entre centroïdes | 68 |
| Tableau 5.3: Comparaison statistique entre T_G et T_{Maps} avec et sans temps d'attente sur un ensemble de trajets entre nœuds TC..... | 73 |
| Tableau 5.4: État du meneur dans les classements Google Maps | 77 |
| Tableau 5.5: Répartition des meneurs dans les 10 premiers du classement Google Maps | 78 |
| Tableau 5.6: Répartition types de trajets lors de la génération des trajets multimodaux | 80 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1.1: Schéma méthodologique du projet de recherche | 7 |
| Figure 2.1 Notion de génération de trajets multimodaux par graphe (McCormack & Roberts, 1996) | 12 |
| Figure 3.1 Algorithme général lors d'une nouvelle demande utilisateur | 18 |
| Figure 3.2: Aperçu d'une carte OpenStreetMap | 22 |
| Figure 3.3: Édition d'un élément de stationnement avec ses tags associés..... | 23 |
| Figure 3.4: Dispositif technique de la création des points de jonction | 26 |
| Figure 4.1: Réseau routier de base | 30 |
| Figure 4.2: Erreur induite sur les longs trajets | 31 |
| Figure 4.3: Réseau artériel d'une zone de Montréal | 33 |
| Figure 4.4: Nœuds artériels et points substitués..... | 35 |
| Figure 4.5: Sélection des nœuds substitués à considérer | 37 |
| Figure 4.6: Liens routiers artériels utilisés lors des longs trajets | 38 |
| Figure 4.7: Graphe routier complet d'une zone de Montréal | 40 |
| Figure 4.8: Processus technique de création du graphe routier..... | 41 |
| Figure 4.9: Données du GTFS utilisée pour créer les lignes de transport en commun (http://www.stm.info/en/about/developers/available-data-description)..... | 45 |
| Figure 4.10: Réseau TC de base d'une zone de Montréal..... | 46 |
| Figure 4.11: Liens de transfert par la marche..... | 48 |
| Figure 4.12: Processus technique de création du graphe TC | 51 |
| Figure 4.13: Graphe de transition d'une zone de Montréal..... | 54 |
| Figure 4.14: Exemple de modification du graphe suite à la demande d'un utilisateur | 59 |
| Figure 5.1: Notion de justesse et de fidélité statistique (inspiré de (Nancy-Metz, 2012))..... | 62 |
| Figure 5.2: Comparaison de T_{Maps} et T_G sur un ensemble de trajets entre nœuds artériels..... | 64 |

| | |
|--|-----|
| Figure 5.3: Distribution de $T_G - T_{\text{Maps}}$ sur un ensemble de trajets entre nœuds artériels..... | 65 |
| Figure 5.4: Distribution de T_G / T_{Maps} sur un ensemble de trajets entre nœuds artériels..... | 65 |
| Figure 5.5: T_G en fonction de T_{Maps} sur un ensemble de trajets entre nœuds artériels | 66 |
| Figure 5.6: Comparaison de T_{Maps} et T_G sur un ensemble de trajets entre centroïdes..... | 68 |
| Figure 5.7: Distribution de $T_G - T_{\text{Maps}}$ sur un ensemble de trajets entre centroïdes..... | 69 |
| Figure 5.8: Distribution de T_G / T_{Maps} sur un ensemble de trajets entre centroïdes | 69 |
| Figure 5.9: T_G en fonction de T_{Maps} sur un ensemble de trajets entre nœuds centroïdes | 70 |
| Figure 5.10: Comparaison de T_{Maps} et T_G avec et sans temps d'attente sur un ensemble de trajets entre nœuds TC | 73 |
| Figure 5.11: Distribution de $T_G - T_{\text{Maps}}$ avec et sans temps d'attente sur un ensemble de trajets entre nœuds TC | 74 |
| Figure 5.12: Distribution de T_G / T_{Maps} avec et sans temps d'attente sur un ensemble de trajets entre nœuds TC | 74 |
| Figure 5.13: Exemples de trajets multimodaux générés | 79 |
| Figure 6.1: Faux liens routiers..... | 85 |
| Figure 6.2: Exemples de liens superflus..... | 86 |
| Figure A.1 Exemple de trajet avec pattern associé | 96 |
| Figure A.2 Exemple de calcul du score basique d'affinité | 97 |
| Figure B.1 Emprise totale du quadrillage de Montréal | 98 |
| Figure C.1 Aperçu de l'API Overpass | 99 |
| Figure D.1 Aperçu du Wiki OSM..... | 100 |
| Figure E.1 Exemple 1 de trajet multimodal | 101 |
| Figure E.2 Exemple 2 de trajet multimodal | 102 |

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

| | |
|------|---------------------------------------|
| AMT | Agence Métropolitaine de Transport |
| API | Application Program Interface |
| CIT | Conseil Intermunicipal de Transport |
| CMM | Communauté Métropolitaine de Montréal |
| GIS | Geographic Information Systems |
| GTFS | General Transit Feed Specification |
| OD | Origine-Destination |
| OSM | OpenStreetMap |
| STM | Société de Transport de Montréal |
| TC | Transport en commun |

LISTE DES ANNEXES

| | |
|--|-----|
| Annexe A – Première piste étudié : association de patterns de zones..... | 93 |
| Annexe B – Emprise totale du graphe..... | 98 |
| Annexe C – Utilisation D’API overpass | 99 |
| Annexe D – Extrait du wiki OSM..... | 100 |
| Annexe E – Exemples de trajets multimodaux générés | 101 |

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

De par ses inconvénients sociaux, économiques et environnementaux, l'utilisation de la voiture se doit d'être de plus en plus raisonnée. D'un point de vue global, l'usage de l'automobile génère de la pollution qui impacte négativement la santé des populations humaines, la biodiversité et entraîne des changements climatiques néfastes. Elle utilise aussi du pétrole, une matière première dont la quantité est limitée, et de l'espace, avec un besoin en stationnement indispensable. D'un point de vue particulier, l'usage d'une voiture coûte de plus en plus cher du fait de l'augmentation du prix du carburant et de son entretien. Si ce n'est le coût pécuniaire de son usage, un coût en matière de temps est souvent imputé à l'usage de la voiture, du fait de l'augmentation de la congestion urbaine à laquelle la plupart des villes font face.

Le covoiturage est alors une alternative sensée pour contrer en partie les aspects négatifs de l'utilisation automobile. Il permet de partager les frais de déplacement entre plusieurs participants, d'économiser du carburant et donc de diminuer l'émission de polluants (Caulfield, 2009), et aussi de diminuer la congestion en permettant de faire autant de déplacements avec moins de véhicules. L'impact sur la société est très bénéfique, notamment d'un point de vue économique (Fellows & Pitfield, 2000). Néanmoins, l'habitude de covoiturer n'est pas encore rentrée dans les mœurs. Plusieurs obstacles rendent le covoiturage encore trop peu utilisé. Tout d'abord, il y a l'aspect sécuritaire du covoiturage qui peut poser problème. Le fait de se faire transporter par un inconnu peut rebuter certaines personnes. La piste la plus répandue et la plus certaine pour contrer ce problème réside dans l'utilisation des réseaux sociaux et de la notation des participants aux activités de covoiturage (Martin-Fernandez, Caballero-Gil, Caballero-Gil, & Molina-Gil, 2014). De nombreux sites utilisent déjà ces méthodes de notations, que ce soit pour le covoiturage, mais aussi pour l'échange d'appartements par exemple. Ensuite, l'enjeu de la rapidité et de la facilité d'utilisation d'un système de covoiturage est crucial. On peut observer que les systèmes de covoiturage les plus répandus sont tous des systèmes qui permettent de réaliser des trajets de longue distance de façon ponctuelle. Il est plus difficile de réaliser un système en temps réel qui propose des trajets sur l'instant, de manière dynamique. Cela nécessite déjà un grand nombre d'utilisateurs pour qu'à tout moment, il y ait au moins une proposition de trajet qui soit pertinente. Néanmoins,

beaucoup s'accordent à dire que le covoiturage dynamique est sans aucun doute l'avenir du covoiturage (villedurable.org, 2012). Enfin, un dernier problème réside dans la pertinence et l'intérêt des propositions formulées par un système de covoiturage. Il est difficile de faire covoiturer un non-initié sachant qu'en plus de devoir voyager avec un inconnu, le trajet qui lui sera proposé est possiblement plus long et moins pratique qu'un trajet simple en auto-conducteur. Il est donc nécessaire d'axer les efforts de recherche sur l'amélioration de la performance des systèmes de covoiturage pour proposer des solutions riches et intéressantes et ainsi démocratiser l'utilisation de ce mode de transport.

Dans le cadre du covoiturage, dans l'optique de répondre aux besoins de déplacement des citoyens, de nouveaux modèles apparaissent. Dans la suite, on va voir comment créer un système de covoiturage dynamique multimodal. Tous ces termes comme la multimodalité, le covoiturage régulier, dynamique, etc. vont être définis ci-après. Mais de manière générale, un système de covoiturage dynamique multimodal doit répondre au besoin de déplacement de l'utilisateur, en temps réel, en réalisant une opération de covoiturage prenant en compte toutes les offres de transport disponibles sur le réseau. Le système doit prendre en compte le réseau de bus, de métro, de vélo en libre-service, etc. Le système est donc un produit connecté qui peut être par exemple de la forme d'un site internet ou d'une application mobile.

1.2 Contexte de l'étude

La démocratisation du covoiturage ne peut se dérouler qu'avec une utilisation plus facile et moins contraignante des outils de covoiturage, et donc avec des propositions de déplacement fournies par ces outils plus pertinents. La technologie web est alors le seul outil capable d'avoir une influence majeure à grande échelle. Dans l'idéal, on pourrait imaginer une application mobile ou un site web qui propose à l'utilisateur de se rendre de son origine à sa destination en minimisant son temps de parcours et sa distance de parcours, tout en maximisant, dans le système entier, l'utilisation de la capacité des véhicules. Le but étant, en fin de compte, de ne faire circuler que des véhicules dont l'occupation est maximisée.

Pour parvenir à un système aussi parfait, il faut continuer à proposer des solutions technologiques innovantes pour le covoiturage. Avec l'émergence et la popularisation des systèmes GPS, de plus en plus d'outils sont à la disposition de tous pour améliorer les méthodes de

déplacement. Néanmoins, à ce jour, la plupart des outils de covoiturage disponibles et populaires prennent en compte seulement l'origine et la destination de l'utilisateur et essaient de le jumeler avec d'autres utilisateurs dont l'origine et la destination sont proches. À notre connaissance, tous ces systèmes de covoiturage populaires sont unimodaux. Ils ne proposent que des trajets dont l'intégralité du voyage est parcourue en automobile. Or, la diversité des moyens de transport s'accroissant, il est indispensable d'en considérer un maximum et de les combiner pour avoir des solutions de transport plus intelligentes et plus adaptées. Ainsi, dans le cadre de ce projet de recherche, une proposition de système de covoiturage est formulée dans l'optique de progresser vers des outils dont les propositions de trajets soient les plus pertinentes possible.

Tout au long de l'étude, une collaboration a été menée avec l'entreprise Netlift, qui, sous la forme d'une application mobile, a pour but de permettre de faire du covoiturage dynamique, multimodal et régulier. Chacune de ces caractéristiques se veut comme une innovation dans le domaine des outils de covoiturage. Le covoiturage dynamique s'adapte au réseau routier et à l'ensemble des utilisateurs en temps réel. Le covoiturage multimodal offre à l'utilisateur la possibilité de faire un trajet en combinant plusieurs modes de transport différents. Le covoiturage régulier permet d'inclure le covoiturage comme un moyen de transport fréquent dans la vie de l'utilisateur.

Ce projet de recherche propose donc une méthodologie de mise en place d'un système complet de covoiturage dynamique multimodal. Il a été mené en collaboration avec Mathieu Gagnon, un autre candidat à la maîtrise. Alors que Gagnon s'est plus particulièrement intéressé à l'algorithme de proposition de jumelages entre les utilisateurs, l'étude dont il est question dans ce mémoire porte plus précisément sur la modélisation des réseaux de transport et des éléments géographiques pour soutenir cet algorithme et déterminer l'ensemble des trajets possibles pour un utilisateur. Effectivement, avant que l'algorithme ne puisse proposer aux utilisateurs des propositions de covoiturage, il faut créer des alternatives de voyages en prenant en compte à la fois l'utilisation de l'automobile, des transports en commun, du vélo et de la marche. Le but de cette étude est finalement de déterminer, pour un utilisateur, en fonction de son origine, de sa destination et de l'horaire de sa demande, quelles sont les alternatives de trajets multimodaux qu'il a à sa disposition sur le réseau de transport pour remplir son besoin de déplacement. Quelles sont les possibilités qu'a un utilisateur, pour se rendre quelque part, sachant qu'il peut marcher jusqu'à une station de transport en commun proche ou que quelqu'un peut venir le prendre en voiture et alors le déposer

à sa destination ou tout du moins à un arrêt de transport en commun intermédiaire dont la ligne lui permet de terminer son trajet ? En répondant à ce genre de question et en sélectionnant les meilleures alternatives de trajet, il pourra alors être proposé à l'utilisateur d'être jumelé avec d'autres utilisateurs, via l'algorithme de Gagnon.

Quand on parle d'alternatives de trajet, on parle à la fois du chemin parcouru, avec ses segments de transport en commun, de marche ou de voiture, mais aussi des détails du trajet tel que le lieu de transition où les deux covoitureurs doivent se rencontrer. Effectivement, une action de covoiturage comprend à la fois un déplacement et une rencontre entre deux covoitureurs. Il faut donc aussi créer une méthodologie pour déterminer les lieux où les deux covoitureurs peuvent se rencontrer simplement et en toute sécurité.

En dernier lieu, ce projet vise à transformer des informations géographiques en propositions de trajets multimodaux pour les covoitureurs. Il faut récupérer les informations géographiques (réseau routier, transport en commun, utilisation du sol, etc...) pertinentes et les transformer pour créer un dispositif sur lequel puisse être généré un ensemble de propositions de trajet. Ces propositions de trajet doivent comporter une suite de segments de voiture, de transport en commun et de marche à pied et un lieu de rencontre si le trajet comprend une action de covoiturage. Le dispositif mis en place pour générer ces propositions de trajet est sous forme de graphe. Grâce aux méthodes de la théorie des graphes, les meilleures propositions de trajet sur le graphe pourront être déterminées.

Après cette introduction du sujet et quelques définitions nécessaires à la compréhension de la problématique, le chapitre 2 comprend une revue de littérature des travaux déjà réalisés dans le domaine du covoiturage et de la génération de trajets multimodaux. Dans le chapitre 3, la méthodologie générale est décrite dans son ensemble, de la réception d'un besoin de déplacement d'un utilisateur à la proposition finale de covoiturage qui lui est faite. Une méthodologie de détermination de points de jonction, lieux où une opération de début ou fin de covoiturage peut être réalisée en toute sécurité, est aussi mise en place. En suivant, le chapitre 4 précise les phases de création du graphe multimodal à partir des données de transport et géographiques nécessaires. Dans le chapitre 5, le graphe multimodal est créé et la méthodologie est mise à l'épreuve lors d'une série de tests, et enfin, dans le chapitre 6, les travaux sont résumés et une conclusion en est tirée en proposant des perspectives de recherche au projet.

1.3 Définitions

1.3.1 Multimodalité

La multimodalité se réfère au fait que notre méthode, bien qu'étant une méthode de covoiturage, doit prendre en compte tous les modes de transport mis à disposition de l'utilisateur. On parle bien entendu de tout le réseau de transport en commun qui peut être disponible en milieu urbain, que ce soit le bus, le métro, les tramways, etc. L'utilisateur pourrait ainsi se voir proposer des trajets bimodaux avec une portion en bus et une autre portion en covoiturage par exemple. Mais cette multimodalité peut aussi s'appliquer aux autres moyens de transport comme les vélos ou les automobiles en libre-service. On pourrait imaginer un système qui permettrait à l'utilisateur de se faire récupérer chez lui en voiture pour se faire déposer près d'une station de vélos en libre-service plus proche de son travail. Bien entendu, de tels déplacements nécessitent des précautions avant d'être proposés. Il faudrait, dans le cas que l'on vient d'énoncer, que l'utilisateur ait préalablement mentionné qu'il détient un abonnement au vélo en libre-service et qu'il est enclin à accepter des déplacements contenant une portion cycliste.

La multimodalité a un avantage majeur. Grâce à elle, on peut augmenter la pertinence des trajets proposés sans augmenter le nombre d'utilisateurs. Alors qu'un système unimodal ne peut proposer aucun trajet si aucun conducteur ne passe par l'origine et la destination de la demande, un système multimodal peut lui chercher des conducteurs qui passent près d'une station de transport en commun. L'utilisateur se voit alors proposer de partager une portion de son trajet avec le covoitureur en automobile pour ensuite prendre le transport en commun. On comprend donc bien que la multimodalité va décupler les possibilités de couplages entre passagers et conducteurs et va donc augmenter la pertinence des trajets proposés. Néanmoins, dans le cadre de ce mémoire, la multimodalité étudiée se restreint à l'union de l'automobile et du transport en commun.

1.3.2 Covoiturage régulier

Le covoiturage régulier désigne le fait de covoiturer sur des bases régulières. Le plus représentatif de ce covoiturage est celui qui consiste à aller travailler tous les matins en covoiturage et donc de faire quotidiennement l'aller-retour du domicile au travail via ce mode de transport. En effet, actuellement, la grande majorité, voire la totalité des trajets de covoiturages sont réalisés pour

du covoiturage particulier, pour des trajets exceptionnels et ponctuels. Dans le cadre de notre projet de recherche, nous nous concentrons sur le covoiturage régulier et non sur ce covoiturage ponctuel.

1.3.3 Covoiturage dynamique

Un système de covoiturage dynamique est un système qui doit prendre en compte, en temps réel, toutes les composantes du réseau et de la demande pour proposer un jumelage aux utilisateurs ayant des itinéraires compatibles. Il prend aussi en compte le fait qu'il y peut y avoir, à tout moment, de nouveaux utilisateurs sur le réseau ainsi que des utilisateurs qui réalisent leur trajet et qui ne sont donc plus disponibles pour le système. De même que pour le covoiturage ponctuel face au covoiturage régulier, les systèmes de covoiturage dynamiques ne sont pas encore largement utilisés. Tous les systèmes actuellement démocratisés de covoiturage ne prennent pas du tout en compte les composantes du réseau à l'heure considérée ni même l'itinéraire exact des trajets réalisés. Ils se contentent de considérer l'origine et la destination des trajets et de proposer des jumelages pour les utilisateurs dont l'origine et la destination sont compatibles. Dans notre étude, nous désirons considérer plusieurs itinéraires précis que pourrait emprunter l'utilisateur afin de considérer un maximum d'alternatives de covoiturage et donc de proposer la meilleure possible. Nous voulons aussi prendre en compte les caractéristiques du réseau de transport en temps réel. On entend par là la congestion automobile ainsi que les horaires de transport en commun. C'est grâce à la considération de tous ces paramètres qu'un système de covoiturage devient dynamique.

1.4 Schéma méthodologique

L'objectif de ce projet de recherche est d'énoncer une méthodologie qui, à partir des données géographiques et des réseaux de transport d'une ville, permette de générer des propositions de trajets multimodaux en fonction de l'origine, de la destination et de l'heure de départ d'une demande de déplacement. Cette méthodologie est déployée dans le cadre d'un système de covoiturage dynamique multimodal. Cette méthodologie se base sur la construction d'un graphe dit « multimodal », qui, grâce à la théorie des graphes, doit permettre de générer toutes les possibilités de déplacements dans la ville en question.

Sur la Figure 1.1, le schéma illustre comment s'articule le projet de maîtrise dans le but de répondre à une demande de covoiturage. De plus, pour chaque partie du schéma méthodologique, la partie du mémoire concernée est référée.

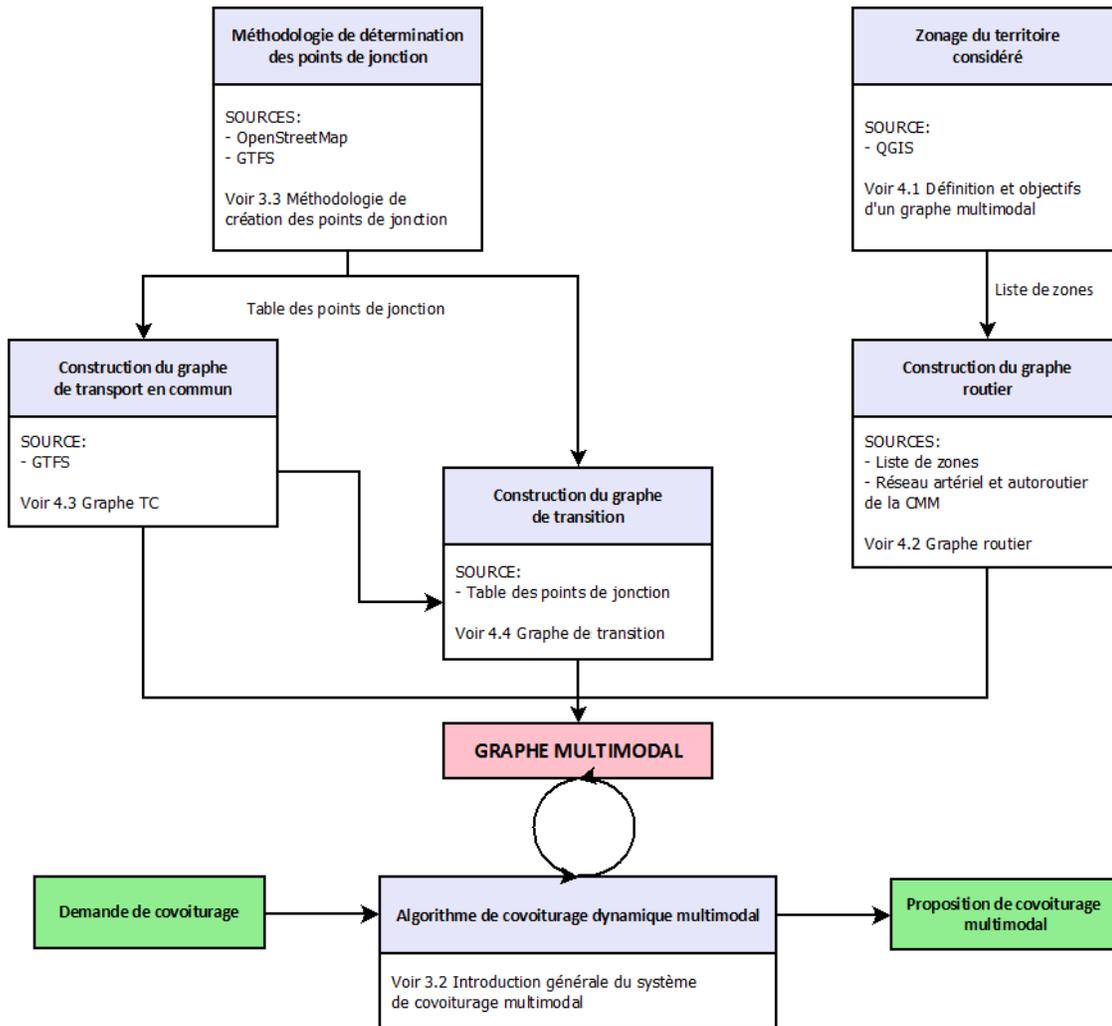


Figure 1.1: Schéma méthodologique du projet de recherche

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction du covoiturage

Ces dernières années, le sujet du covoiturage est devenu un thème de recherche très populaire auprès d'un grand nombre de chercheurs qui travaillent sur le sujet. Même pour le grand public, ce mode de transport prend de plus en plus d'ampleur. Il suffit de voir le nombre d'articles de presse qui s'intéressent au sujet, comme dans les journaux du Monde (Jacqué, 2016), du New York Times (Zipkin, 2015), du Chicago Tribune (Graham, 2016), du Parisien (Gibory, 2015) ou encore de La Presse (Templier, 2015). Dans le monde scientifique, beaucoup d'articles se rattachent de près ou de loin au problème du covoiturage. Effectivement, un bon nombre de publications s'intéressent explicitement à ce genre de sujets. Néanmoins, beaucoup d'autres sont très utiles dans l'étude des systèmes de covoiturage, sans pour autant que l'article soit initialement destiné à la problématique du covoiturage. On peut mentionner le problème du voyageur de commerce, qui est un problème d'optimisation très populaire consistant à trouver le plus court chemin qu'un individu doit parcourir pour visiter une liste de villes dont on connaît les positions géographiques en ne traversant les villes qu'une seule fois et en revenant à sa ville de départ (Larrañaga, Kuijpers, Murga, Inza, & Dizdarevic, 1999). Et on va voir dans la suite que chaque type de problème de covoiturage peut être rattaché à un problème plus général.

2.2 Classification des systèmes de covoiturage

En ce qui concerne les systèmes de covoiturage dynamique, on peut dire qu'ils présentent trois composantes. Un système de covoiturage est composé 1) d'un algorithme qui jumelle les utilisateurs entre eux, 2) en fonction des trajets qu'ils ont à parcourir, 3) pour finalement optimiser un certain objectif. Dans la suite, on va donc voir comment ces trois aspects ont été traités dans la littérature. Premièrement, il y a plusieurs types d'algorithmes de jumelage pour le covoiturage. Un état de l'art a été réalisé par Agatz et al. (2012). Selon cet article, les systèmes de covoiturage dynamique peuvent être classés selon le nombre de conducteurs et de passagers considérés. On différencie les systèmes qui permettent au conducteur de prendre un seul passager des systèmes qui peuvent en prendre plusieurs lors d'un même voyage. Du côté passager, les systèmes sont classifiés selon que le passager ne puisse monter qu'avec un seul conducteur lors de son voyage, ou puisse enchaîner des portions de trajet avec des conducteurs différents. D'après Agatz et al.

(2012), on peut donc classer les systèmes de covoiturage en 4 catégories : 1 conducteur – 1 passager, 1 conducteur – plusieurs passagers, plusieurs conducteurs – 1 passager, plusieurs conducteurs – plusieurs passagers. Cette classification est particulièrement adaptée au sujet puisque chaque catégorie renvoie à des problèmes différents qui ne sont pas forcément directement liés au covoiturage, mais qui peuvent y être rattachés. Les systèmes 1 passager - 1 conducteur sont les plus simples et sont à la base de l'étude du covoiturage. Les articles traitant de ce sujet visent à trouver des méthodes pour jumeler un passager et un conducteur tout en minimisant les détours réalisés. On se retrouve dans ce cas dans un contexte de problème d'affectation, c'est-à-dire que l'on a des agents (les conducteurs) que l'on doit affecter à des tâches (les passagers) en connaissant les coûts de chaque affectation (les détours). Un état de l'art sur les problèmes d'affectation permet de voir les avancées sur le sujet (Pentico, 2007).

Ensuite, en ajoutant une capacité aux véhicules utilisés, on tombe dans la catégorie 1 conducteur – plusieurs passagers. Ceci rajoute une dimension au problème et on sort totalement du problème d'affectation classique, puisque les points géographiques pour ramasser les passagers sont multiples et différents selon le chemin pris pour récupérer les passagers précédents. Dans cette classe de problèmes, on retrouve les systèmes de ramassage d'employés pour aller sur le lieu de travail. Baldacci, Maniezzo, and Mingozzi (2004) proposent une méthode pour répondre à une entreprise qui souhaite que ses employés viennent au travail et rentrent chez eux avec le moins de véhicules possible, c'est-à-dire en faisant du covoiturage. La méthode doit donc déterminer les véhicules qui doivent être utilisés ainsi que les chemins qui doivent être parcourus par chacun d'eux pour ramasser tous les employés. On se rapproche là de ce que l'on appelle communément des problèmes de « dial-a-ride » et dont on peut trouver une bonne revue de littérature par Cordeau and Laporte (2007). En clair, un problème « dial-a-ride » consiste à trouver les trajets et horaires de ramassage et de dépôt de n utilisateurs par m véhicules connaissant les origines et destinations des n utilisateurs tout en minimisant les coûts de déplacement et en respectant un ensemble de contraintes, comme les préférences des utilisateurs par exemple. La résolution de ces problématiques est de plus en plus efficace et permet de grosses économies d'argent pour les sociétés concernées (Marković, Nair, Schonfeld, Miller-Hooks, & Mohebbi, 2015). La différence principale entre ce genre de problème et les problèmes de covoiturage vient du fait qu'en covoiturage, les conducteurs ne proviennent pas d'un ou plusieurs dépôts et sont des entités indépendantes, non rattachées à une entreprise ou à un service (Agatz et al., 2012).

Pour la catégorie 1 passager – plusieurs conducteurs, il est question de trouver un enchaînement de conducteurs qui permettrait d’amener le passager à destination. En pratique, on voit néanmoins assez mal quelqu’un prendre trois voitures différentes ou plus successivement pour faire un seul trajet, excepté peut-être des trajets très longs. Il faut peut-être donc déjà se concentrer sur la formation de trajets intéressants avec 1 seul changement de véhicules. C’est sans doute pour cette raison que cette catégorie de problème est bien moins étudiée que les catégories précédentes. Néanmoins, ces problématiques doivent logiquement être le socle de l’introduction de la multimodalité dans les systèmes de covoiturages. Il suffit d’intégrer les transports en commun et les différentes offres de transport du réseau comme des offres de conducteurs dont on connaîtrait parfaitement les horaires et les trajets. Pour l’instant, certains se sont tout de même intéressés au sujet. Drews and Luxen (2013) proposent une méthode de covoiturage « multi-hop », c’est-à-dire avec des changements de véhicules, en se basant sur une modélisation du réseau et des emplois du temps en graphe. De la même manière, en utilisant un graphe dont le réseau est seulement composé des offres géographiques et temporelles des conducteurs, Herbawi and Weber (2011) énoncent une méthode où les passagers doivent trouver un chemin acceptable pour aller de leur origine à leur destination sur ce graphe.

Enfin, la catégorie plusieurs passagers – plusieurs conducteurs renvoie à ce qui nous intéresse, c’est-à-dire un système complet de covoiturage où chaque passager peut prendre plusieurs véhicules de suite et où les véhicules ont des capacités et peuvent donc avoir plusieurs passagers à bord.

Un autre point à aborder est qu’une partie des algorithmes dynamiques ne prend en compte que les points d’origine et de destination de chaque utilisateur et propose des jumelages en fonction de ces points. Or, de par cette technique, de nombreux jumelages pertinents sont manqués. On peut mentionner les utilisateurs qui ont en commun seulement une partie de leur trajet et qui pourraient donc se rencontrer à un certain lieu de rendez-vous qui leur est facilement accessible sans pour autant être leur lieu d’origine ou de destination, et qui ne peuvent donc pas être pris en compte dans cette formulation du problème. Des méthodes algorithmiques existent cependant pour jumeler des utilisateurs à des points de rendez-vous intermédiaires (Aissat & Oulamara, 2014).

2.3 Génération de trajets multimodaux

Actuellement, aucun système de covoiturage ne propose de trajets multimodaux, c'est-à-dire dont seulement une partie du voyage de l'utilisateur est réalisé en covoiturage et dont le reste est complété par un segment en transport en commun. La multimodalité est pour l'instant seulement accessible via les grands calculateurs de chemins (GoogleMaps, OpenTripPlanner, Rome2Rio) et, dans ces cas-là, elle ne prend pas en compte l'automobile. Effectivement, la multimodalité des calculateurs de chemin actuels se restreint à l'addition de la marche et des principaux modes de transports en commun (trains, métros, bus, tramways). Ceci est compréhensible, car en dehors d'un système de covoiturage, l'utilisation de sa propre voiture dans un voyage multimodal n'est pas des plus commodes. Il faudrait alors s'assurer que l'utilisateur prévoit un trajet retour pour récupérer son véhicule et qu'il y ait un lieu de stationnement accessible assuré près du lieu de transition. Les infrastructures nécessaires n'étant pas forcément présentes et la demande non visible, aucun calculateur de chemin ne propose simplement un voyage alternant voiture et autres moyens de transport.

Pourtant, dès les années 90, avec les progrès technologiques, de nombreuses données en temps réel concernant les informations de transport, comme la congestion ou les retards, sont devenues de plus en plus facilement accessibles. Certains chercheurs ont alors commencé à introduire des notions qui permettaient d'introduire ces données nouvellement accessibles dans des systèmes de calculs de chemins, de manière à rendre les propositions de trajets plus pertinentes et fiables. Par exemple, en 1996, McCormack and Roberts (1996) ont proposé une méthode, en se basant sur des réflexions orientées-objet, pour rassembler toutes les alternatives de déplacement sur un réseau, que ce soit en transport en commun ou en voiture, et d'en créer un graphe multimodal (voir Figure 2.1.1 et Figure 2.1.2). Le but est ensuite de calculer le plus court chemin sur ce graphe multimodal (voir Figure 2.1.6). Ce concept est relativement proche de la méthodologie énoncée dans ce mémoire. De même, de multiples méthodes de calcul de plus court chemin sur ces réseaux multimodaux ont été suggérées ((Lozano & Storchi, 2001), (Battista, Lucertini, & Simeone, 1996)). Ces méthodes de calcul des plus courts chemins sont adaptées au fait que les réseaux soient multimodaux, notamment grâce à la notion de plus court chemin « viable » de Lozano and Storchi (2001). « Un chemin viable est un chemin qui respecte un ensemble de contraintes sur la séquence des modes utilisés » (Lozano & Storchi, 2001). Ces concepts sont rassemblés par Bielli,

Boulmakoul, and Mouncif (2006) qui proposent un système de proposition de trajets multimodaux sur un graphe comprenant la voiture, la marche, le bus, le train et le métro en utilisant le concept de chemin viable. Ce système n'est pas dynamique et n'utilise pas de données en temps réel et fait d'ailleurs le constat que les multiples données nécessaires pour implémenter un tel système, qui soit utilisable par tout un chacun, n'existent pas encore. Il faut rappeler que ce n'est qu'en cette même année de 2006 qu'a été lancé le format GTFS, « un format commun d'horaire de transport public et d'informations géographiques associées » (Developpers, 2016).

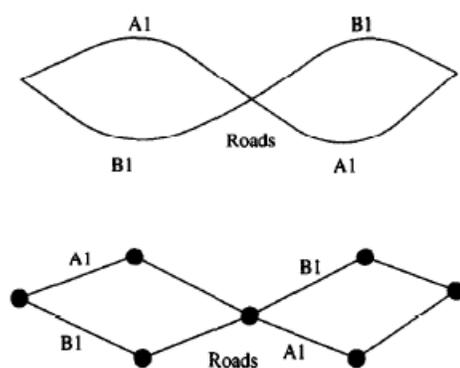


Fig. 1. Physical model of road network.

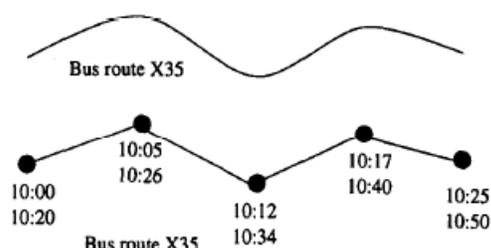


Fig. 2. Physical model of bus network.

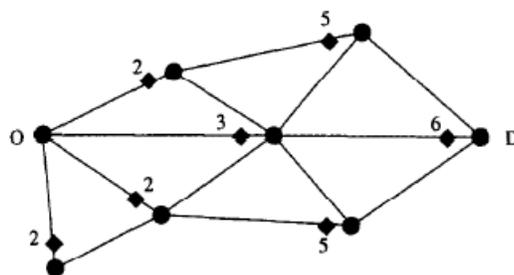


Fig. 6. Finding the optimum path through a network.

Figure 2.1 Notion de génération de trajets multimodaux par graphe (McCormack & Roberts, 1996)

Néanmoins, par la suite, la multimodalité dans les grands calculateurs de trajets ne s'est développée quasi exclusivement que pour des trajets comprenant la marche et les différents moyens de transport en commun, excluant l'automobile. Ces calculateurs sont basés sur des systèmes décrits dans les projets de recherche suivants. Par exemple, pour les longs trajets entre villes, Su and Chang (2010) ont créé un calculateur de chemins multimodaux comprenant le bateau, l'avion,

le bus et le train. Pour ce qui est des trajets multimodaux pour les piétons à l'intérieur d'une ville, Hochmair (2008) analyse les critères d'optimisation de ces trajets, dans le but de simplifier et faciliter l'expérience utilisateur des systèmes de calculateur de chemin.

Mais, même si aucun calculateur multimodal comprenant l'automobile n'est actuellement accessible au grand public, le monde de la recherche a continué à travailler sur le sujet. Des systèmes intégrant à la fois l'automobile, notamment comme moyen d'accès au transport en commun (park-and-ride), et les données de transport en temps réel ont été proposés pour la région de San Francisco (Li, Zhou, Zhang, & Zhang, 2012; Zhang et al., 2011). Ces systèmes se rapprochent de ce qui est mis en place dans ce mémoire, avec pour différence l'absence de la notion de covoiturage. De plus, ces systèmes pourraient être améliorés en analysant les données GPS des utilisateurs sur les trajets multimodaux. En détectant le mode de transport utilisé en fonction de cette trace GPS, on pourrait mieux comprendre les comportements multimodaux des usagers (Yang, Yao, Cheng, Ran, & Yang, 2016).

Pour ce qui est d'intégrer le covoiturage à ces trajets multimodaux, de très récents articles proposent des méthodes adaptées. Kamel Aissat & Varone (2015a, 2015b), Varone & Aissat (2015) proposent par exemple d'allier l'utilisation des services publics de transport en commun avec le covoiturage. Pour ce faire, ils détectent d'abord des points du réseau de transport en commun qu'emprunterait l'utilisateur en temps normal et qui sont propices à l'embarquement (ou au débarquement) d'un covoiturage, et cherchent les meilleures possibilités de déplacement en covoiturage depuis (ou vers) ces points tout en minimisant le temps de parcours. Une méthode multiagents est aussi introduite par Hrnčíř, Rovatsos, and Jakob (2015) où l'algorithme global tente d'améliorer une fonction de coût pour chacun et où le fait de voyager à plusieurs est encouragé en diminuant ce coût.

2.4 Objectifs d'optimisation

En ce qui concerne les objectifs d'optimisation visés par les systèmes de covoiturage, la plupart tendent à diminuer la distance totale parcourue ou plus précisément le temps de trajet total, ce qui est plus judicieux. Par contre, il y a deux types d'objectifs, celui qui vise à diminuer le temps de trajet total de tous les utilisateurs du réseau et celui qui vise à diminuer le temps de trajet de chaque utilisateur, au cas par cas. Ce deuxième type d'objectif ne permet pas d'avoir un temps de

trajet global, pour tous les utilisateurs, optimal; c'est ce qu'on appelle le prix de l'anarchie (Roughgarden, 2005). C'est pourquoi il peut être nécessaire d'utiliser des types d'objectifs différents. Ainsi, certains chercheurs sont inventifs et proposent des méthodes alternatives. Sachant que la pertinence des jumelages trouvés dépend du nombre d'utilisateurs sur le réseau, Kleiner, Nebel, and Ziparo (2011) proposent un système basé sur des enchères. En fonction du détour à réaliser, les utilisateurs fixent des prix et les conducteurs choisissent en toute connaissance de cause leur jumelage en fonction du prix proposé et du détour à réaliser. De cette manière, les alternatives de covoiturage se régulent naturellement en fonction de l'offre et de la demande. Une dernière catégorie d'objectifs consiste à réaliser une optimisation multiobjectif. Il s'agit ici d'optimiser simultanément une liste d'objectifs. Dans ce cas-là, tous les objectifs ne sont pas optimaux en même temps. Néanmoins, l'idée est de se trouver dans une position où l'ensemble des valeurs des objectifs se trouve à l'optimalité dite de Pareto (Marler & Arora 2004); ceci signifie qu'en ce point-là, n'importe quelle tentative d'amélioration d'un objectif entraînera automatiquement la détérioration d'un autre objectif. Dans notre cas, on peut imaginer vouloir en même temps minimiser le temps de trajet, le coût du trajet et les détours réalisés par les conducteurs. Intuitivement, on voit très clairement que dans la plupart des cas, les trois objectifs ne se trouveront pas ensemble à l'optimalité. Un état appartenant à l'optimalité de Pareto sera alors la solution, cette optimalité décrivant les états auxquels n'importe quelle tentative d'amélioration d'un des trois objectifs entraînera une détérioration d'un autre. Par exemple, Herbawi and Weber (2011) mettent en place un système de covoiturage dont les 3 objectifs à minimiser sont le coût et la durée de déplacement ainsi que le nombre de véhicules de suite pris par un passager pour faire son trajet en intégralité.

CHAPITRE 3 ÉNONCÉ D'UNE MÉTHODOLOGIE DE JUMELAGE MULTIMODAL

3.1 Introduction de phénomènes de transport à considérer

Ce chapitre a pour but de présenter, de définir et de mettre en avant des phénomènes du monde du transport qu'il est judicieux de connaître vis-à-vis de notre étude.

3.1.1 Phénomène de variation horaire de la demande

Le système de covoiturage se retrouve implacablement face au problème qu'est la variation de la demande de transport. Ceci est l'une des principales problématiques dans le monde du transport. Les habitudes quotidiennes et le rythme de vie des différents citoyens sont très similaires dans une population. Le citoyen moyen se rend au travail durant la pointe du matin, c'est-à-dire autour de 7h-9h, et rentre du travail durant la pointe de l'après-midi, soit aux alentours de 15h-18h. De ce fait, une bonne partie de la population se retrouve en déplacement aux mêmes périodes, ce qui engendre de la congestion et une saturation du réseau. De même que ces heures de pointe, il y a des heures creuses sur le réseau de transport, notamment la nuit. Le système se voulant être dynamique et adaptatif, ce phénomène de variation de la demande doit être pris en compte.

De plus, l'horaire de la demande en transport dépend fortement du motif de déplacement. Les pointes du matin et de l'après-midi dépendent en grande partie des déplacements de motifs travail ou étude. Les déplacements pour motif loisir ou magasinage sont eux dispersés sur des plages horaires moins précises. Or, il se trouve qu'un système de covoiturage multimodal, tel que Netlift, vise une clientèle de travailleurs qui utiliseraient ce système quotidiennement pour se rendre sur leur lieu de travail. Aussi la grande majorité de la demande pour Netlift se situe-t-elle encore plus précisément sur ces heures de pointe du matin et de l'après-midi.

Cette variation de la demande de transport implique une adaptation du système à ce phénomène. Dans le processus de sélection des jumelages proposés à l'utilisateur, il va falloir adapter la zone de recherche à l'heure de la journée et donc à la demande. A 1h00 du matin, il n'est pas intéressant de rechercher des covoitureurs autour de l'utilisateur dans une zone de recherche aussi étroite qu'en pleine pointe du matin, sous risque de n'en trouver aucun.

3.1.2 Phénomène de variation géographique de la demande

De la même manière que la demande en transport varie en fonction de l'heure de la journée, celle-ci varie en fonction de son emplacement géographique. Au centre de l'agglomération, du fait de la densité de la population vivant ou faisant une activité à cet endroit, la demande est plus importante qu'en périphérie de ville. La densité de demande évolue donc, bien logiquement, avec la densité de population.

Un autre facteur de la variation géographique de la demande réside dans le choix du mode de transport utilisé et disponible. En centre-ville, les modes de transport tels que la marche ou le vélo sont régulièrement utilisés et une grande offre de transport en commun est aussi disponible. En s'éloignant du centre-ville, dans des zones où l'offre de transport collectif est plus pauvre, le principal mode de transport utilisé est la voiture.

Le système de covoiturage se basant sur la voiture, il est aussi important d'observer que le réseau routier en centre-ville est très différent du réseau routier périphérique. D'une part, le réseau routier, de par sa typologie : limitations de vitesse, aménagements routiers (feux de circulation, croisements, etc.) est très différent entre la ville et la banlieue, et d'autre part, il y a la demande qui varie aussi avec des voies particulièrement encombrées contre d'autres moins utilisées. On peut aussi mentionner les lignes de bus qui sont plus nombreuses en ville et ralentissent donc la circulation. En règle générale, le fait que le centre-ville ait une grande densité de population et d'activité fait que les déplacements y sont plus lents. Ainsi, pour parcourir une même distance, cela prend généralement beaucoup plus de temps en centre-ville qu'ailleurs.

Finalement, il est important d'adapter le comportement du système dans sa recherche de covoitureur en tenant compte de la zone géographique du déplacement. De même que le système doit s'adapter à l'heure de la journée, il doit ajuster sa zone de recherche de jumelages aux caractéristiques de déplacements des différentes zones géographiques. Une hypothèse de travail est donc de dire qu'en banlieue, il est vu comme plus acceptable de faire un détour plus grand qu'en centre-ville.

3.1.3 Phénomène de répétabilité de la demande

Imaginons une personne qui va travailler tous les matins et qui veut utiliser notre outil. Quotidiennement, elle va générer une demande pour aller de chez elle à son travail et inversement,

le soir, de son travail à chez elle. Tous les jours, pour cet utilisateur, la demande sera la même. De même, imaginons un utilisateur qui habite près de chez ce premier utilisateur et travaille près de son lieu de travail. Alors, il est extrêmement intéressant que ces deux personnes convoiturent lorsqu'elles doivent réaliser ce trajet à la même heure. Ce genre de jumelage fortement judicieux doit être mémorisé afin qu'il soit réalisé dès que les horaires concordent. Une ville a donc un ensemble propre de jumelages très judicieux qui doit être gardé en mémoire.

3.2 Introduction générale du système de covoiturage multimodal

3.2.1 Objectif du système de jumelage multimodal

L'objectif du dispositif de jumelage est de répondre dynamiquement à une demande de déplacement. Lorsqu'un utilisateur sans voiture souhaite se déplacer d'une origine O_i vers une destination D_i , le système doit pouvoir lui proposer des solutions de déplacement rapides dont les trajets comprennent des segments en voiture, en transport en commun et à pied. Les segments en voiture sont alors réalisés en covoiturage avec un autre utilisateur et le lieu de rencontre du covoiturage doit être fourni. Lorsqu'un utilisateur avec voiture souhaite se déplacer d'une origine O_i vers une destination D_i , le système doit pouvoir lui proposer des solutions de déplacements avec des portions de covoiturage et dont le détour par rapport au trajet sans portion de covoiturage est minimal.

Le système de covoiturage doit être, idéalement, adaptable à tout changement sur le réseau et à toute nouvelle ville. L'idée est que l'installation d'un tel système dans une nouvelle ville soit rapide, simple et nécessite seulement la configuration de quelques paramètres.

La grosse difficulté du système que l'on veut créer provient de sa multimodalité. Effectivement, sans multimodalité, les calculateurs de chemins classiques permettent de générer des trajets automobiles entre deux points. Mais ici, en voulant générer des trajets multimodaux, l'utilisation simple d'un calculateur de chemin ne fonctionne pas. Et c'est ici que s'inscrit ce projet de recherche à propos de la génération d'alternatives de trajets multimodaux.

Pour illustrer tout ça, la partie suivante présente le fonctionnement global de l'algorithme de covoiturage que l'on propose.

3.2.2 Présentation de l'algorithme de jumelage

Lorsqu'un nouvel utilisateur fait une demande de déplacement via l'application de covoiturage, l'algorithme de jumelage fonctionne de la manière illustrée sur la Figure 3.1.

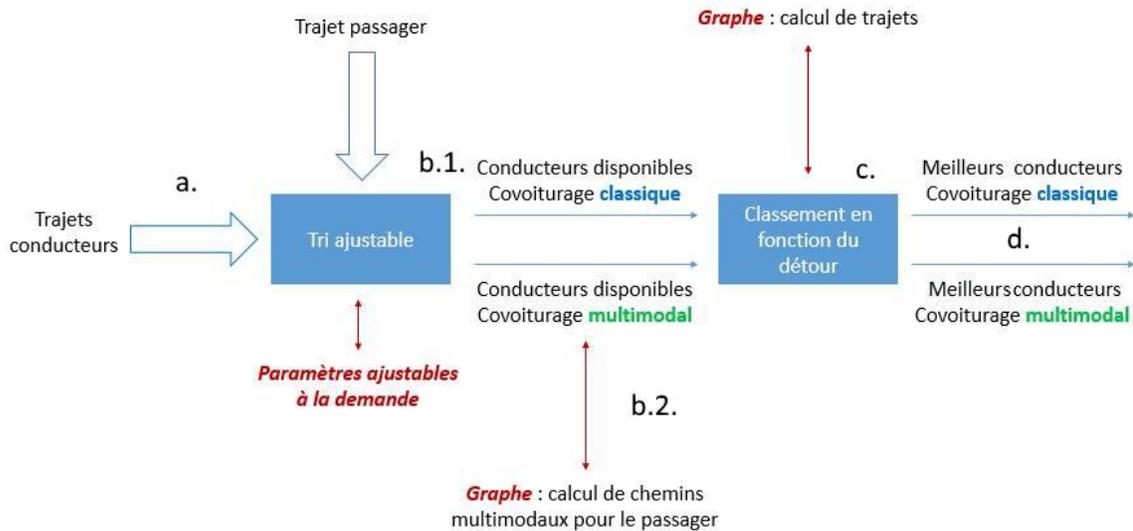


Figure 3.1 Algorithme général lors d'une nouvelle demande utilisateur

- a. **DEMANDE D'UN NOUVEAU TRAJET PASSAGER** : Lorsqu'un utilisateur passager fait une demande de nouveau trajet t_0 , il informe une origine et une destination géographique ainsi qu'un horaire de départ ou d'arrivée.
- b. 1. **TRI AJUSTABLE** : Afin d'économiser du temps de calcul, le principe du tri ajustable est d'écarter d'ores et déjà les demandes de trajet qui ne pourront pas être jumelées avec la demande de trajet t_0 . Le système parcourt l'ensemble T des trajets conducteurs en attente (liste de toutes les demandes de trajets faites précédemment par des utilisateurs conducteurs) et élimine tous les trajets qui ont des caractéristiques trop différentes de la demande t_0 . Cela comprend évidemment tous les trajets dont les horaires sont trop éloignés, mais en plus, ce tri peut se baser sur des considérations géographiques. Un rapide exemple de tri est de supprimer un trajet conducteur si son origine est la destination de t_0 , et inversement. Ce tri grossier permet donc d'éliminer tous les trajets trop différents du trajet t_0 et de retenir une liste des trajets de conducteurs disponibles.

2. En parallèle de ce tri, l'opération de génération de trajets multimodaux pour le passager peut être entreprise. Cette opération est le sujet de ce projet de recherche puisqu'elle consiste, à partir d'une origine et d'une destination, à générer un ensemble de trajets multimodaux pour répondre à la demande de déplacement.
- c. **CLASSEMENT DES COVOITURAGES** : Une fois que la liste des covoitureurs disponibles a été créée et qu'une liste des trajets multimodaux possibles a été générée, il faut associer les covoitureurs disponibles à la liste des trajets multimodaux. Dans la liste des trajets multimodaux, tous les segments en voiture sont associés aux conducteurs disponibles. On simule donc, pour chaque trajet multimodal et pour chaque conducteur, quel serait le chemin parcouru pour que le conducteur transporte le passager lors des segments routiers du trajet multimodal concerné. On classe alors tous les couples trajet multimodal-conducteur en fonction du détour généré pour le conducteur.
- d. **PROPOSITION À L'UTILISATEUR** : Lorsqu'on a la liste classée de tous les couples trajet multimodal-conducteur, on choisit les meilleurs et on les propose à l'utilisateur afin qu'il puisse choisir, en fonction de ses préférences, quel échange il souhaite réaliser. Avant de les proposer à l'utilisateur, les meilleurs jumelages choisis sont simulés sur Google Maps ou un autre calculateur de chemin afin d'identifier un itinéraire précis et d'estimer l'heure d'arrivée.

3.2.3 Contextualisation de la méthodologie de génération de trajets multimodaux

Le sujet de ce mémoire, et donc la méthodologie qui est décrite dans la suite, concerne la génération de trajets multimodaux survenant dans la partie b.2 de l'algorithme ci-dessus. Effectivement, en parallèle d'un premier tri qui doit être réalisé parmi les conducteurs en attente, le système de covoiturage doit générer un ensemble de trajets multimodaux pour l'utilisateur passager. Un trajet multimodal est un trajet, entre l'origine et la destination du passager, qui peut être composé de segments en transport en commun, en voiture ou à pied. Le trajet en voiture sera alors fait en covoiturage dans le véhicule du conducteur choisi dans la suite de l'algorithme.

Pour générer un trajet multimodal, il faut trouver la suite de segments automobiles, en transport en commun et à pied qu'il faut réaliser, mais aussi savoir comment doit se passer la transition d'un

mode de transport à l'autre. Pour ce qui est de débiter ou de terminer un segment de transport en commun, l'action se fait logiquement à l'arrêt de transport en commun en question. Pour ce qui est de la marche, il n'y a aucune transition à prendre en compte. Néanmoins, pour les transitions en automobile, il faut déterminer le lieu où le passager et le conducteur doivent se rencontrer.

Il faut donc penser une méthodologie qui, en générant les trajets multimodaux, génère aussi les lieux géographiques où doivent se faire les transitions entre modes de transport, et ici, en l'occurrence, où est-ce que le conducteur doit embarquer le passager dans son véhicule. Ces points d'embarquement (et de débarquement) sont par la suite appelés points de jonction et une partie du projet est de définir une méthodologie de détermination de ces points de jonction.

Ensuite, le cœur du projet étant de déterminer des trajets multimodaux, c'est la théorie des graphes qui est utilisée. Effectivement, une fois les points de jonction créés, l'objectif est de créer un graphe multimodal, c'est-à-dire contenant toutes les possibilités de déplacement en transport en commun, à la marche et en voiture, sur lequel un calcul de plus court chemin doit déterminer les meilleures alternatives pour réaliser un déplacement multimodal. L'enjeu est de créer un tel graphe fonctionnel à partir de différentes données sources caractérisant le réseau routier, piéton et de transport en commun.

Dans la suite, la méthodologie de détermination des points de jonction est présentée avant de s'intéresser à la création du graphe.

3.3 Méthodologie de détermination des points de jonction

3.3.1 Définition d'un point de jonction

Un point de jonction est un point accessible du réseau où il est possible de stationner en toute sécurité le temps que le covoitureur passager, soit descende du véhicule pour se rendre vers un arrêt de transport en commun, soit embarque alors qu'il vient d'effectuer une portion de son trajet en transport en commun. Le lieu doit être sécuritaire pour que le premier, arrivant au point de jonction, puisse attendre le second dans de bonnes conditions. Les besoins pour une bonne attente sont plus élevés pour le covoitureur conducteur, qui lui a une voiture, que pour le covoitureur passager. Les conditions nécessaires à la définition d'un point de jonction sont donc établies par les besoins minimums du conducteur. Il devra effectivement pouvoir stationner son

véhicule en toute sécurité en attendant que le covoitureur passager finisse son trajet de transport en commun.

La condition minimale est que le conducteur puisse garer son véhicule durant l'attente. Un point de jonction est donc inévitablement constitué minimalement d'une place de stationnement. Cette place de stationnement devra être publique et facile d'accès. Les places de stationnement privées ou les stationnements payants ne doivent pas être pris en compte. Typiquement, on trouve ce genre de places de stationnement près des lieux de magasinage, des restaurants, des centres commerciaux, des écoles et de toute infrastructure se voulant facile d'accès pour le public et où le stationnement temporaire est donc possible.

3.3.2 Données sources pour la définition des points de jonction

Afin de définir les points de jonction sur le réseau, une méthodologie est ici proposée. L'objectif est de créer un processus qui récupère les informations pertinentes du réseau, les traite, et génère finalement une liste des points de jonction dans une zone géographique.

Pour définir les points de jonction dans une ville ou dans une zone géographique, de façon automatique, il faut avoir accès à des informations sur le réseau et les infrastructures qui soient précises et à jour. Effectivement, il peut être intéressant de recréer les points de jonction du réseau de façon régulière afin de prendre en compte les aménagements les plus récents et chantiers qui ont été effectués. À cet effet, l'utilisation d'OpenStreetMap est conseillée. OpenStreetMap est une plateforme de données sous licence libre qui fournit des données cartographiques. Les données sont mises à jour par des cartographes bénévoles et la validité des données dépend donc de la communauté. Néanmoins, cette plateforme est largement utilisée et contient assez peu d'erreurs. M. Haklay (2010) a analysé les données OSM de 2008 en Grande-Bretagne, en les comparant aux données de l'ordnance survey (OS). Cette étude montre que les données OSM se situent en moyenne à six mètres des données OS. De même, le taux de recouvrement des autoroutes dans les deux bases de données est de 80%. Néanmoins, les études des données OSM montrent en général que la précision et la complétude des données est très grande dans les zones urbaines, mais beaucoup plus faible en zone rurale (M. Haklay, 2010; Neis & Zielstra, 2014; Zielstra & Zipf, 2010). En 2008, seules 29% de l'aire de l'Angleterre était couverte. Par contre, la même étude menée un an plus tard, en 2009, montre que la couverture est passée à 65% (Haklay, 2010). Les données OSM et leur complétude ont donc évolué très rapidement, si bien que de nombreuses

applications et entreprises se basent maintenant sur leurs données ; on peut citer Skobbler ou Strava. Le fondateur d'OSM affirme même que les données sont aussi bonnes voir meilleures que celles de Google Maps (Sterling, 2014).

Le site d'OpenStreetMap se présente comme une carte créée selon le principe de Wikipédia (voir sur la Figure 3.2). Depuis cette carte, plusieurs outils permettent, soit d'apporter sa contribution aux données sur la carte, soit de récupérer ces données. On peut par exemple définir un cadre sur la carte et récupérer toutes les données géographiques englobées. On peut aussi récupérer les données par ville ou par pays. Enfin, un grand nombre d'outils permettent de communiquer avec la base de données de la plateforme.

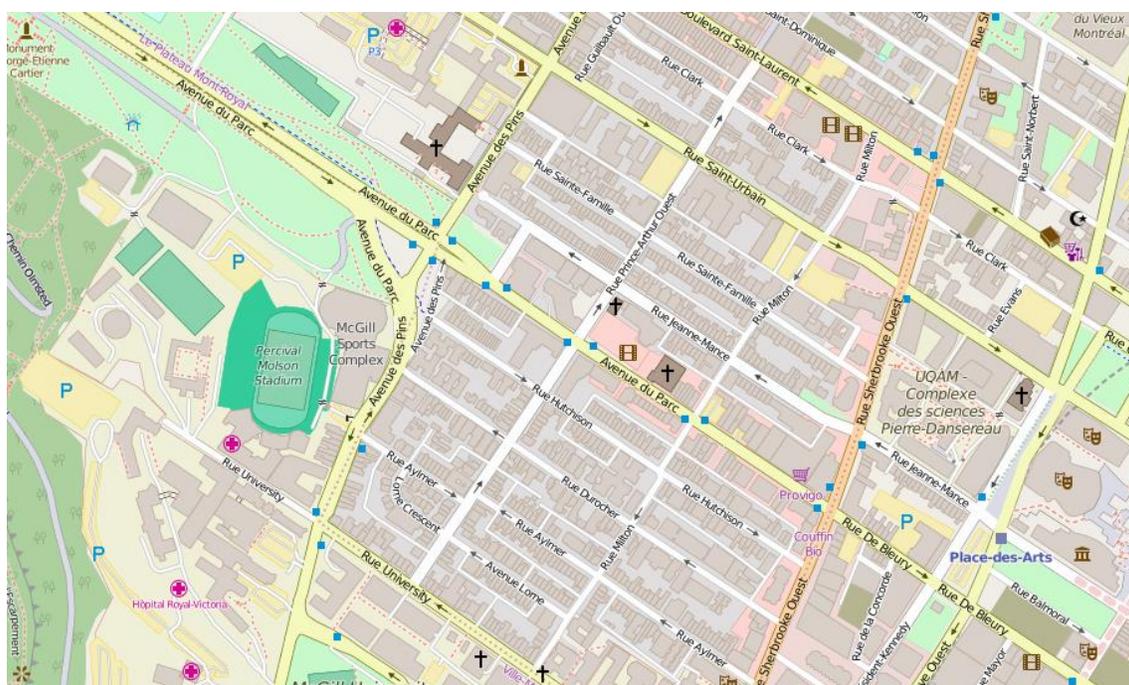


Figure 3.2: Aperçu d'une carte OpenStreetMap

Pour la création des points de jonction de notre réseau, l'outil qui a été utilisé s'appelle Overpass API. Il s'agit d'une API de lecture, c'est-à-dire une interface qui permet de communiquer avec la base de données OSM pour récupérer les données demandées. L'API fonctionne de la manière suivante :

- l'utilisateur formule une requête dans un langage propre à l'API (haut niveau),
- l'API transforme la requête et l'envoie à OSM,
- les données réponses de la requête sont renvoyées par OSM,

- l'API affiche les données à la fois sur une carte et en données brutes,
- les données peuvent être exportées.

Le langage propre à l'API, Overpass QL, est de haut niveau et est donc rapidement pris en main, notamment grâce à un wiki qui référence toutes les fonctionnalités (voir Annexe C). Pour récupérer les données voulues, les requêtes formulées fonctionnent sur le principe des « tags » (étiquettes auxquelles sont attribuées des valeurs comme par exemple `access=customer` ou `fee=yes`), qui est un des principes de base d'OSM. Ainsi, quand un cartographe apporte sa contribution aux données d'OSM, il définit un point, une ligne ou une zone et attribue des valeurs par tags. On a un exemple de stationnement sur la Figure 3.3. Sur cette figure est illustrée la composition d'un élément OSM. Après avoir sélectionné un stationnement sur la carte, on peut voir ses caractéristiques, définies par des tags, et les modifier ou en ajouter. De plus, un wiki OSM (cf. Annexe D) permet de définir des normes pour les tags afin d'uniformiser au maximum les données collectées.

| Tag | Value | Delete | Edit |
|-------------|-------------------------|--------|------|
| access | customers | 🗑️ | i |
| addr:street | Rue Murray | 🗑️ | i |
| amenity | parking | 🗑️ | i |
| fee | no | 🗑️ | i |
| name | parking pour la clie... | 🗑️ | i |
| operator | Artè | 🗑️ | i |
| parking | surface | 🗑️ | i |
| surface | asphalt | 🗑️ | i |

Figure 3.3: Édition d'un élément de stationnement avec ses tags associés

C'est en se basant sur les différents tags des éléments du réseau routier que l'on va sélectionner nos zones géographiques qui peuvent être définies comme des points de jonction.

3.3.3 Création des points de jonction

3.3.3.1 Définition d'un stationnement accessible

Comme mentionné précédemment, un point de jonction est un endroit géographique permettant à un véhicule de stationner en toute sécurité. Pour identifier les points de jonction, on précise bien qu'on écarte les places de stationnement pour lesquelles il y a le moindre doute quant à l'impossibilité d'opérer une opération de covoiturage. On définit donc en premier lieu ce que l'on appelle un « stationnement accessible ». Un stationnement accessible est un endroit où une opération de covoiturage peut être réalisée, car l'espace de stationnement répond aux critères suivants :

- n'est pas privé,
- n'est pas multiétagé,
- n'est pas souterrain,
- n'est pas un hangar,
- est gratuit,
- ne comprend pas de barrières à l'entrée.

On peut finalement extraire d'OSM tous les stationnements accessibles de Montréal en utilisant les tags adéquats dans notre requête. À tous ces stationnements accessibles relevés, on rajoute toutes les stations d'essence, car elles sont un lieu parfait pour réaliser une opération de covoiturage.

3.3.3.2 Hiérarchisation des potentiels points de jonction

Une fois tous ces points définis comme étant des potentiels points de jonction, chaque point va être noté en fonction de son aptitude à permettre une opération de covoiturage. L'intérêt de cette notation est d'associer à chaque arrêt de transport en commun le potentiel point de jonction qui, dans une distance accessible à pied, a le plus gros score. Ce point est alors qualifié comme étant le point de jonction associé à l'arrêt de transport en commun en question.

Ce principe de notation des potentiels points de jonction a deux gros avantages. D'une part, l'échelle de notation est totalement flexible et à tout moment, une nouvelle méthode de notation peut être mise en place. D'autre part, le système de notation peut être dynamique. On peut imaginer une application mobile sur laquelle l'utilisateur puisse mentionner si l'opération de covoiturage, au point de jonction qui lui a été proposé, n'a pas pu se faire dans de bonnes conditions. Si c'est le cas, le score de ce point de jonction pourrait être réévalué et on peut imaginer un autre point lui passer devant pour devenir le point de jonction relié à l'arrêt en question.

Pour établir le score d'un potentiel point de jonction, on peut prendre en compte plusieurs aspects de ce point. Tout d'abord, un des éléments principaux est la distance du point à l'arrêt de transport en commun considéré. Plus le point est proche de l'arrêt de transport en commun, plus son score est élevé. Ensuite, on peut prendre en compte bon nombre d'autres paramètres. Sur la requête visible dans l'annexe C, on peut remarquer qu'on considère aussi la proximité des infrastructures telles que les écoles, les hôpitaux ou les centres commerciaux. Effectivement, on considère que la proximité de ces infrastructures assure une plus grande confiance dans la possibilité de se garer en toute sécurité.

3.3.4 Dispositif technique de création des points de jonction

Comme mentionné précédemment, les données de base sont des données OSM récupérées par le biais de l'API Overpass. Cependant, pour pouvoir automatiser le dispositif de création des points de jonction, on ne peut pas se permettre d'aller à chaque fois visiter le site de l'API Overpass. Heureusement, une API Node.js existe qui permet de communiquer avec Overpass, dans le langage propre à Overpass, et de récupérer les données directement via un script Node.js.

Le dispositif final s'articule de la façon suivante (voir Figure 3.4). Via un script Node.js, un serveur est créé et peut communiquer avec Overpass. Une requête, que l'on peut stocker comme un fichier texte afin de l'éditer facilement, est envoyée depuis le programme Node.js. Overpass reçoit la requête, fouille dans les données OSM de manière à récupérer les données demandées. Les données sont renvoyées dans le programme Node.js qui les stocke en JSON. Un programme JAVA récupère ensuite ces données pour les manipuler à sa guise et finalement, les stocker dans la base de données PostgreSQL qui sera utilisée dans toute la suite du projet.



Figure 3.4: Dispositif technique de la création des points de jonction

CHAPITRE 4 GRAPHE MULTIMODAL

4.1 Définition et objectifs d'un graphe multimodal

4.1.1 Notion de graphe multimodal

Un graphe est un ensemble de nœuds reliés par des liens. Dans notre cas, les nœuds symbolisent des points géographiques et les liens les reliant sont les possibilités de déplacement entre ces points avec un temps de parcours défini. Toute une théorie mathématique existe autour des graphes. La notion de graphe routier par exemple est déjà un concept largement utilisé où chaque nœud représente par exemple un carrefour et où les liens représentent les routes reliant ces carrefours. Néanmoins, nous voulons ici introduire la notion de graphe multimodal. C'est-à-dire qu'on veut créer un graphe représentant toutes les possibilités de déplacement sur le réseau routier combiné avec le réseau de transport en commun. En utilisant des méthodes propres à la théorie des graphes, on pourrait donc trouver les meilleurs trajets pour se rendre d'un point d'origine à un point de destination en utilisant soit la voiture, soit le transport en commun, soit les deux, un à la suite de l'autre.

Pour ce faire, le graphe multimodal se doit d'être l'union d'un graphe routier, d'un graphe de transport en commun ainsi que d'un graphe de transition, reliant les deux premiers graphes cités.

4.1.2 Les enjeux du graphe multimodal

En créant un graphe multimodal, on permet de prédire le plus court chemin entre une origine et une destination lorsqu'un utilisateur le demande, en prenant en compte les différents modes de transport disponibles. Le but est donc de trouver en temps réel, en réponse aux demandes des utilisateurs, des possibilités de déplacement sur le réseau qui soient convenables. Cette instantanéité des réponses implique que les calculs soient extrêmement rapides et, pour ce faire, le graphe se doit d'être le plus petit possible (en termes de nombre de liens) tout en étant le plus proche possible de la réalité. Les enjeux autour de la création du graphe gravitent tous autour du compromis entre une vraisemblance et une justesse des résultats trouvés par le graphe, tendant à grossir la taille du graphe, et une rapidité des calculs faits sur le graphe, tendant à diminuer la taille du graphe.

Le but du graphe étant de trouver les meilleures alternatives multimodales pour se rendre d'une origine à une destination, l'enjeu de la précision du graphe ne se situe pas spécialement autour de l'exactitude des temps de parcours calculés, mais plutôt autour de la hiérarchisation des temps de parcours calculés. Ceci signifie que lorsqu'on calcule les temps de parcours sur plusieurs alternatives pour répondre à une demande de déplacement, il faut que les meilleures alternatives calculées par le graphe soient les meilleures alternatives dans la réalité, sans nécessairement générer un temps de parcours qui soit précis. Une fois les meilleures alternatives trouvées, leurs temps de parcours « exacts » sont calculés par l'algorithme de covoiturage, via une entité externe (Google Maps, OTP, etc...).

Dans une moindre mesure, un autre enjeu à prendre en compte est le temps de construction du graphe. Effectivement, outre la réponse aux demandes des utilisateurs qui se fait en temps réel, il faut auparavant construire le graphe sur lequel fonctionne l'algorithme. De plus, ce graphe doit être reconstruit régulièrement de façon à être à jour par rapport aux modifications du réseau routier et de l'offre de transport en commun. Au niveau de l'offre de transport en commun, on peut penser à recréer le graphe à chaque fois qu'un nouveau fichier GTFS est disponible (six fois par année pour la STM). Au niveau du réseau routier, le graphe peut être reconstruit à chaque fois que, par exemple, le réseau artériel défini par la Communauté métropolitaine de Montréal est modifié, ce qui est relativement peu fréquent. Au contraire, si les exigences en matière de précision du graphe routier sont très élevées, le graphe peut être reconstruit quotidiennement en fonction des zones de travaux sur le réseau routier. Dans certains cas, en fonction de la rigueur demandée au graphe, le temps nécessaire à la construction du graphe peut devenir un enjeu. Dans la suite, on va voir quels sont les paramètres qui influent sur la vitesse de création du graphe multimodal.

4.1.3 Intervalle de temps du graphe

Comme mentionné précédemment, les déplacements sur les infrastructures de transport varient beaucoup au cours de la journée. La congestion et la variation de l'offre de transport en commun font que, par exemple, pour se rendre d'une même origine à une même destination, le trajet optimal peut être complètement différent s'il est effectué à 8h ou à 23h, un jour de semaine ou de fin de semaine.

Bien évidemment, le graphe multimodal doit prendre en compte ce phénomène et proposer des trajets adaptés à l'heure de la journée à laquelle ils doivent être effectués. La solution proposée

pour répondre à cette contrainte est de construire plusieurs graphes. Chaque graphe aurait son intervalle de temps, c'est-à-dire la période de la journée qu'il représente. Si un graphe a un intervalle de temps de 9h-15h, alors il est censé simuler le réseau à ces heures-là. Ainsi, lorsqu'on calcule les temps de parcours sur les liens du graphe, les temps de parcours de référence doivent être pris sur des trajets effectués dans l'intervalle de temps, en l'occurrence entre 9h et 15h. Plus de graphes seront créés, plus le système sera précis. Un système sera d'autant plus précis que son intervalle de temps sera court.

4.1.4 Découpage de la ville en zones

Un graphe est constitué d'un ensemble de nœuds. Chaque nœud correspondant à un ou plusieurs lieux géographiques, on décide de découper la ville en un ensemble défini de zones. Dans la suite, la ville est donc découpée en zones carrées (voir Annexe B) dont chacune sera représentée par un nœud dans le graphe. De cette manière, l'ensemble des points d'une zone se voit attribuer un comportement similaire dont les détails vont être décrits dans la suite lors de la construction du graphe. Logiquement, plus le découpage est grossier et les zones larges, moins le graphe est précis, mais plus les calculs sont rapides. La taille des zones résulte donc du compromis entre la vraisemblance des résultats et la vitesse des calculs.

Le fait que les zones soient carrées est certainement une limite de l'étude même si des pistes d'amélioration du zonage sont proposées dans la suite. On pourrait implémenter des zones dont la forme est adaptée à la géographie du lieu, voire même à la demande en transport. Néanmoins, le fait de changer la forme des zones ne modifie en aucun cas la méthodologie présentée ci-après.

4.2 Graphe routier

4.2.1 Introduction du graphe routier de base

L'idée du graphe routier est d'estimer par la route, en voiture, le temps mis pour aller d'une origine à une destination ainsi que l'itinéraire emprunté. Par itinéraire emprunté, on signifie la suite de zones empruntées. Chaque zone est donc représentée par un centroïde, sommet du graphe multimodal, et 8 liens reliant ce centroïde avec les centroïdes des 8 zones adjacentes. Chaque centroïde représente tous les points de la zone. Le centroïde n'est donc pas un point physique, mais plutôt le représentant de l'ensemble des points de la zone. Ainsi, lorsqu'une demande de trajet est

formulée, l'origine du calcul de chemin sera le centroïde de la zone dans laquelle se trouve l'origine exacte de la demande. Ensuite, les liens vers les zones adjacentes peuvent être parcourus.

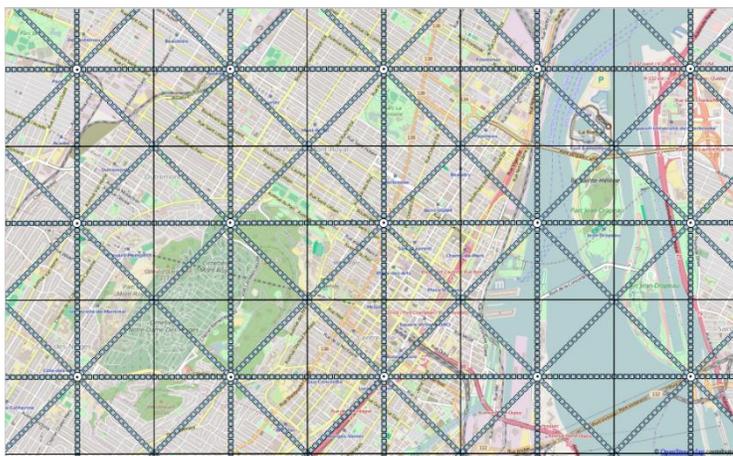


Figure 4.1: Réseau routier de base

4.2.2 Influence de la directionnalité des liens

Avant de parler des temps de parcours sur les liens, il est important de noter que l'étude se fait avec des liens bidirectionnels. C'est-à-dire que chaque lien peut être parcouru dans les deux sens et que par conséquent, le temps de parcours sur le lien est indifférent du sens dans lequel le lien est emprunté. Ceci génère une imprécision puisqu'il pourrait y avoir une différence de durée entre un trajet allant d'un point A à un point B et un trajet allant de ce même point B vers le point A.

Dans la suite de l'étude, le graphe n'est composé que de liens routiers bidirectionnels. Tout en sachant l'erreur induite, cela permet que le graphe soit réduit de moitié. Effectivement, des liens unidirectionnels multiplieraient la taille du graphe routier par 2 et augmenteraient donc énormément les temps des calculs réalisés sur le graphe. Dans tous les cas, la méthodologie énoncée dans la suite est applicable indépendamment du choix de l'uni (ou de la bi)-directionnalité des liens. Il faut simplement adapter, lors du calcul des temps de parcours sur les liens, l'origine et la destination des trajets pris en référence.

4.2.3 Temps de parcours sur les liens du graphe routier de base

Les liens routiers sont pondérés d'un temps de parcours. Les centroïdes n'étant pas des points physiques, mais des représentants de l'ensemble des points de la zone représentée, les temps

de parcours sur ces liens doivent être une moyenne des temps de parcours entre les points de la zone A et les points de la zone B. Pour calculer ce temps de parcours moyen, il a été choisi de prendre Np (lors de la construction du graphe utilisé lors des tests, Np a été fixé à 10) points aléatoirement répartis selon une loi uniforme par zone. Le temps de parcours du lien reliant la zone A à la zone B est alors calculé comme étant la moyenne des temps de parcours entre les Np points de la zone A et les Np points de la zone B. De cette manière, tout trajet ayant pour origine un point de la zone A et comme destination un point de la zone B se verra attribuer le temps moyen de parcours entre ces deux zones.

4.2.4 Limites d'un tel réseau routier

Néanmoins, imaginons qu'un trajet ait une origine et une destination très éloignées. Le parcours le plus rapide pour effectuer ce trajet sera de passer par une grande artère, voire une autoroute. Or, le temps de parcours moyen entre chaque zone à traverser a été préalablement calculé avec des trajets courts, entre deux zones mitoyennes, comme expliqué auparavant. Ces trajets étaient donc pour la plupart composés de petites rues ou de voies un peu plus lentes. Aussi est-il indispensable de prendre en compte l'impact des grandes artères dans notre graphe routier. On ne peut pas calculer nos temps de parcours exclusivement comme une addition de temps de parcours de trajets de courtes distances. Nous détaillons un exemple concret ci-dessous.

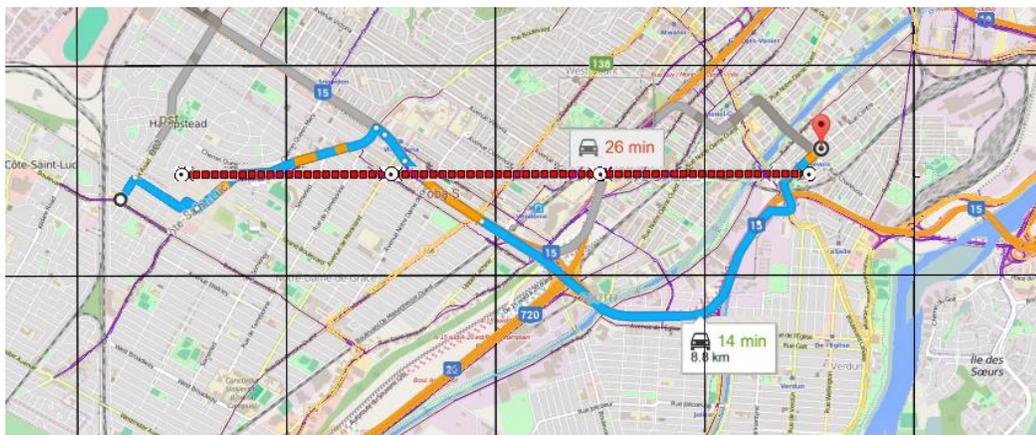


Figure 4.2: Erreur induite sur les longs trajets

Prenons une origine et une destination au hasard (voir Figure 4.2). Faisons notre étude à 18h30. En utilisant un calculateur précis, nous trouvons qu'il faut 14 minutes pour se rendre de l'origine à la destination. On calcule ensuite les temps de parcours sur les liens entre centroïdes

pour faire le déplacement le plus rapide possible, pour le même horaire. On trouve alors, sur notre graphe, en empruntant les liens routiers, un temps de parcours de 26 minutes. Le temps de parcours sur notre graphe est, dans ce cas-là, quasiment doublé par rapport au temps de parcours réel. Ceci est dû au fait que, comme on le voit clairement sur l'itinéraire exact, le conducteur n'utilise quasiment que le réseau artériel. Environ 60% du trajet s'effectue sur l'autoroute et 30% sur des boulevards. Seuls 10% du parcours se trouve dans des rues secondaires. Or, pour le calcul de temps de parcours sur les liens interzones, les trajets sont trop courts pour nécessiter d'emprunter à chaque fois le réseau artériel ou le réseau autoroutier. Les temps de parcours en sont ainsi sous-évalués par absence de la prise en compte du réseau artériel. Pour conclure, ce réseau routier de base perd vite en précision sur les longs trajets.

4.2.5 Présentation du graphe routier artériel

Pour corriger cette caractéristique, l'idée a donc été de créer un graphe routier en deux parties : une partie serait le graphe routier de base que l'on vient de construire et la deuxième partie serait le « graphe artériel ». Ce graphe artériel doit permettre de modéliser l'utilisation par l'automobiliste du réseau artériel, défini par la Communauté métropolitaine de Montréal.

4.2.5.1 Création des nœuds et liens routiers artériels

Pour cela, des « nœuds artériels » ont été définis dans toutes les zones contenant une voie du réseau artériel. Ces nœuds artériels sont définis comme l'intersection du réseau artériel et des frontières des zones. Les nœuds artériels sont donc les points d'entrée (et de sortie) dans les zones via le réseau artériel. Ce sont des points géographiques réels, contrairement aux centroïdes qui, eux, représentent un ensemble de points virtuels.

Avec tous les nœuds artériels aux frontières de la zone, il est possible ensuite de créer les liens artériels qui modélisent le comportement des automobilistes vis-à-vis de leur utilisation du réseau artériel. Ainsi, des liens entre les différents nœuds artériels sont définis et symbolisent l'utilisation du réseau artériel pour traverser une zone. Le temps de parcours sur ce lien est donc le temps réel de parcours entre les deux nœuds artériels physiquement définis. On se retrouve donc avec une modélisation de l'utilisation de réseau artériel pour traverser la zone.

4.2.5.2 Création des liens routiers de transition

À ce stade-là, nous avons donc un réseau routier basique qui symbolise le parcours d'une zone à l'autre, sur des courts trajets, et un réseau routier artériel qui symbolise l'utilisation des grandes artères et autoroutes. Mais pour l'instant, rien ne fait la liaison entre ces deux réseaux. Ainsi, lorsqu'une demande de trajet est effectuée et que l'utilisateur se retrouve sur un centroïde de base, il lui est impossible d'accéder au réseau artériel. Pour finaliser le graphe routier, il nous faut donc créer des liens d'accès au réseau artériel depuis le réseau routier de base. Des liens supplémentaires (liens routiers de transition) sont donc définis entre chaque nœud artériel et le centroïde de chacune des deux zones frontalières du nœud artériel. De cette façon, comme illustré sur la Figure 4.3, nous avons pour chaque zone, des liens routiers artériels qui modélisent la traversée de la zone par le réseau artériel et des liens routiers de transition qui permettent, depuis le réseau routier de base présenté auparavant et représenté par le centroïde, d'accéder au réseau artériel.



Figure 4.3: Réseau artériel d'une zone de Montréal

Le graphe routier paraît maintenant bien prendre en compte le réseau artériel, autoroutier et secondaire, mais avant de le finaliser, il a fallu faire face à des obstacles et formuler des

hypothèses, notamment quant à la définition d'un nœud artériel comme intersection du réseau artériel de la CMM avec les frontières des zones.

4.2.5.3 Notion de nœuds artériels représentatifs et de ses nœuds substitués

D'une part, on se retrouve souvent dans une situation où le réseau artériel comprend de nombreux liens pour une même route. Ainsi, chaque lien du réseau artériel représente par exemple un sens de circulation pour un même boulevard. On se trouve donc avec deux nœuds artériels pour une même route. On se retrouve même dans des situations beaucoup plus complexes quand il s'agit d'échangeurs ou de carrefours. Il y a alors un grand nombre de liens du réseau artériel dans un petit périmètre et, si l'on garde la définition stricte d'un nœud artériel comme étant l'intersection de la frontière d'une zone avec le réseau artériel, il y a création de plusieurs nœuds artériels à quelques dizaines de mètres les uns des autres. Cette situation n'est à aucun moment recherchée puisque le graphe artériel se doit de simuler l'emprunt du réseau artériel par des points de passage sans avoir besoin de savoir quelle voie exacte doit être parcourue. Il a donc été décidé de créer un seul nœud artériel représentatif par groupement de nœuds artériels proches plutôt que de considérer l'intégralité de ces nœuds. On parle alors d'un nœud artériel représentatif et de ces nœuds substitués.

Pour choisir ce nœud artériel représentatif, il a été décidé de rassembler tous les nœuds distants de moins de 600 m (distance de voies distinctes) et se situant sur la même frontière. Le but de la création de ces nœuds artériels représentatifs est de diminuer le nombre de nœuds et de liens dans le graphe afin d'avoir un temps de calcul sur le graphe qui soit le plus petit possible tout en maintenant une qualité et une vraisemblance dans les comportements des trajets sur le graphe. Il faut que les nœuds artériels représentatifs soient assez éloignés pour ne pas être trop nombreux. Mais il faut aussi que les nœuds substitués ne soient pas trop éloignés pour qu'en fin de compte les temps de parcours sur les liens du graphe qui passent par le nœud artériel représentatif reflètent une certaine réalité de ces points-là. Et finalement, il faut aussi que les points substitués soient sur une même frontière puisque les liens artériels sont créés entre les deux zones auxquelles appartient la frontière.



Figure 4.4: Nœuds artériels et points substitués

Cette valeur de distance de voies distinctes est à fixer a posteriori. Elle est sensée rassembler des points appartenant à une même route, chacun symbolisant une voie ou un sens de circulation différent, ou tout du moins, à des passages du réseau routier qui puissent mener vers (ou être atteints depuis) d'autres points du réseau routier dans une même fenêtre de temps. Lors de l'étude, elle a été fixée à 600 m, car cela a semblé être un bon compromis. Mais cette valeur doit être modifiée après que le graphe ait été testé. Effectivement, en augmentant cette valeur, on diminue grandement le nombre de nœuds, et donc de liens, dans le graphe et on augmente conséquemment la vitesse de calcul sur le graphe. Par contre, en la diminuant, le graphe gagne en précision et en vraisemblance puisque chaque nœud artériel a moins de nœuds substitués et représente donc mieux la situation réelle. Le choix de cette valeur est donc un compromis à faire entre la vitesse de calcul désirée sur le graphe et la précision des prédictions du graphe. Sur la Figure 4.4, avec cette valeur fixée à 600m, il y a un nœud qui pourrait poser problème, ou tout du moins diminuer la précision des résultats du graphe. Il s'agit du seul nœud artériel représentatif sur la frontière ouest de la zone. On remarque qu'un de ses points substitués se trouve sur l'autre rive du canal. On peut imaginer que les temps de parcours sur les liens issus du nœud artériel représentatif soient différents du temps réel de parcours depuis ce point physique substitué. En diminuant la distance de voies distinctes, ce point substitué serait alors devenu son propre nœud artériel représentatif et on aurait donc bien

une augmentation de la taille du graphe et de sa vraisemblance, mais aussi une diminution de la vitesse de calcul.

4.2.5.4 Influence des nœuds substitués sur le calcul des temps de parcours

Étant donné qu'un nœud artériel n'est plus un point physique, mais un nœud représentatif d'un ensemble de points substitués, le calcul des temps de parcours sur les liens routiers artériels et sur les liens routiers de transition s'en voit affecté. Jusque-là, d'une part, le calcul sur les liens routiers artériels se faisait avec une seule requête à un calculateur de chemin. Le temps de parcours correspondait au temps de trajet exact entre les deux extrémités du lien. D'autre part, pour ce qui est des temps de parcours sur les liens routiers de transition, le calcul se faisait lui en réalisant la moyenne des temps de parcours entre le nœud artériel exact et n_p points représentant le centroïde de la zone. Une nouvelle méthode de calcul des temps de parcours doit donc être énoncée pour tenir compte des nœuds artériels représentatifs et de leurs nœuds substitués.

De même qu'auparavant, pour les liens de transition, nous allons garder les N_p points représentant le centroïde de la zone. Néanmoins, le calcul ne va plus se faire vers le seul nœud artériel représentatif, mais vers une sélection *Ens* des nœuds substitués du nœud artériel représentatif. Dans un premier temps, on calcule donc le temps de parcours entre tous les nœuds substitués et l'autre extrémité du lien étudié (soient les N_p points représentatifs du centroïde pour un lien de transition, soit les nœuds substitués pour un lien artériel). Une fois qu'on a l'ensemble des temps de parcours vers chaque nœud substitué, il faut regarder, parmi les nœuds substitués, lesquels sont générés par l'intersection de la zone et d'une seule et même route. On se souvient qu'un nœud substitué correspond à l'intersection d'un lien du réseau artériel avec la frontière d'une zone et que de temps en temps deux nœuds peuvent représenter une même route, mais dans des directions différentes (par exemple : deux nœuds substitués proches pourraient être l'intersection d'une frontière de zone avec l'A15-S et l'A15-N). Aussi pour chaque nœud regarde-t-on la route et la direction dont il est l'intersection. Si deux nœuds substitués sont l'intersection d'une même route, mais dans des directions différentes, on ne considère alors plus le nœud substitué avec le plus grand temps de parcours moyen que l'on vient de calculer. De cette manière, on supprime les points qui ne correspondent pas au lien en question. Imaginons un lien artériel qui traverse une zone du nord vers le sud. Lors du calcul du temps de parcours moyen, il ne faut pas considérer le temps de parcours du nœud substitué de la frontière nord vers un nœud substitué de la frontière sud

qui correspondrait à la voie d'une autoroute qui irait dans la direction du sud vers le nord. Pour identifier ce point par rapport au point substitué de la frontière sud de la voie autoroutière qui va dans le bon sens du nord vers le sud, il faut supprimer celui qui a le temps de parcours le plus élevé. En effet, pour se retrouver à ce point, il faut dépasser la frontière de la zone pour prendre l'autoroute dans le mauvais sens. On a un exemple dans la Figure 4.5. Il est évident que le temps de parcours sur le lien est-ouest considéré dans cet exemple doit être calculé depuis le temps de parcours de 8 min calculé au-dessus plutôt que du temps de 14 min calculé en dessous. En effet, lorsqu'un utilisateur dans la réalité souhaitera traverser la zone d'est en ouest, c'est le parcours de 8 min (en dessus) qui sera emprunté, et non celui de 14 min (en dessous).

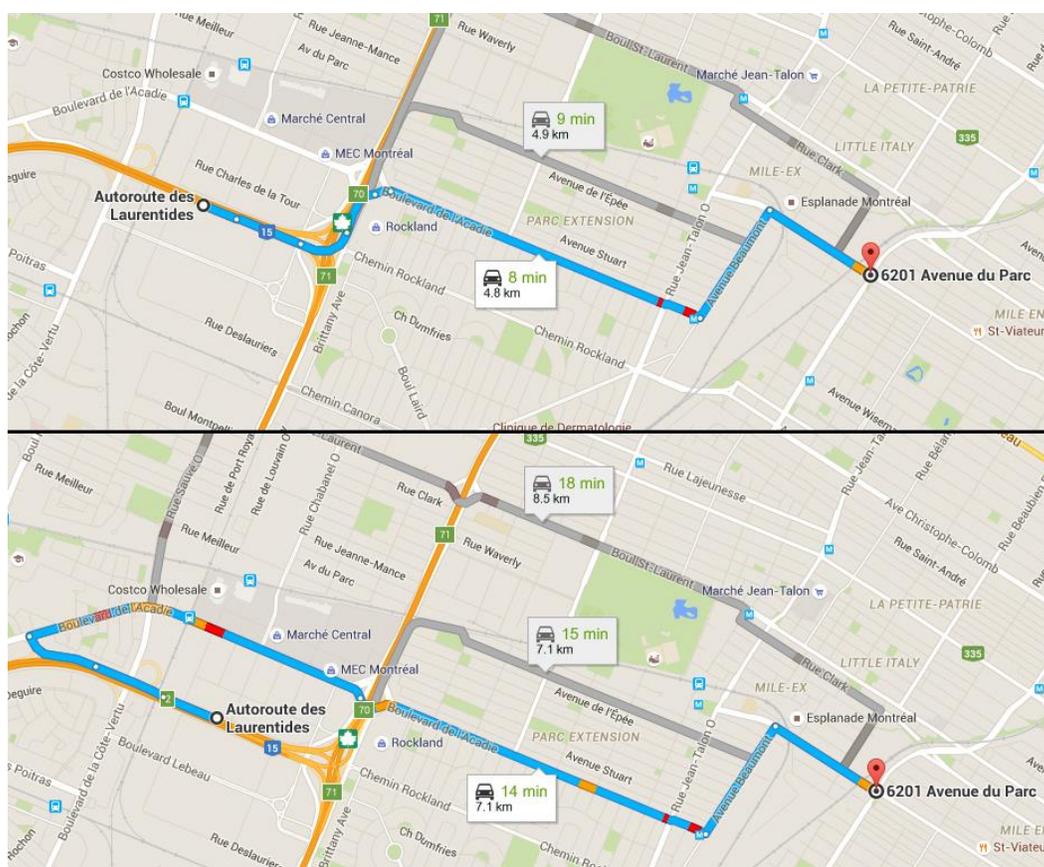


Figure 4.5: Sélection des nœuds substitués à considérer

Une fois la sélection des points réalisés, le calcul du temps de parcours final sur le lien consiste à faire la moyenne des temps de parcours entre les nœuds substitués sélectionnés.

4.2.5.5 Résolution du problème observé sur les longs trajets

Avec le réseau routier basique seulement, un problème concernant les longs trajets avait été détecté (voir Figure 4.2). Le temps de ces trajets longs était surestimé, car on ne simulait pas l'emprunt du réseau artériel.

Si nous jetons un coup d'œil au même cas d'étude sur lequel le problème avait été détecté, nous voyons sur la Figure 4.6, que le trajet contient les liens routiers artériels fraîchement créés. Pour se rendre de son origine à sa destination, le trajet comprend successivement un lien routier de transition, trois liens routiers artériels puis un dernier lien routier de transition. Au niveau du temps de parcours global, en additionnant les temps de parcours des liens traversés, le résultat trouvé est de quasiment 16 minutes. Le résultat donné par ce nouveau graphe routier est bien meilleur puisqu'avec le seul graphe routier basique, le déplacement était estimé à 26 minutes alors qu'en réalité il ne dure que 14 minutes.

Même si le graphe n'est pas destiné à calculer exactement le temps de parcours d'un déplacement, mais plutôt à déterminer les meilleures alternatives pour réaliser un déplacement, il est rassurant de voir que le temps de parcours estimé est du même ordre de grandeur que le temps de parcours d'un calculateur de chemin. Il s'agit là d'un cas isolé, mais lors de la validation du graphe plus loin dans ce mémoire, on verra ce que l'estimation du temps de parcours donne pour un grand ensemble de déplacement dans la partie Résultats.



Figure 4.6: Liens routiers artériels utilisés lors des longs trajets

4.2.6 Conclusion sur le graphe routier

4.2.6.1 Description du graphe routier final

Finalement, on obtient un graphe routier avec 3 types de liens : les liens de base, les liens artériels et les liens de transition qui relient le sous-graphe qui constituent les liens artériels et le sous-graphe qui constituent les liens de base. On peut voir le graphe routier complet d'une zone de Montréal sur la Figure 4.7.

Les liens de base relient les centroïdes entre eux. Un centroïde est le représentant de tous les points d'une zone. Le temps de parcours sur ces liens est la moyenne des temps de parcours entre n_p points de la première zone et n_p points de la seconde zone. Ces liens de base simulent le déplacement de zone en zone lors de trajets courts, sans utilisation des grandes artères routières.

Les liens artériels relient les nœuds artériels entre eux. Ces nœuds artériels sont définis comme étant les intersections entre les frontières des zones et le réseau routier artériel défini par la Communauté métropolitaine de Montréal. Deux nœuds artériels sont rassemblés en un seul point s'ils sont proches, c'est-à-dire à une distance inférieure à la distance de voies distinctes. On a alors un nœud artériel représentatif et ses nœuds substitués. Le temps de parcours sur un lien artériel est la moyenne des temps de parcours entre le premier nœud artériel représentatif et tous ses nœuds substitués et le second nœud artériel représentatif et une sélection de ses nœuds substitués. Ces liens artériels simulent le déplacement de zone en zone lors de l'utilisation des grandes artères routières.

Les liens de transition relient les nœuds artériels d'une zone au centroïde de cette même zone. Le temps de parcours sur un lien de transition est la moyenne des temps de parcours des trajets entre n_p nœuds de la zone et le nœud artériel représentatif ainsi que ses nœuds substitués. Ces liens de transition simulent les trajets effectués pour accéder aux grandes artères routières depuis n'importe quel point de la ville.

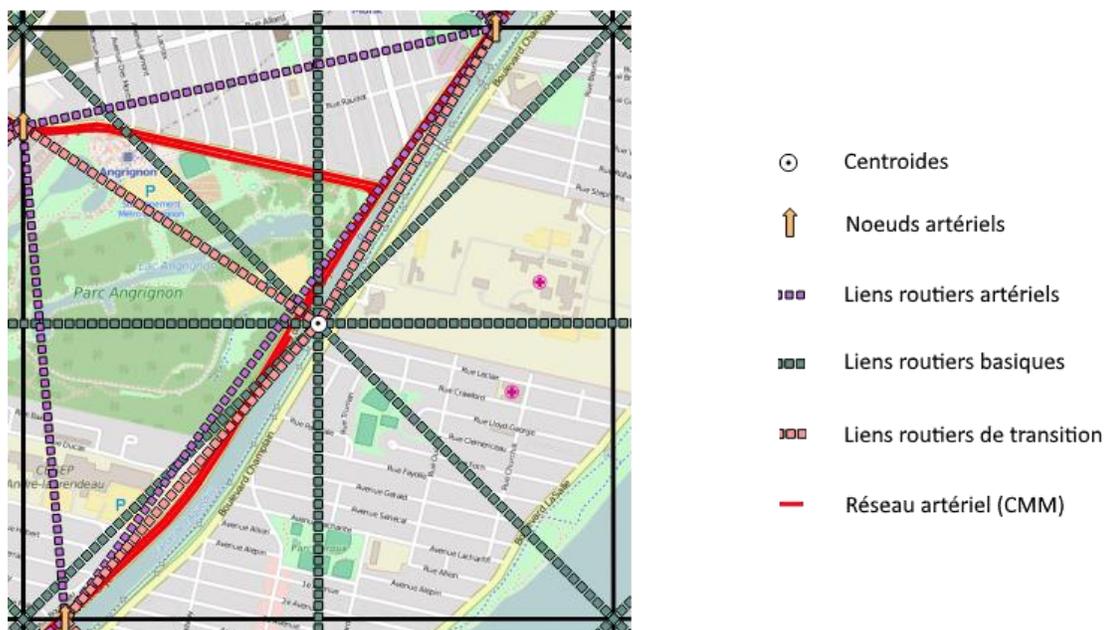


Figure 4.7: Graphe routier complet d'une zone de Montréal

Les réglages possibles pour, soit améliorer la précision du graphe, soit améliorer sa vitesse de calcul sont la modification du paramètre n_p , du paramètre de distance de voies distinctes et de la prise en compte (ou non) de la directionnalité des liens du graphe. L'influence de chaque paramètre est visible sur le Tableau 4.1: Influences des différents paramètres à fixer.

Tableau 4.1: Influences des différents paramètres à fixer

| Paramètres | Rapidité des calculs sur le graphe | Précision des calculs sur le graphe | Rapidité de construction du graphe |
|--|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| N_p augmente | pas d'influence | + | - |
| Distance de voies distinctes augmente | + | - | pas d'influence |
| Directionnalité des liens pris en compte | -- | + | -- |

4.2.6.2 Outils utilisés pour la création du graphe routier

Pour la création du graphe routier, un descriptif de tout le processus technique mis en place est donné ici. Ce processus est celui qui a été suivi lors de ce projet de recherche, mais la méthodologie énoncée dans ce même projet peut être utilisée avec d'autres outils techniques adaptés.

Ici, le réseau routier artériel de la Communauté métropolitaine de Montréal a été récupéré sous forme de shapefile (format de données GIS créé par ESRI (2016)). De même, le zonage de Montréal a été réalisé grâce à Quantum GIS. Une fois ces données de base récupérées et créées, elles ont été importées dans une grande base de données PostgreSQL. C'est en langage SQL que toutes les transformations nécessaires sur les bases de données ont été réalisées, notamment à l'aide de l'extension de PostgreSQL qui permet de manipuler des objets GIS : PostGIS. Pour permettre la visualisation des données tout au long du processus de transformation, Quantum GIS a été utilisé. Une fois tous les nœuds et liens du graphe créés, il a fallu calculer les temps de parcours sur les liens. Pour ce faire, un programme Java a été écrit afin de communiquer par requête http avec les outils de calcul de chemin et de temps de parcours que sont Google Maps et OpenTripPlanner. Les premières requêtes ont été réalisées via Google Maps. Une fois la limite journalière de requêtes atteinte, les autres requêtes ont été envoyées à OpenTripPlanner. Le programme Java récupérait ainsi les temps de parcours et mettait à jour les bases de données de PostgreSQL pour au final avoir la possibilité d'exporter le graphe avec les bons temps de parcours sur les liens sous forme de fichiers CSV par exemple.

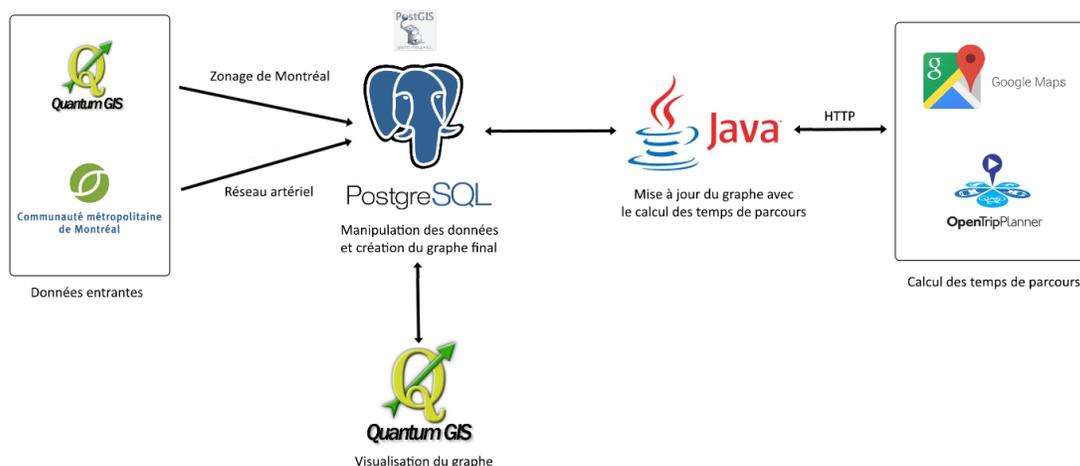


Figure 4.8: Processus technique de création du graphe routier

4.2.6.3 Présentation du rendu final du graphe routier

Le graphe routier est l'addition de deux tables de données que sont la table des nœuds routiers et la table des liens routiers. Voici la liste des paramètres caractérisant un nœud routier :

- Zone_id (entier) : id de la zone à laquelle appartient le nœud (voir table zones_ref)
- Lat (nombre décimal) : latitude du nœud
- Lon (nombre décimal) : longitude du nœud (idem)
- Geom (géométrie GIS) : géométrie du nœud, ce qui permet de visualiser le nœud avec QuantumGIS et de le manipuler avec PostGIS
- Artériel (booléen) : variable binaire pour savoir s'il s'agit d'un nœud artériel ou d'un centroïde
- Nœud_id (entier) : id du nœud

Voici la table des liens routiers sur le Tableau 4.2.

Tableau 4.2: Extrait de la table des liens routiers

| Nœud_o_id | Nœud_d_id | Temps_de_parcours | Geom | Type | Lien_id |
|-----------|-----------|-------------------|-----------|--------|---------|
| Entier | Entier | Entier | Geometrie | Textes | Entier |
| 92 | 1 | 205 | Geom | C2C | 1 |
| 91 | 1 | 616 | Geom | C2C | 2 |
| 2 | 1 | 329 | Geom | C2C | 3 |
| 93 | 2 | 459 | Geom | C2C | 4 |
| 92 | 2 | 438 | Geom | C2C | 5 |
| 91 | 2 | 614 | Geom | C2C | 6 |

La description des champs de la table est la suivante :

- Nœud_o_id : id du nœud à l'extrémité du lien
- Nœud_d_id : id du nœud à l'autre extrémité du lien
- Temps_de_parcours : temps de parcours sur le lien en secondes
- Geom : géométrie du lien, ce qui permet de le visualiser avec QuantumGIS et de le manipuler avec PostGIS
- Type : type de lien parmi les trois types suivants (c2c : lien basique de centroïde à centroïde, a2c : lien de transition entre un nœud artériel et un centroïde, a2a : lien artériel entre deux nœuds artériels)
- Lien_id : id du lien

4.3 Graphe TC

4.3.1 Introduction du graphe TC

Le graphe TC permet de simuler l'emprunt du réseau de transport en commun par les utilisateurs de l'outil de covoiturage. Contrairement au réseau routier où le nombre de liens serait extrêmement grand si on représentait toutes les possibilités de déplacement sur celui-ci, le réseau de transport en commun est lui beaucoup plus petit et est plus facilement représentable en entier par un graphe. De même, toutes les informations de la plupart des réseaux de transport en commun sont disponibles, formatées sous un format appelé GTFS. Ceci facilite grandement la généralisation de la création du graphe TC. Effectivement, quel que soit la ville ou le réseau de transport en commun que l'on veut modéliser par un graphe TC, il suffit d'en récupérer le fichier GTFS.

Quand on crée un graphe TC, les exigences de précision peuvent être très différentes. Dans la suite, nous allons établir une méthodologie pour créer un graphe TC le plus précis et vraisemblable possible, tout en sachant que plus le graphe sera précis et reflétant bien la réalité, plus il sera gros, avec un grand nombre de liens, et tous les calculs en seront ralentis. Le choix du graphe à construire se fait encore une fois autour du compromis vraisemblance/rapidité de calcul, ce n'est pas parce que le graphe est facilement représentable en entier qu'il faut le représenter en entier. Il faut construire le graphe correspondant au niveau de compromis vraisemblance/rapidité

souhaité. Le graphe TC minimal est celui qui ne permet pas de transfert vers une autre ligne du réseau et qui donc permet seulement de prendre une ligne et d'en ressortir, soit pour arriver à destination, soit pour prendre la voiture d'un covoitureur. L'évolution de ce graphe TC simple est l'inclusion d'une possibilité de transfert d'une ligne vers une autre à une station donnée. Ainsi, à l'arrivée à un arrêt partagé par plusieurs lignes de transport en commun, il y aurait possibilité de descendre pour attendre et emprunter une autre ligne. On va aussi énoncer notre méthodologie pour un graphe TC encore plus précis que ce dernier. Il s'agit d'un graphe TC qui permet d'intégrer de courtes sessions de marche à pied pour faire un transfert d'une ligne à l'autre. De cette manière, l'utilisateur prenant le transport en commun a la possibilité de s'arrêter à un arrêt, de marcher sur une distance, à définir comme une distance acceptable de marche, pour pouvoir accéder à une autre ligne de transport en commun lui permettant de réduire son temps total de trajet.

4.3.2 Création du graphe TC

4.3.2.1 Création des lignes de service

Pour créer les liens représentant les lignes de transport en commun, il suffit de se baser sur le fichier GTFS. En effet, tous les arrêts y sont renseignés ainsi que les lignes de transport en commun. Un nœud du graphe TC sera donc une paire arrêt-ligne. En effet, si les nœuds ne symbolisaient que les arrêts TC indépendamment des lignes, il serait possible, sur le graphe, de changer de ligne en arrivant à un arrêt sans aucun temps d'attente. Ainsi, en utilisant la sous-partie du GTFS illustrée dans la Figure 4.9, on peut recréer chaque ligne du réseau. Depuis la table « Stop_times », on peut rattacher la liste d'arrêts « Stops » parcourus lors d'un voyage « Trips » qui lui-même est rattaché à une ligne de transport « Routes », chacun de ces référencements étant réalisé dans chaque table via l'id de la table liée. On se retrouve finalement avec des lignes qui sont définies comme des suites d'arrêts. On peut alors créer des liens de base entre tous les arrêts successifs d'une même ligne et on obtient le graphe TC minimal qui ne permet aucun transfert entre lignes. Ces liens sont bien entendu unidirectionnels.

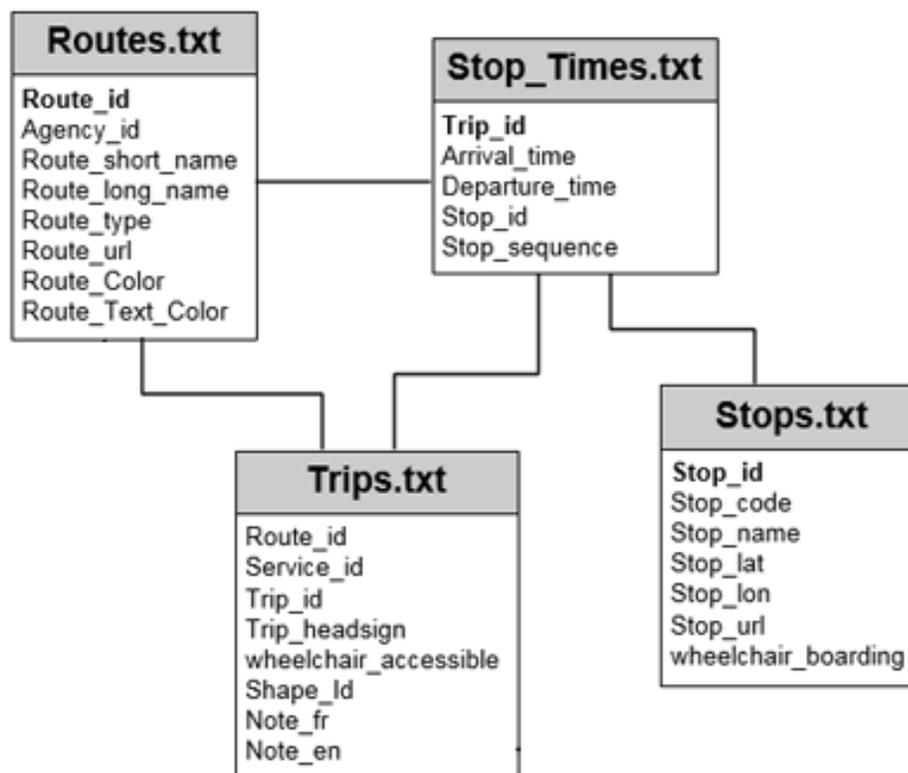


Figure 4.9: Données du GTFS utilisée pour créer les lignes de transport en commun
(<http://www.stm.info/en/about/developers/available-data-description>)

4.3.2.2 Temps de parcours sur les liens TC de base

Une fois les liens de base créés, c'est-à-dire les liens représentant les lignes de transport en commun, il faut estimer le temps de parcours sur ces liens. Une décision a été prise de ne pas inclure le temps d'attente à ces liens. Effectivement, ces liens ne comprendront que les temps de trajets entre arrêts. Les temps d'attente sont pris en compte dans le graphe de transition que l'on mentionne dans la suite. Ici, les liens ne sont donc pondérés que du temps passé en véhicule. Connaissant, grâce au GTFS, les temps de passage des véhicules à chaque arrêt (cf. « Stop_times »), il suffit de faire une moyenne de toutes les durées de trajet entre les deux arrêts composant le lien, sur la période de temps de la journée qui est considérée, pour obtenir le temps de parcours sur le lien. Un aperçu du graphe TC dans une zone, créée de cette manière-là, est montré sur la Figure 4.10.



Figure 4.10: Réseau TC de base d'une zone de Montréal

4.3.2.3 Introduction d'une possibilité de transfert simple (correspondance)

Pour introduire la possibilité de réaliser des transferts simples (changement de ligne de service à un arrêt donné), nous allons créer de nouveaux liens sur le réseau. Rappelons que chaque nœud du graphe représente une paire arrêt-ligne de services. Le transfert simple se veut la possibilité, à un arrêt, de prendre une autre ligne de transport passant par ce même arrêt. Aussi nous allons créer des liens reliant tous les nœuds appartenant à un même arrêt, mais avec des lignes différentes. Il y aura deux liens par paire de nœuds puisqu'il n'y a aucune similarité dans le transfert entre deux lignes de transport en commun. En considérant deux lignes, une aux passages très fréquents et une aux passages rares, le temps de transfert entre les deux lignes dépend de la direction du transfert. Ainsi, le transfert de la ligne rare vers la ligne fréquente va être court puisque la ligne de destination passe souvent, alors que le transfert depuis la ligne fréquente vers la ligne rare va prendre en moyenne plus de temps puisque la ligne de destination passe plus rarement.

Ce changement n'est pas observable sur une carte puisque tous les liens relient des nœuds ayant le même emplacement. Néanmoins, ce changement est fortement visible au niveau des tables de données puisque l'on crée un grand nombre de nouveaux liens et on augmente de façon assez

importante la taille du graphe. En effet, l'ajout d'une nième ligne passant par un arrêt de transport en commun crée $2*(n-1)$ liens supplémentaires à cet arrêt.

4.3.2.4 Temps de parcours sur les liens de transfert simples

Alors que pour le temps de parcours sur les liens de base du réseau TC, on ne prenait en compte que le temps en véhicule, les temps de parcours sur ces liens de transfert simples sont uniquement des temps d'attente. Les temps de parcours sur ces liens vont donc être la moyenne du temps d'attente lors d'un transfert de ligne de transport en commun.

Pour ce faire, on peut encore se rapporter à la Figure 4.9. En joignant la table « Stop_times » avec la table « Trips », on peut créer une table « Stop_times » améliorée avec l'inclusion de l'information de la ligne de service associée à chaque horaire de passage. Il reste alors à repérer pour chaque nœud de notre graphe la liste des horaires de passages et de regarder le temps d'attente qu'il faut endurer pour que le prochain véhicule, de chacune des autres lignes passant par cet arrêt, arrive. On obtient ainsi une liste de temps d'attente pour chaque paire de nœuds du graphe et on peut en faire la moyenne, sur l'intervalle de temps du graphe.

Finalement, nous obtenons bien le graphe désiré avec la possibilité de transfert à un arrêt qui est simulé. L'erreur sur les temps d'attente des liens de transfert simples dépendra de l'intervalle de temps du graphe. En faisant la moyenne d'attente sur cette période, l'erreur provient alors de la disparité des temps d'attente.

4.3.2.5 Introduction d'une possibilité de transfert par la marche

Pour avoir un graphe encore plus précis et offrant une grande amplitude de solutions, la notion de transfert par la marche va être introduite. Cette notion découle du fait qu'un utilisateur puisse faire une courte distance à pied en sortant d'un segment d'une ligne de transport en commun pour en prendre un autre, d'une autre ligne de transport en commun, et dont l'arrêt d'origine est différent de l'arrêt de destination de ce premier segment. Il faut donc fixer une distance maximale acceptable de marche d_m , qui ne sera pas dépassée lorsqu'il sera proposé à l'utilisateur de marcher pour se rendre à un autre arrêt de transport en commun.

Au niveau de la création du graphe, les nœuds restent inchangés et ce sont simplement des liens qui vont être ajoutés. Effectivement, les nœuds représentent toujours une paire arrêt-ligne de services, mais on va ici lier tous les nœuds, dont les arrêts sont différents et éloignés d'une distance

inférieure à d_m . Chaque lien représentera donc le transfert d'un arrêt d'une ligne TC vers un autre arrêt d'une autre ligne TC. Cette évolution du graphe aura aussi pour influence d'agrandir le nombre de liens du graphe, et dans une encore plus grande mesure que l'ajout des transferts simples. L'ajout d'un nième arrêt-ligne aura toujours pour effet de créer $n-1$ liens, mais les n en question seront plus élevés puisqu'on considère non pas un seul arrêt, mais tous les arrêts dans une distance inférieure à d_m . Sur la Figure 4.11, on peut voir qu'au niveau des grosses stations de transport en commun, les transferts peuvent représenter un grand nombre de liens.

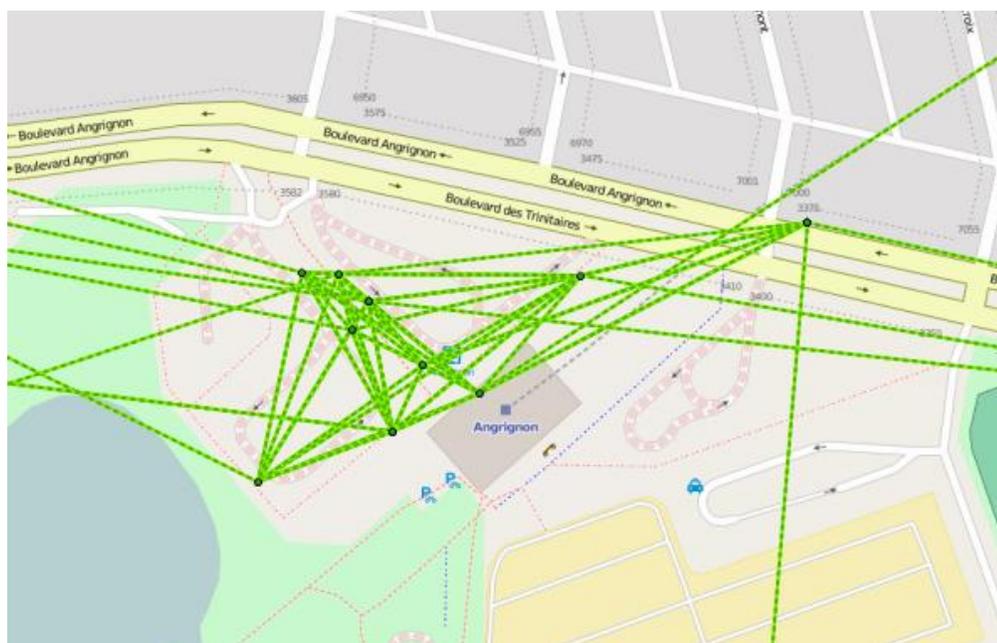


Figure 4.11: Liens de transfert par la marche

4.3.2.6 Temps de parcours sur les liens de transfert par la marche

Cette fois-ci, pour calculer les temps de parcours sur les liens de transfert par la marche, d'autres paramètres que le GTFS interviennent. Ou tout du moins, il faut aussi prendre en compte le temps de marche nécessaire pour se rendre d'un arrêt à l'autre. Les temps de parcours sur ces liens de transfert sont donc une addition de temps d'attente et de temps d'accès. Rappelons-nous que jusqu'ici, les temps de parcours sur les liens ne sont pas précis à la minute près, le graphe étant destiné à réaliser un tri grossier et non à calculer un temps de parcours exact. Néanmoins, dans ce cas-ci, le temps d'accès, qui peut paraître anecdotique sur une courte distance comme d_m , doit être pris en compte, non pas pour ajouter de la précision au temps de parcours global, mais pour savoir si le transfert est réellement possible. Si l'on considère un transfert comportant une voie de

circulation ou un carrefour à traverser, et que l'on cumule l'incertitude de ce temps de parcours à pied à l'incertitude sur la ponctualité des temps de passage aux arrêts, la situation peut résulter en un transfert raté.

Dans un premier temps, pour le calcul de ces temps de parcours, nous allons donc générer les distances entre tous les nœuds à considérer, c'est-à-dire tout nœud appartenant à des arrêts différents distants de moins de d_m . Une fois cette distance calculée, on peut en déduire un temps d'accès que l'on va majorer afin d'éviter les transferts ratés, en donnant une marge à l'utilisateur pour se rendre d'un arrêt à l'autre. Une fois ce temps d'accès calculé, on peut utiliser le GTFS comme cela a été fait précédemment. De la même façon, en considérant un nœud du graphe, on va regarder tous les heures de passage et pour chaque voyage, relever, pour tous les nœuds auxquels il est lié, l'horaire d'arrivée du prochain véhicule en tenant compte du temps d'accès. On aura alors relevé un temps d'attente particulier. Le temps de parcours sur les liens sera alors la moyenne de l'addition du temps d'accès et du temps d'attente sur l'intervalle de temps du graphe. Comme avec les temps de parcours sur les liens de transferts simples, ces temps de parcours sont des moyennes et la précision dépend des différents intervalles de temps du graphe.

4.3.3 Conclusion sur le graphe TC

4.3.3.1 Description du graphe TC final

Finalement, le graphe TC proposé possède trois niveaux de précisions hiérarchisés. Une méthode a été décrite pour construire ces trois graphes possibles. Ainsi, le choix du graphe à construire dépend de la précision des résultats attendus ainsi que de la vitesse de calcul. Comme précédemment, le choix de la précision du graphe construit réside dans un compromis entre la vraisemblance des propositions, et donc l'accroissement de la taille du graphe, et la vitesse de calcul et de formulation de ces mêmes propositions, et donc la diminution de la taille du graphe.

Le graphe le plus petit et le plus rapide contient un ensemble de nœuds symbolisant toutes les paires arrêt/ligne du réseau de transport en commun. Reliant ces nœuds, il y a des liens qui symbolisent le trajet d'un véhicule de transport en commun entre deux arrêts successifs. Le temps de parcours sur ces nœuds correspond au temps de trajet du véhicule. Ce graphe simule donc un réseau de transport en commun en considérant que l'utilisateur ne peut pas changer de ligne sur le réseau.

Le graphe intermédiaire est lui composé des mêmes nœuds avec des liens supplémentaires. Ces liens relient les nœuds situés au même arrêt de transport en commun et simulent la possibilité de changer de ligne de transport en commun à n'importe quel arrêt en descendant du véhicule actuel et en attendant le véhicule d'une autre ligne. Le temps de parcours sur ces liens correspond donc au temps d'attente à l'arrêt avant que le véhicule de l'autre ligne de service arrive.

Enfin, le graphe le plus complet est lui aussi composé des mêmes nœuds, mais on ajoute au graphe intermédiaire des liens entre tous les nœuds dont les arrêts sont différents, mais situés à une distance de moins de d_m . Le graphe est alors capable de simuler le transfert entre deux lignes de transport en commun qui nécessite un court déplacement à pied de l'utilisateur. Les temps de parcours sur ces liens correspondent alors à l'addition du temps d'accès entre les deux arrêts et du temps d'attente à l'arrêt du nœud de destination.

Finalement, pour adapter le graphe TC à ses besoins, on a la possibilité de faire un choix entre les alternatives de graphes suivantes : le graphe TC de base, le graphe TC avec transferts simples ou le graphe TC avec transferts par la marche. En choisissant le graphe TC avec transferts par la marche, on peut encore adapter le graphe à ses besoins en paramétrant la distance de marche acceptable d_m à sa guise.

4.3.3.2 Outils utilisés pour la création du graphe TC

Un court descriptif d'un exemple de dispositif technique à mettre en place pour réaliser un graphe TC comme décrit dans la méthode est disponible à la Figure 4.12. Finalement, pour créer ce graphe, les fichiers GTFS des réseaux de transport en commun que l'on veut y intégrer sont les seules données nécessaires. En les important dans un système de base de données SQL, en l'occurrence PostgreSQL, on peut les manipuler facilement pour appliquer la méthode décrite ci-dessous. L'extension PostGIS a été utilisée. Contrairement au graphe routier, même les temps de parcours sur les liens peuvent être déduits des données de base, il n'y a pas besoin de faire appel à des outils extérieurs comme des calculateurs de chemin. Un outil comme QuantumGIS permet, lors de la création du graphe TC et notamment lors de la création du réseau de base, de visualiser le résultat de la manipulation des fichiers GTFS et de détecter les possibles erreurs.

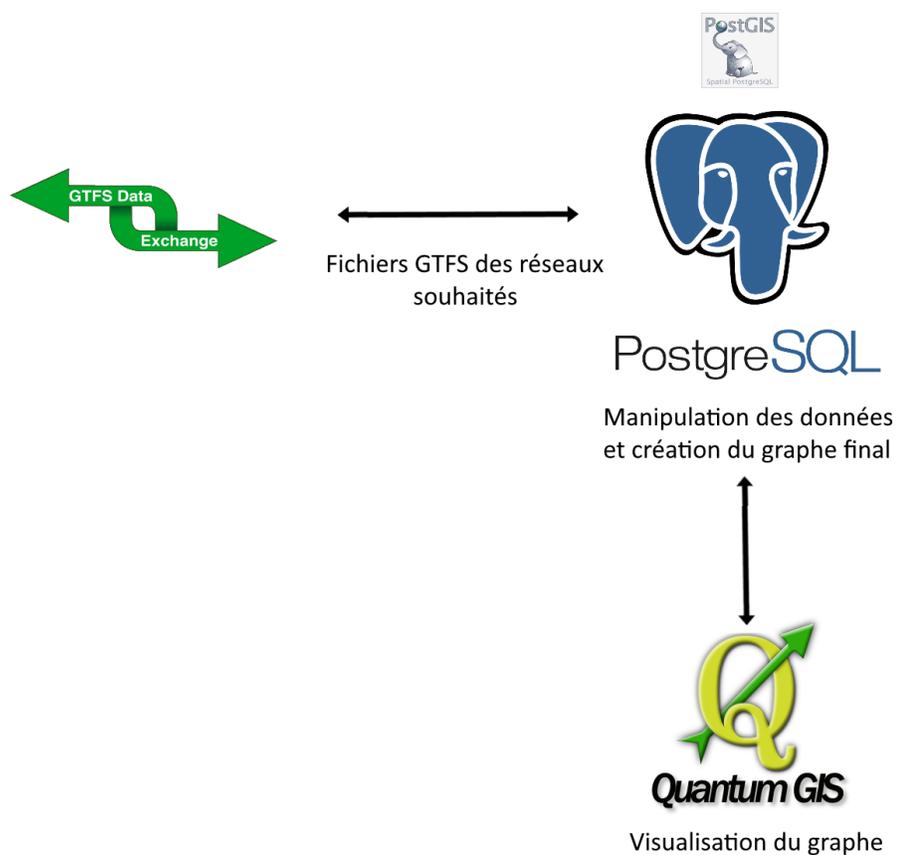


Figure 4.12: Processus technique de création du graphe TC

4.3.3.3 Présentation du rendu final du graphe TC

Le graphe TC est constitué de deux tables de données que sont la table des nœuds TC et la table des liens TC. Voici la liste des paramètres caractérisant un nœud TC :

- Geom (géométrie GIS) : géométrie du nœud, ce qui permet de visualiser le lien avec QuantumGIS et de le manipuler avec PostGIS
- Lat (Nombre décimal) : latitude du nœud
- Lon (Nombre décimal) : longitude du nœud
- Stop_sequence (Entier) : numéro du nœud dans l'ordre de passage des véhicules sur la ligne de service (donnée issue du GTFS). Ce numéro est utile pour la création des liens TC.
- Route_id (Entier) : id de la ligne de service de transport en commun passant par le nœud

- Stop_id (Entier) : id de l'arrêt de transport en commun du nœud
- Nœud_id (Entier) : id du nœud

Voici la table des liens TC sur le Tableau 4.3.

Tableau 4.3: Extrait de la table des liens TC

| Nœud_o_id | Nœud_d_id | Type | Temps_de_parcours |
|-----------|-----------|--------|-------------------|
| Entier | Entier | Textes | Entier |
| 80000 | 80001 | Veh | 32 |
| 80001 | 80002 | Veh | 34 |
| 80002 | 80003 | Veh | 44 |
| 80003 | 80004 | Veh | 45 |
| 80004 | 80005 | Veh | 53 |
| 80005 | 80006 | Veh | 63 |

La description des champs de la table est la suivante :

- Nœud_o_id : id du nœud origine du lien
- Nœud_d_id : id du nœud destination du lien
- Type : type du lien parmi les choix suivants (veh : lien symbolisant le trajet en véhicule entre deux arrêts, tr : lien de transfert à un arrêt entre deux nœuds routiers, ma : lien de transfert par la marche entre deux arrêts)
- Temps_de_parcours : temps de parcours sur le lien

4.4 Graphe de transition

4.4.1 Introduction du graphe de transition

Maintenant que nous avons ce graphe routier et ce graphe TC, il nous faut un moyen de les assembler et de les faire communiquer. Tout l'intérêt du graphe construit lors de ce projet réside dans sa multimodalité et donc dans sa liaison entre les deux graphes : routier et TC. C'est là qu'intervient le graphe de transition.

Le graphe de transition est l'intermédiaire entre le graphe TC et le graphe routier. Même s'il est nommé « graphe », il n'est en fait qu'un ensemble de liens entre des nœuds qui existent déjà, il n'a aucun nœud propre. On comprend aussi qu'il a un rapport avec les points de jonction dont la méthodologie de création est décrite dans une partie précédente. Le graphe de transition se doit donc de simuler l'opération pour un utilisateur de quitter un covoiturage pour emprunter le réseau TC ou inversement, de quitter le réseau TC pour faire un segment de covoiturage.

Les nœuds du graphe de transition sont donc des nœuds du graphe préexistant dont un point de jonction est situé à proximité. Pour rappel, les points de jonction sont des points géographiques qui permettent aux covoitureurs de stationner pour commencer ou finir un segment de covoiturage. A chaque point de jonction est associée une liste d'arrêts TC accessibles à la marche. Pour simuler ces actions de covoiturage sur le graphe, il faut donc créer des liens entre les nœuds routiers et les nœuds TC du graphe préexistant. On va donc lier chacun des nœuds TC, dont l'arrêt est situé proche d'un point de jonction et qui appartiennent donc au graphe de transition, à un nœud routier. Et ce nœud routier est bien évidemment le centroïde de base de la zone en question puisqu'il représente l'ensemble des points routiers de la zone.

Nous avons donc une liaison entre le centroïde de base de chaque zone et tous les arrêts de transport en commun de la zone que l'on sait accessibles à pied depuis un point de jonction. De cette manière, lorsqu'un utilisateur commencera son trajet par un segment de covoiturage, le réseau de transport en commun sera accessible depuis les centroïdes de chaque zone via les liens de transition. Si on imagine un déplacement débutant par du covoiturage et continuant par du transport en commun, ce trajet se composera, sur le graphe, d'abord d'une suite de liens routiers qui se terminera par un centroïde de base. Le dernier lien routier, qui arrive à ce centroïde de base représente le trajet réel pour se rendre au lieu de jonction réel où le covoitureur est déposé. Enfin,

le lien de transition reliant ce centroïde de base et le nœud TC représente l'action de descendre de la voiture, et si le déplacement doit continuer, de se rendre jusqu'à l'arrêt de transport en commun à pied et d'attendre que le prochain véhicule arrive. Bien évidemment, les liens de transition se doivent aussi de représenter l'action de quitter le réseau de transport en commun pour embarquer vers un covoiturage : ils doivent faire la jonction entre le graphe TC et le graphe routier dans les deux sens. Néanmoins, l'action de quitter le réseau de transport en commun pour embarquer vers un covoiturage et l'action de quitter un covoiturage pour embarquer sur le réseau de transport en commun n'ont pas du tout la même durée et on doit donc créer deux liens unidirectionnels, orientés, pour chaque arrêt TC considéré.



Figure 4.13: Graphe de transition d'une zone de Montréal

4.4.1.1 Temps de parcours sur les liens de transition

Premièrement, considérons les temps de parcours sur les liens de transition allant du réseau routier vers le réseau TC. Ces liens de transition simulent le fait de débarquer du covoiturage depuis un point de jonction, de se rendre à pied à l'arrêt de transport en commun et d'attendre le prochain passage. Pour ce qui est du temps de débarquement du covoiturage, c'est une durée minimale qui ne devrait pas prendre plus d'une minute. De même, en ce qui concerne le temps d'accès du point de jonction vers l'arrêt de transport en commun, il est assez court puisque c'est un temps de marche sur quelques centaines de mètres tout au plus (se référer à la méthodologie de création des points

de jonction). En plus d'être faibles, ces deux durées, de débarquement et d'accès, vont être similaires et négligeables, relativement au temps de parcours global. Sachant que le graphe que nous construisons est utile pour trier un ensemble de trajets et voir les possibilités d'enchaînements des différents modes de transport pour se rendre d'une origine à une destination, et non pour calculer un temps de parcours exact étant donné qu'un calculateur de chemin fera le travail avant que la solution soit proposée à l'utilisateur, ce n'est pas sur ces durées que les différences doivent se faire. On décide donc de fixer la durée de débarquement et d'accès à l'arrêt TC t_{d+a} , de l'ordre de quelques minutes. De plus, en fixant cette valeur, il faut bien penser qu'elle correspond à une contrainte à l'utilisation du transport en commun. Effectivement, l'augmentation de cette valeur aura comme impact de rendre les trajets uniquement routiers beaucoup plus profitables. C'est en sachant cela que la calibration de t_{d+a} doit être entreprise.

En plus de cette durée t_{d+a} , le temps de parcours sur le lien de transition est composé du temps d'attente à l'arrêt de transport en commun. À l'inverse de t_{d+a} , ce temps d'attente est lui tout à fait significatif puisqu'il permet de savoir quelle ligne de transport en commun doit être empruntée pour écourter le temps de voyage total. Pour calculer ce temps d'attente, le GTFS est encore une fois utilisé. Pour chaque nœud connecté à un lien de transition, et représentant une paire arrêt-ligne de service, tous les temps d'attente moyens vont être relevés à l'aide du GTFS. Une fois ces temps d'attente relevés, on peut en faire la moyenne sur l'intervalle de temps du graphe. On ajoute ensuite cette valeur à t_{d+a} et on obtient le temps de parcours sur un lien de transition.

Pour ce qui est des liens de transition allant d'un nœud TC vers un nœud routier, le calcul du temps de parcours est encore plus facile puisqu'il n'y a aucun temps d'attente. Effectivement, on ne considère que le temps t_{d+a} précédemment cité qui correspond dans ce cas au débarquement du véhicule de transport en commun et à la durée de marche depuis cet arrêt TC jusqu'au point réel de jonction où pourra attendre un covoitureur.

4.4.2 Conclusion sur le graphe de transition

4.4.2.1 Description du graphe de transition final

Le graphe de transition est un ensemble de liens entre des nœuds préexistants, du sous-graphe routier et du sous-graphe de transport en commun. Ces liens représentent le passage d'une portion en mode automobile vers (ou depuis) une portion en mode transport en commun. La liaison

entre le graphe routier et le graphe TC se fait entre les nœuds suivants : pour le graphe routier, on considère le centroïde de chaque zone qui représente le point d'entrée ou de sortie du réseau routier et pour le graphe de transport en commun, on considère les nœuds TC de chaque zone dont l'arrêt est assimilé à un point de jonction défini auparavant. On crée donc deux liens unidirectionnels entre tous les nœuds TC considérés de la zone et le centroïde de cette même zone.

Chaque lien unidirectionnel a un temps de parcours propre. Si le lien est orienté d'un nœud TC vers un nœud routier, le temps de parcours sur ce lien correspond à un temps fixe pour tous les liens, t_{d+a} , qui correspond au temps de débarquement du transport précédent et du temps de marche pour se rendre du point de débarquement du réseau TC jusqu'au point de jonction du réseau routier. Si le lien est orienté d'un nœud routier vers un nœud TC, le temps de parcours est aussi composé du temps t_{d+a} , qui correspond à la descente du véhicule et à la marche jusqu'à l'arrêt de transport en commun. Mais cette fois, additionné à ce temps t_{d+a} , il y a le temps d'attente à l'arrêt de transport en commun.

Finalement, les temps de parcours sur les liens du graphe de transition ne sont pas très importants, ou tout du moins, ne nécessitent pas une grande précision. Effectivement, ils sont équivalents puisqu'ils correspondent au temps d'accès à la voiture du covoitureur, quel que soit le lien de transition emprunté, et ne permettront donc pas de départager deux alternatives de déplacement.

4.4.2.2 Outils utilisés pour la création du graphe de transition

Le dispositif technique pour créer le graphe de transition n'est pas ici détaillé puisqu'il correspond exactement au dispositif du graphe TC. Les outils de travail sont PostgreSQL et QuantumGIS et les ressources utilisées sont des fichiers GTFS ainsi que les informations des graphes routiers et TC créés précédemment.

4.4.2.3 Présentation du rendu final du graphe de transition

Le graphe de transition est, contrairement aux deux autres graphes, contenu dans une seule table de données. En effet, les nœuds étant déjà préexistants, les données du graphe de transition ne sont qu'un ensemble de nouveaux liens entre ces nœuds.

Tableau 4.4: Extrait de la table des nœuds TC

| noeud_tc_id integer | noeud_r_id integer | temps_de_parcours integer | geom geometry | sens_rtc boolean |
|------------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|
| 50164 | 3465 | 102 | 0102000020E61000000200000052 | t |
| 50168 | 3465 | 442 | 0102000020E610000002000000F7 | t |
| 50198 | 3466 | 204 | 0102000020E61000000200000069 | t |
| 50215 | 3466 | 614 | 0102000020E61000000200000006 | t |
| 50145 | 3555 | 105 | 0102000020E610000002000000D2 | t |
| 50163 | 3555 | 525 | 0102000020E610000002000000AF | t |

La description des champs de la table est la suivante :

- Nœud_tc_id : id du nœud TC du lien
- Nœud_r_id : id du nœud routier du lien
- Temps_de_parcours : temps de parcours sur le lien (en s)
- Geom : géométrie du nœud, ce qui permet de visualiser le lien avec QuantumGIS et de le manipuler avec PostGIS
- Sens_rtc : booléen pour savoir si le sens du lien est du nœud routier au nœud TC

4.5 Points de départ et d'arrivée sur le graphe

4.5.1 Points de départ sur le graphe

Le graphe multimodal actuel, composé du graphe routier, du graphe TC et du graphe de transition, permet de simuler toutes les sortes de trajets possibles sur les réseaux de transport d'une ville (ceci est bien entendu fonction des fichiers GTFS des réseaux de transport en commun qui ont été utilisés). Ainsi, les segments de trajets en covoiturage et en transport en commun sont représentés. De même, les transitions entre le covoiturage et le transport en commun peuvent être simulées sur le graphe. Cependant, il manque à établir comment un utilisateur accède au réseau.

Mettons-nous en situation et imaginons qu'un utilisateur fasse sa demande de voyage en précisant son origine et sa destination. Il faut tout d'abord que, depuis son origine, il puisse entamer son trajet par un segment routier, en covoiturage, ou par un segment de transport en commun. Pour ce qui est de la possibilité de commencer le trajet par un segment routier, il suffit de placer l'utilisateur sur le centroïde de base de la zone à laquelle l'origine du trajet appartient. En effet, ce

centroïde étant le représentant de tous les points de la zone, c'est depuis celui-ci que l'utilisateur doit être introduit sur notre graphe. Ensuite, pour ce qui est de commencer le trajet par un segment de transport en commun, il faudrait donner la possibilité à l'utilisateur d'accéder aux arrêts de transport en commun accessibles par la marche depuis son point de départ. Admettons qu'on réutilise d_m la distance maximale de marche acceptable, on relève alors les nœuds du graphe TC accessibles dans ce rayon depuis l'origine du trajet et on les choisit comme potentiels lieux d'injection de l'utilisateur sur le graphe.

Dans la pratique, à chaque demande de trajet, un nœud de départ va être créé et ajouté dans le graphe, et c'est depuis ce nœud que le calcul de chemin sera réalisé. Ce nœud de départ doit être lié aux nœuds d'injection dans le réseau dont on vient de parler. Un lien est donc créé depuis le nœud de départ vers le centroïde de base de la zone à laquelle il appartient. Ce lien a un temps de parcours nul puisque le centroïde de base représente tous les points de la zone. Ensuite, il y a un lien qui est créé entre le nœud de départ et chaque nœud TC dont l'arrêt est accessible depuis l'origine du trajet sous une distance d_m . Le temps de parcours sur ces liens est calculé de la même manière que les temps de parcours sur les liens de transition allant du graphe routier au graphe TC. En effet, on calcule le temps moyen d'attente pour chaque nœud TC et on y ajoute la valeur t_{d+a} .

Évidemment, l'ensemble de ces liens, qui sont potentiellement ajoutés au graphe suite à la demande de trajet d'un utilisateur, doivent être calculés. Ce calcul est réalisé à la création du lien, juste à la suite de la demande d'un utilisateur. Il faut créer une grande table avec tous ces liens, ayant tous pour origine le nœud de départ, et pour destination chaque nœud TC et chaque centroïde de base du graphe multimodal, avec le temps de parcours associé. Lors de la demande d'un utilisateur, il suffira d'ajouter, depuis cette table, les liens nécessaires.

4.5.2 Points d'arrivée sur le graphe

En ce qui concerne la destination du trajet, la méthode est similaire. Lorsque la demande de trajet est formulée, un nœud d'arrivée et des liens vers ce nœud d'arrivée sont créés. De même, le nœud d'arrivée est lié au centroïde routier de base associé à sa zone ainsi qu'aux nœuds TC dont l'arrêt est accessible dans une distance d_m depuis la destination du trajet. La différence majeure est le temps de parcours sur les liens qui n'est pas le même. Le temps de parcours sur le lien du centroïde routier est encore nul, mais le temps de parcours sur les liens des nœuds TC est lui égal au temps d_{d+a} sans la prise en compte du temps d'attente. Effectivement, ce lien, s'il est parcouru,

est le dernier lien du trajet et correspond donc à la descente du véhicule de transport en commun et à la marche de l'utilisateur vers sa destination. À part cela, toute la méthode est identique au nœud de départ, où tous les liens et temps de parcours doivent être déjà stockés et rapidement ajoutés au graphe en début de processus. On peut voir cette modification du graphe multimodal dans la Figure 4.14.

Extrait des données brutes du graphe multimodal

| nœud_o_id | nœud_d_id | temps_parcours |
|-----------|-----------|----------------|
| 0 | undefined | undefined |
| undefined | 999999 | undefined |
| 143 | 12333 | 975 |
| 143 | 12334 | 745 |
| 144 | 12333 | 689 |
| 145 | 97 | 134 |
| ... | ... | ... |

Le nœud dont l'id est de 0 est le nœud de départ. De base, il ne fait partie d'aucun lien.
Le nœud dont l'id est de 999999 est le nœud d'arrivée. De base, il ne fait partie d'aucun lien.



Demande de trajet avec origine O et destination D

Origine O:

- id du centroïde de la zone: 100
- id du seul nœud TC accessible: 80001

Destination D:

- id du centroïde de la zone: 900
- id du seul nœud TC accessible: 80009

Extrait des données brutes du graphe multimodal propre à une demande

| nœud_o_id | nœud_d_id | temps_parcours |
|-----------|-----------|----------------|
| 0 | 100 | 0 |
| 0 | 80001 | 284 |
| 900 | 999999 | 0 |
| 80009 | 999999 | 180 |
| 143 | 12333 | 975 |
| 143 | 12334 | 745 |
| 144 | 12333 | 689 |
| 145 | 97 | 134 |
| ... | ... | ... |

Le graphe est donc mis à jour en fonction de la demande. Les liens depuis les nœuds de départ et d'arrivée sont créés avec les temps de parcours adéquats.

Figure 4.14: Exemple de modification du graphe suite à la demande d'un utilisateur

CHAPITRE 5 RÉSULTATS

5.1 Données utilisées

Pour tester notre méthodologie, et notamment le graphe multimodal créé, nous allons générer des demandes de déplacement. Or, pour garantir une certaine vraisemblance dans les demandes de déplacement générées, ce sont des déplacements réellement réalisés par les habitants de Montréal qui sont testés. Ces déplacements proviennent de l'enquête Origine-Destination menée en 2008 par un consortium d'autorités de transport de la grande région de Montréal. De plus, dans cette enquête, nous devons sélectionner un ensemble de déplacements représentatifs, car, en raison du temps de calcul, nous ne pouvons pas nous permettre de réaliser tous nos tests sur l'ensemble des trajets de l'enquête origine-destination (OD). Netlift se voulant un outil de covoiturage pour les trajets réguliers, notamment les trajets pour aller travailler, les déplacements sélectionnés pour les tests sont les déplacements de l'enquête OD réalisés le matin, en auto-conducteur et dont le motif est de se rendre au travail. Ceci comprend 25 295 trajets. Nos tests se basent donc sur un échantillon de trajets dont les utilisateurs sont la cible principale de Netlift.

5.2 Validation du zonage de Montréal

Le zonage de Montréal est un aspect important de la méthodologie. Effectivement, il conditionne grandement la vraisemblance des résultats, mais aussi le temps de calcul. Plus le zonage est précis :

- moins les points géographiques réels sont loin de leur centroïde,
- plus il y a de nœuds artériels, de nœuds centroïdes et de liens routiers,
- plus le temps de calcul est long.

Néanmoins, dans notre cas, ne voulant pas avoir un système parfaitement opérationnel, mais plutôt tester la méthodologie, et ayant une capacité de calcul limitée, les tailles des zones créées sont de 2 km par 2 km. Ceci correspond tout de même à 8464 zones puisqu'on a choisi de couvrir un territoire carré de quasiment 180 km de côté autour de Montréal (voir Annexe B).

5.3 Graphe minimal utilisé

Pour ces tests, c'est un graphe allégé qui a été construit, un graphe dont la construction suit la méthodologie énoncée pour sa géométrie, mais dont le calcul des temps de parcours sur les liens est simplifié par rapport à ses directives. Pour rappel, le but premier de ces tests, et de ce mémoire, est de valider la capacité de la méthodologie générale à générer des trajets multimodaux comprenant du covoiturage. Comme mentionné dans la Figure 3.1, les quelques meilleurs jumelages trouvés par le graphe sont envoyés à un calculateur de chemin classique avant d'être proposés à l'utilisateur. La priorité n'est donc pas tant de valider l'exactitude des temps de parcours calculés par le graphe, que d'être capable de générer des trajets multimodaux et de les hiérarchiser de façon à ce que le meilleur trajet se trouvent dans l'échantillon des meilleurs trajets à envoyer au calculateur de chemin.

Le graphe simplifié utilisé lors des tests a été construit en suivant à la lettre la méthodologie énoncée au niveau de la géométrie, c'est-à-dire que les nœuds et liens construits sont exactement ceux qui seraient construits dans un graphe complet. Par contre, dans un but de simplification et de validation première du système, la méthodologie de calcul des temps de parcours sur les liens a été allégée. Effectivement, le phénomène des nœuds substitués pour le calcul du temps de parcours sur les liens routiers artériels n'a pas été pris en compte. De même, le calcul des temps de parcours sur les liens de transport en commun et d'attente aux arrêts de transport en commun sont basés sur un seul calcul de calculateur de chemin, au lieu de l'utilisation des fichiers GTFS. Néanmoins, pour ce qui est des liens routiers de base, le calcul des temps de parcours a été exactement réalisé telle que décrit par la méthode.

5.4 Résultats via l'algorithme

5.4.1 Temps de parcours sur le graphe

En premier lieu, ce sont les temps de parcours générés par le graphe qui sont testés, ainsi que leur hiérarchisation. Effectivement, même si le graphe n'est pas destiné à calculer un temps de parcours exact pour un trajet, mais plutôt à hiérarchiser les temps de parcours sur différents trajets, il est intéressant de quantifier la précision des temps de parcours générés par le graphe. De plus, il

est primordial de s'assurer de la hiérarchisation des temps de parcours générés ; c'est-à-dire qu'un déplacement plus long qu'un autre dans la réalité doit aussi être plus long dans le graphe.

Pour analyser ces temps de parcours, leur hiérarchisation et leur précision, nous séparons l'étude en 3 étapes. D'abord, il y a l'évaluation des temps de parcours entre des nœuds artériels, ensuite entre des nœuds centroïdes et enfin en empruntant le réseau TC. En effet, pour situer correctement les erreurs, il faut commencer par évaluer le graphe artériel, car les trajets de centroïdes à centroïdes passeront certainement par le graphe artériel alors qu'une fois sur le graphe artériel, sachant que la destination est aussi sur le graphe artériel, il est peu probable de repasser par le graphe basique.

Les notions de justesse et de fidélité statistiques des temps de parcours générés par le graphe se rapportent aux concepts décrits dans la Figure 5.1. Des mesures sont statistiquement justes si leur moyenne est proche de la valeur réelle. Des mesures sont statistiquement fidèles si leur variance, ou écart-type, est faible relativement à leur écart à la valeur réellement mesurée. Dans notre cas, on prend pour hypothèse que la valeur réelle est le temps de parcours calculé par Google Maps et que la valeur mesurée est le temps de parcours calculé par le graphe.

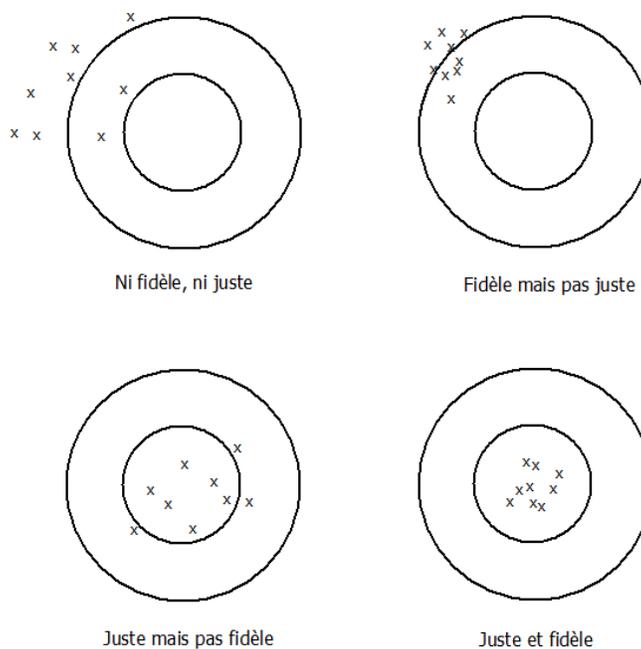


Figure 5.1: Notion de justesse et de fidélité statistique (inspiré de (Nancy-Metz, 2012))

5.4.1.1 Temps de parcours sur le réseau artériel

5.4.1.1.1 Test et exposition des résultats

Pour tester les temps de parcours sur le réseau artériel, les demandes de déplacement de l'enquête OD sont choisies pour servir de modèles. Ainsi, pour chaque déplacement de l'enquête OD, on choisit le point artériel le plus proche de l'origine et le point artériel le plus proche de la destination. À partir de là, les temps de parcours pour l'ensemble de ces déplacements de nœuds artériels vers nœuds artériels ont été calculés d'une part sur le graphe (T_G), et d'autre part sur Google Maps (T_{Maps}). Le but du test est alors de comparer les résultats des deux calculs, l'idée étant de quantifier l'erreur commise sur le temps de parcours généré ainsi que de vérifier la hiérarchisation des temps de parcours des différents déplacements.

Comme on peut le voir sur la Figure 5.2, le test n'a pas pris en compte les 25 295 trajets de l'échantillon étudié, mais 19 386 qui sont le nombre de trajets distincts. Effectivement, en prenant les nœuds de départ et d'arrivée comme les nœuds artériels les plus proches de l'origine et de la destination des trajets de l'enquête OD, certains trajets sont similaires. Sur cette même figure, alors que les trajets ont été rangés en fonction de T_{Maps} croissant, on peut voir que l'allure de la courbe des T_G suit la courbe des T_{Maps} . Néanmoins, on remarque qu'en général le temps de parcours est surévalué par le graphe. Ceci est confirmé par le Tableau 5.1, qui montre qu'en moyenne le trajet est surévalué d'un peu plus de 9 minutes, ou par la Figure 5.4, qui montre que la répartition du rapport T_G sur T_{Maps} est majoritairement supérieure à 1. On s'aperçoit aussi que les erreurs s'accumulent sur les trajets longs puisqu'en moyenne T_G est 70% plus grand que T_{Maps} pour les trajets de plus de 30 minutes alors qu'il n'est surévalué que de 30% pour les trajets de moins d'une demi-heure. Néanmoins, les erreurs sur les trajets longs sont plus prévisibles que sur les trajets courts. En clair, sur les longs trajets, T_G est relativement fidèle statistiquement et un peu moins juste (la moyenne de l'erreur relative est grande : 1.70, mais l'écart-type de cette même erreur relative est faible : 0.53), alors que sur les trajets courts, T_G est plutôt juste statistiquement, mais relativement moins fidèle (la moyenne de l'erreur relative est faible : 1.37, mais l'écart-type de cette même erreur relative est grande : 2.18). Notre graphe ayant pour but de hiérarchiser les trajets entre eux, la hiérarchisation des trajets est meilleure sur les longs trajets puisque l'écart-type des erreurs relatives est beaucoup plus faible (0.53 pour les trajets longs contre 2.18 pour les trajets courts). Les sources d'erreurs sont explicitées dans la suite.

Tableau 5.1: Comparaison statistique entre T_G et T_{Maps} sur l'ensemble des trajets entre nœuds artériels

| Comparaison entre T_G et T_{maps} (min) | | | | |
|---|--------------|------------------|--------------------|------------------|
| | Trajets | $T_G - T_{maps}$ | $ T_G - T_{maps} $ | T_G / T_{maps} |
| Moyenne | Ensemble | 9.54 | 12.09 | 1.42 |
| | < 30 minutes | 6.28 | 9.09 | 1.37 |
| | > 30 minutes | 28.45 | 29.42 | 1.70 |
| Mediane | Ensemble | 5.43 | 7.17 | 1.31 |
| | < 30 minutes | 3.67 | 6.03 | 1.24 |
| | > 30 minutes | 23.57 | 23.59 | 1.65 |
| Ecart-type | Ensemble | 16.18 | 14.38 | 2.02 |
| | < 30 minutes | 11.26 | 9.14 | 2.18 |
| | > 30 minutes | 25.01 | 23.86 | 0.53 |

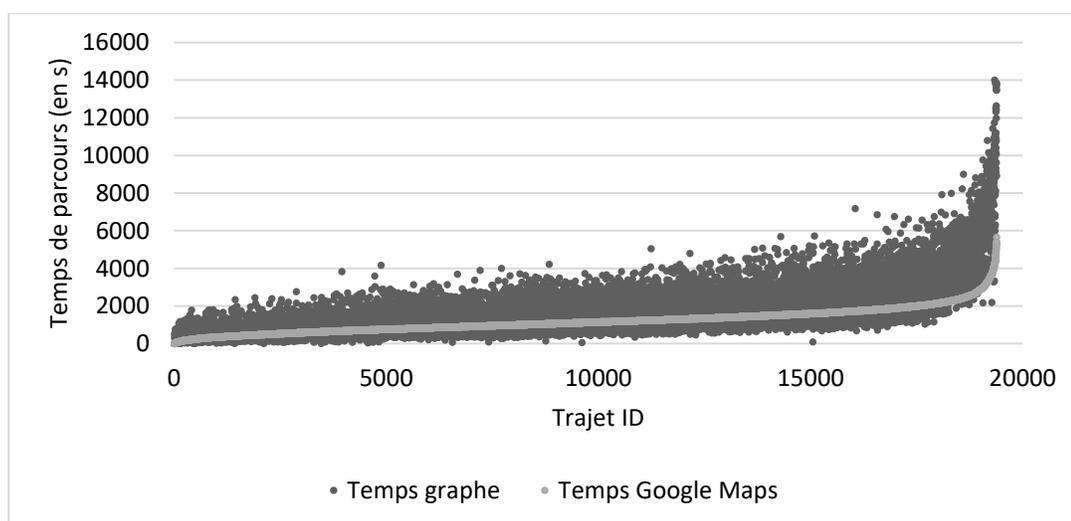


Figure 5.2: Comparaison de T_{Maps} et T_G sur un ensemble de trajets entre nœuds artériels

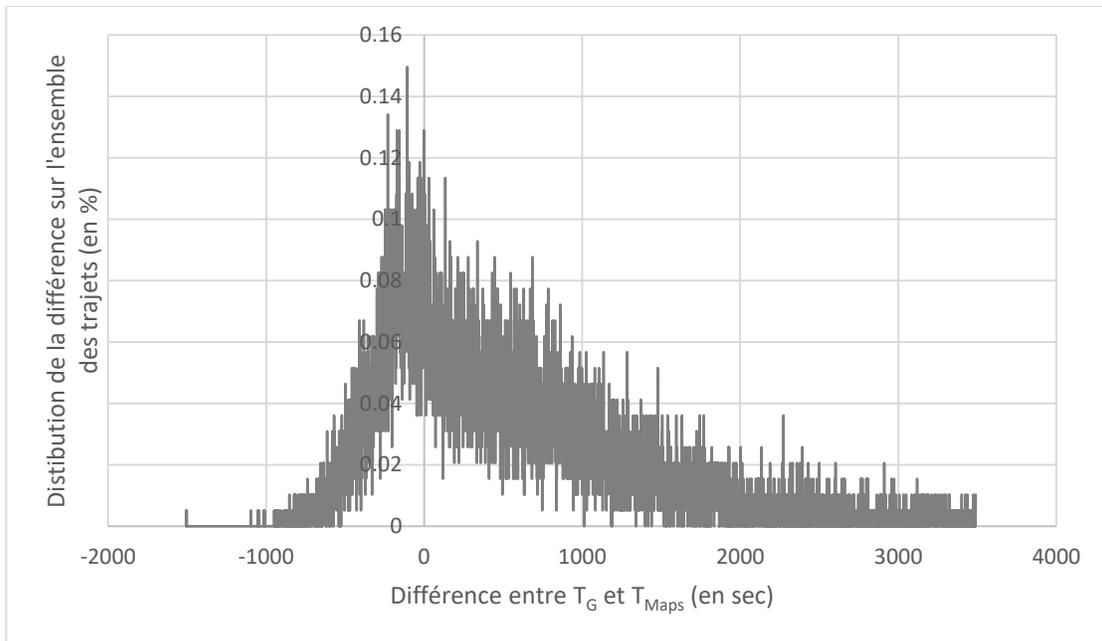


Figure 5.3: Distribution de $T_G - T_{Maps}$ sur un ensemble de trajets entre nœuds artériels

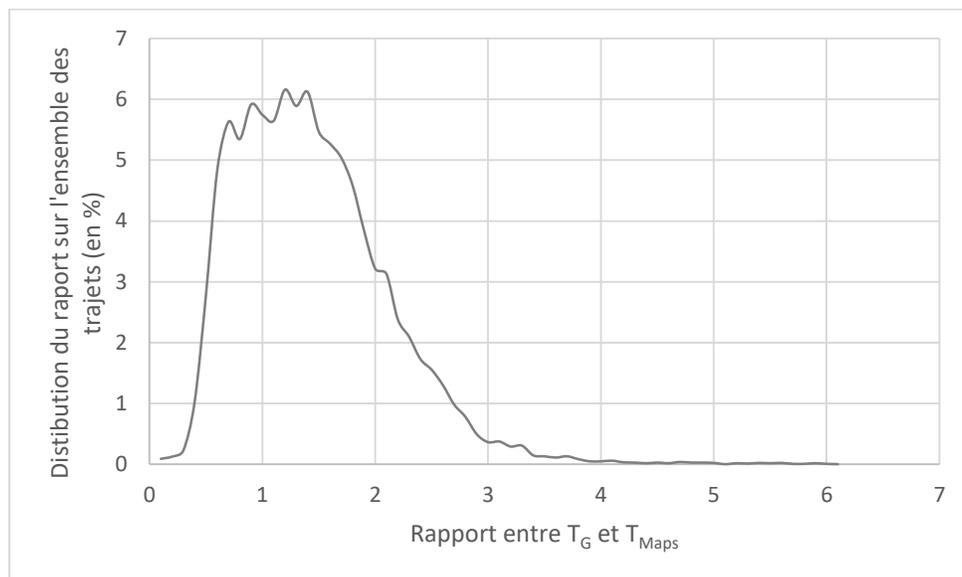


Figure 5.4: Distribution de T_G / T_{Maps} sur un ensemble de trajets entre nœuds artériels

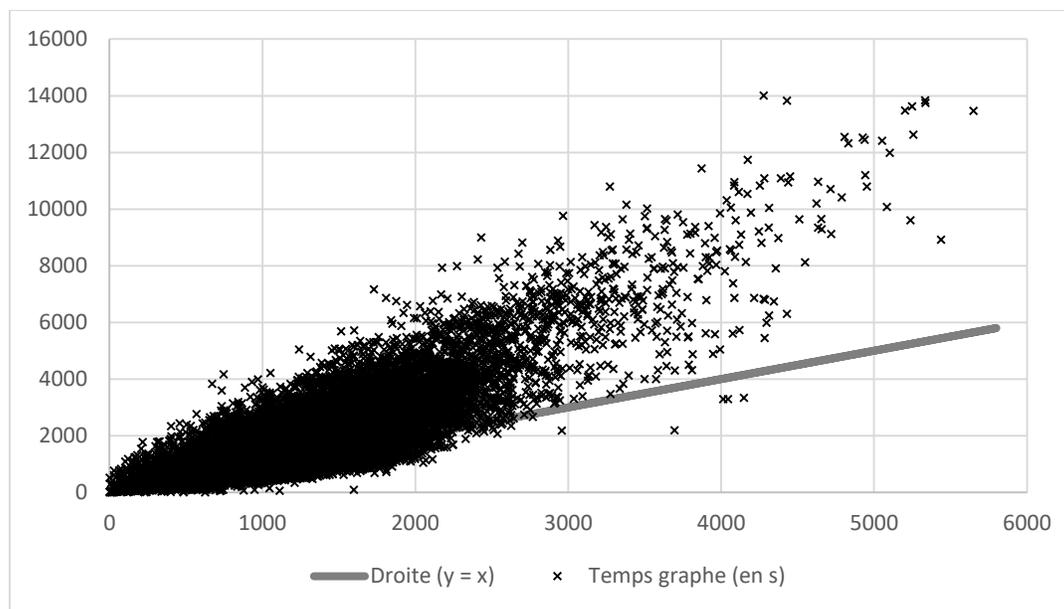


Figure 5.5: T_G en fonction de T_{Maps} sur un ensemble de trajets entre nœuds artériels

5.4.1.1.2 Explications des résultats

Comme nous avons pu le voir dans la partie précédente, les temps de parcours sur le graphe suivent, à une erreur près d'un peu moins de 10 minutes en moyenne, l'allure des temps de parcours calculés via Google Maps. Néanmoins, comme il s'agit là d'une surestimation moyenne, il est à relever qu'il y a tout de même 32% des temps de parcours qui sont sous-évalués et se situent donc sous la courbe $y = f(x)$ sur la Figure 5.5 ou à gauche de l'axe des ordonnées de la Figure 5.3. Sachant que c'est la hiérarchisation des temps de parcours entre eux qui nous intéresse, afin de classer les différents conducteurs (les différentes opportunités) entre eux, on a pu observer que l'écart-type de l'erreur relative (T_G/T_{Maps}) est beaucoup plus bas pour les longs trajets (>30 minutes) que pour les trajets plus courts.

Ceci s'explique très simplement par la construction du graphe minimal réalisé pour mener à bien ces tests. Effectivement, pour calculer les temps de parcours sur les liens artériels du graphe minimal utilisé pour ces tests, la méthodologie énoncée au 4.2.5.4 a été simplifiée, c'est-à-dire que les temps de parcours sur les liens ont été calculés à partir d'un seul nœud artériel, sans calculer la moyenne des temps de parcours les plus courts sur tous les nœuds substitués au nœud artériel. Il survient donc des problèmes comme celui illustré sur la Figure 4.5, dans la partie basse de l'image. Ce phénomène explique plusieurs erreurs observées dans nos résultats. D'une part, sur les trajets

courts, si le nœud artériel est situé sur la mauvaise voie, dans le mauvais sens sur le réseau artériel, son trajet va être copieusement rallongé, car son temps de parcours inclura la sortie de l'artère et le demi-tour, alors que s'il est situé sur la bonne voie, dans le bon sens de circulation, le temps de parcours sera bien calculé. Ceci explique l'écart-type élevé de l'erreur sur les trajets courts. Pour les trajets longs, ces erreurs se compensent parmi la suite de liens artériels parcourus. En effet, admettons qu'un nœud artériel sur deux soit calculé dans le mauvais sens, alors plus il y aura de liens artériels traversés à la suite sur un trajet, plus l'erreur absolue augmentera, mais aussi plus l'erreur relative convergera vers 0.5 fois l'erreur relative engendrée par la traversée d'un mauvais lien. De cette manière, la prédiction du temps de parcours sur les longs trajets est plus sûre, il suffit d'y injecter la bonne valeur de correcteur.

5.4.1.2 Temps de parcours de centroïde à centroïde

5.4.1.2.1 Test et exposition des résultats

Maintenant, ce sont les temps de parcours sur le graphe routier dans son ensemble qui sont testés. Pour ce faire, l'ensemble des déplacements est défini en choisissant, comme origine, le centroïde de base le plus proche de l'origine du déplacement de l'enquête OD et comme destination, le centroïde de base le plus proche de la destination du déplacement de l'enquête OD. C'est exactement le processus réalisé lors d'une nouvelle demande d'un utilisateur si l'on ne considère pas le réseau de transport en commun. Pour réaliser ce test, d'abord, le calcul du temps de parcours est réalisé sur le graphe. Ensuite, un temps de parcours de référence est calculé via Google Maps et une comparaison peut être faite.

Sur la Figure 5.6, on observe que l'allure des relevés de T_G suit l'allure des relevés T_{Maps} , de la même façon que pour les trajets entre nœuds artériels, avec toutefois un étalement autour de la courbe de T_{Maps} qui paraît un peu plus étroit. Effectivement, l'écart-type de ce test est meilleur. Comme on peut le voir dans le Tableau 5.2: Comparaison statistique entre T_G et T_{Maps} sur l'ensemble des trajets entre centroïdes, les résultats sont assez similaires à ceux des trajets entre nœuds artériels avec une seule différence qui est significative, et elle concerne les écarts-types. En effet, l'écart-type de T_G / T_{Maps} sur l'ensemble des trajets passe de 2.02 pour les trajets entre nœuds artériels à 0.5 pour les trajets entre centroïdes. Cette amélioration est clairement significative et est de bon augure quant à la hiérarchisation des trajets conducteurs. Il y a toujours au final une surestimation des temps de parcours en moyenne comme on peut le voir sur la Figure 5.9, même

s'il faut garder en tête que ceci ne signifie pas qu'il n'y pas de trajets qui sont sous-estimés (voir Figure 5.7).

Tableau 5.2: Comparaison statistique entre T_G et T_{Maps} sur l'ensemble des trajets entre centroïdes

| Comparaison entre T_G et T_{maps} (min) | | | |
|---|--------------|------------------|------------------|
| Trajets | | $T_G - T_{maps}$ | T_G / T_{maps} |
| Moyenne | Ensemble | 10.78 | 1.36 |
| | < 30 minutes | 5.96 | 1.28 |
| | > 30 minutes | 28.00 | 1.64 |
| Mediane | Ensemble | 6.57 | 1.33 |
| | < 30 minutes | 4.00 | 1.24 |
| | > 30 minutes | 22.78 | 1.62 |
| Ecart-type | Ensemble | 17.00 | 0.50 |
| | < 30 minutes | 9.60 | 0.48 |
| | > 30 minutes | 24.77 | 0.44 |

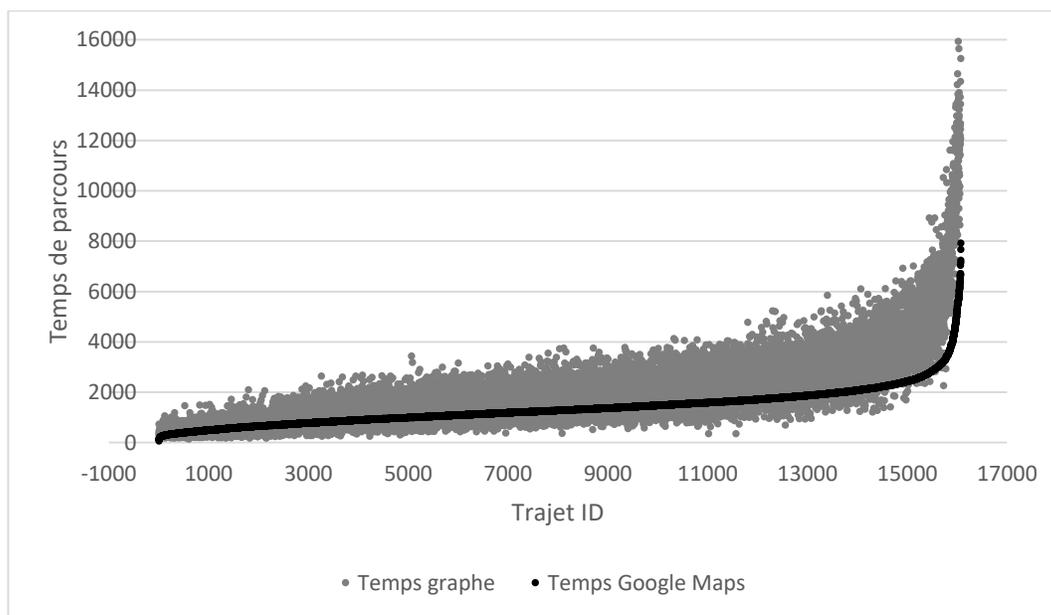


Figure 5.6: Comparaison de T_{Maps} et T_G sur un ensemble de trajets entre centroïdes

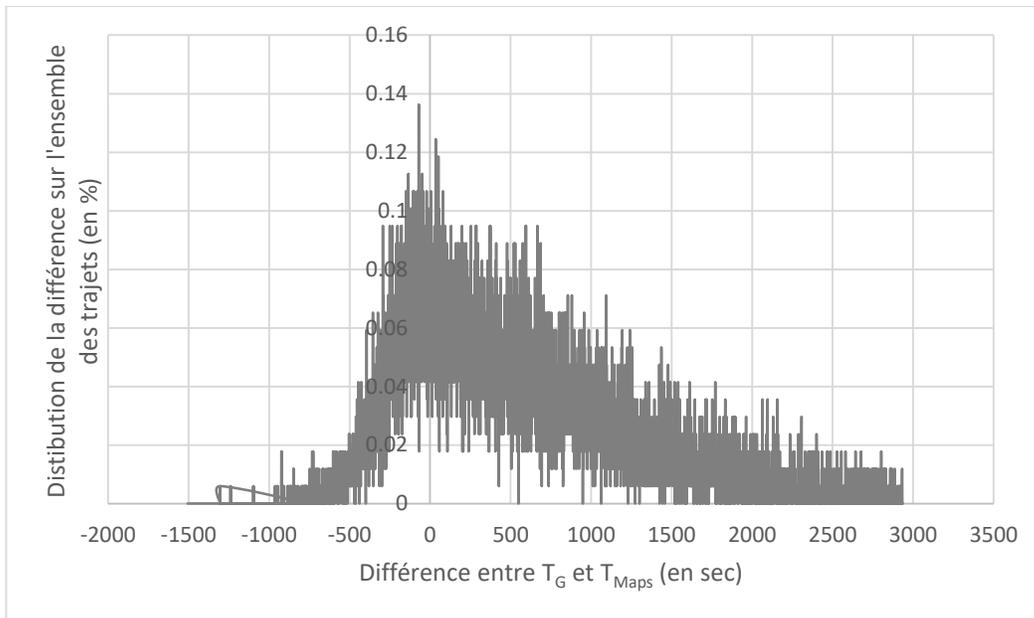


Figure 5.7: Distribution de $T_G - T_{Maps}$ sur un ensemble de trajets entre centroïdes

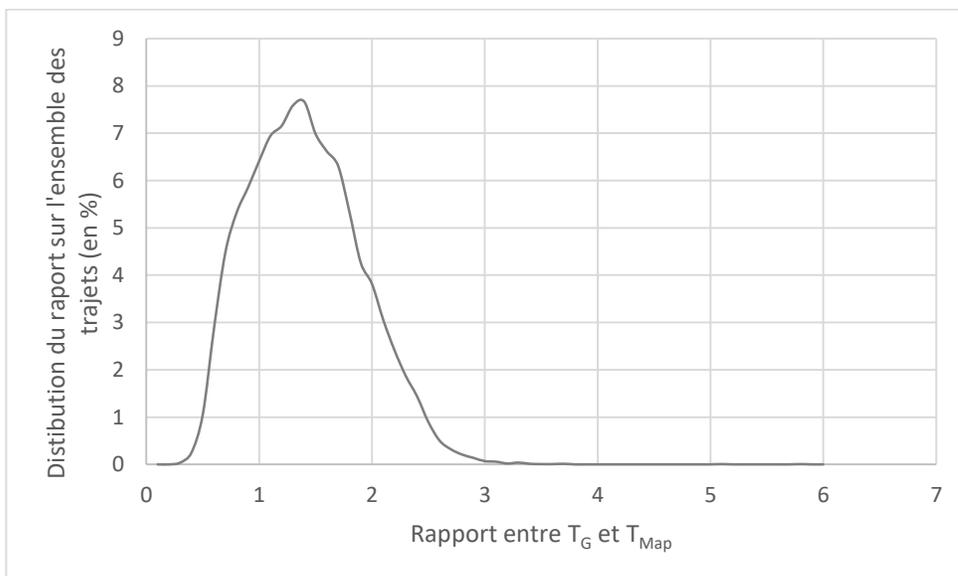


Figure 5.8: Distribution de T_G / T_{Maps} sur un ensemble de trajets entre centroïdes

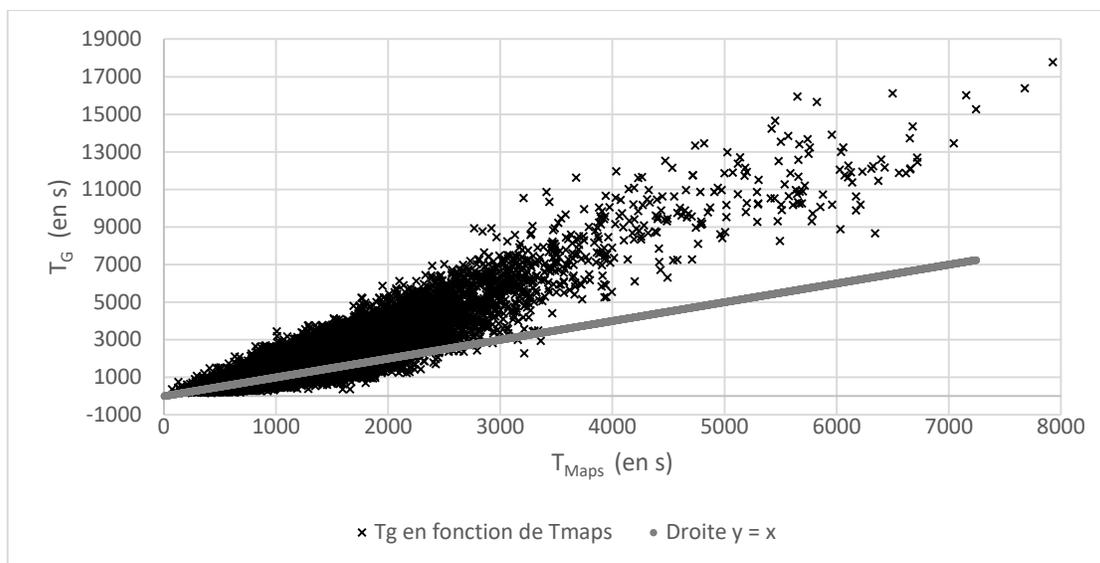


Figure 5.9: T_G en fonction de T_{Maps} sur un ensemble de trajets entre nœuds centroïdes

5.4.1.2.2 Explications des résultats

En moyenne, les temps T_G , calculés par le graphe, sont encore surévalués (comparé au test précédent), mais cette fois, l'écart-type de l'erreur relative a été largement amélioré (comparaison de la Figure 5.8 à la Figure 5.4) puisqu'il passe de 2.02 à 0.50 pour T_G / T_{Maps} sur l'ensemble des trajets. L'amélioration de cet indicateur permet d'avoir des résultats statistiquement plus fidèles, et conséquemment une meilleure hiérarchisation des trajets conducteurs, ce qui est le but premier du graphe. On peut aussi déduire de ce test que les prédictions des temps de parcours sur les liens routiers basiques sont bien meilleures que celles sur les liens routiers artériels. Effectivement, le fait de démarrer de centroïdes et non de nœuds artériels se traduit par des trajets plus longs (23 minutes en moyenne contre 20 minutes au test précédent). Les trajets empruntent maintenant, en plus des liens artériels, des liens routiers basiques. De ce fait, la moyenne de l'erreur absolue ne varie pas vraiment, puisqu'il s'agit toujours de l'erreur des mêmes liens artériels empruntés, par contre l'erreur relative diminue, puisqu'elle tient compte de l'ensemble du trajet, et donc des liens routiers basiques empruntés qui allongent le trajet. De ce résultat, on peut déduire que les liens routiers basiques contiennent moins d'erreurs puisque pour des trajets plus longs, l'erreur absolue est quasiment égale et l'erreur relative est améliorée. Et c'est finalement assez logique qu'en raison du mode de calcul des temps de parcours sur les liens artériels pour le graphe utilisé dans ces tests,

la justesse du temps de parcours sur un lien basique est plus garantie que celle sur un lien artériel. En effet, lors de la création du graphe, le temps de parcours sur un lien basique est issu de la moyenne des temps de parcours de 100 trajets différents entre les deux zones adjacentes reliées par le lien. Or, la justesse du temps de parcours sur un lien artériel est beaucoup moins garantie et dépend grandement du nœud artériel choisi parmi ses nœuds substitués. Aussi, en démarrant le trajet depuis un centroïde, l'utilisateur a le choix, soit d'emprunter un lien vers un nœud artériel si le nœud artériel est situé dans le bon sens du trajet et offre donc un temps de parcours faible, soit d'emprunter un lien basique vers un autre centroïde si le lien artériel accessible est représenté par un nœud situé sur une voie qui va dans le sens inverse du trajet et propose donc un temps de parcours trop long pour être profitable.

Finalement, le fait que cet écart-type se soit bien amélioré en utilisant les centroïdes comme extrémités des trajets est un bon signe pour le système de covoiturage, car c'est de cette façon que les utilisateurs seront distribués sur le réseau. De même, il est bon de savoir que les liens basiques améliorent le système. Effectivement, ce sont des liens dont la construction et le calcul des temps de parcours n'ont pas été simplifiés lors de la création du graphe minimal utilisé pour ces tests. Nous pouvons donc valider leur méthodologie de construction.

5.4.1.3 Temps de parcours sur le graphe TC

5.4.1.3.1 Test et exposition des résultats

Enfin, ce sont les temps de parcours sur le graphe TC qui sont testés. La construction du graphe TC utilisé lors des tests a elle aussi été simplifiée. La méthode de construction a été suivie pour la création géométrique des nœuds et des liens, que ce soient pour les liens en véhicule ou pour les liens de transfert. Néanmoins, la méthode de calcul des temps de parcours préconisée en utilisant les GTFS a été simplifiée. Voulant, pour tester le graphe, avoir un maximum d'options de trajets TC, aucun intervalle de temps n'a été choisi et donc, toutes les lignes de la Société de transport de Montréal (STM), ainsi que les trains de l'AMT, ont été ajoutées au graphe sans distinction d'horaires. Le graphe TC mélange donc les lignes de métro, de bus de jour et de nuit et les trains. Effectivement, lors des tests, il a été jugé préférable de montrer que le système créé permettait de générer des trajets multimodaux, et d'en avoir une multiplicité. De ce fait, le calcul des temps de parcours sur le graphe TC a été adapté. Pour rappel, le temps de parcours sur les liens TC ne comprend que le temps en véhicule et est donc calculé grâce au temps de passage du GTFS.

Les temps d'attente aux arrêts sont inclus dans les temps de parcours sur les liens de transition. De même, ces temps d'attente sont issus du fichier GTFS. Pour le graphe minimal de nos tests, les temps de parcours sur les liens TC ont été calculés différemment. Ils sont basés sur un calcul réalisé via OpenTripPlanner, où un calcul a été fait entre chaque arrêt consécutif d'une même ligne, et dont l'heure de départ a été fixée aléatoirement. Toutes les lignes, que ce soient celles de nuit ou celles de jour ont un temps de parcours. Ce temps de parcours comprenait le temps en véhicule ainsi que le temps d'attente. Sachant que, dans notre graphe, le temps d'attente est compris sur les liens de transition, il a fallu extraire les temps d'attente des temps en véhicule. Pour cela, un temps en véhicule approximatif a été calculé en divisant la longueur de la portion à traverser en véhicule entre chaque arrêt par une vitesse commerciale moyenne estimée (bus : 20 km/h, métro : 30km/h, train : 40km/h). La vitesse commerciale du bus a été consciemment augmentée dans le but de favoriser la génération de trajets multimodaux. Une fois ce temps en véhiculé estimé, il a été soustrait au temps calculé par OTP pour donner le temps d'attente, situé sur les liens de transition.

Vue la méthodologie appliquée pour le calcul des temps de parcours, on s'attend bien à ce que les résultats ne soient pas parfaits. Pour tester le graphe, on a donc, comme précédemment, généré des trajets en se basant sur l'échantillon de l'enquête OD de 2008. L'origine des trajets a été choisie comme le centroïde le plus proche de l'origine de l'enquête OD et la destination comme l'arrêt de transport en commun le plus proche de la destination de l'enquête OD. Si le trajet commence par un centroïde, c'est afin de considérer le temps d'attente contenu dans les liens de transition. Pour analyser les sources d'erreurs, le test ci-après a été réalisé avec et sans prise en compte des temps d'attentes. En effet, le temps de parcours sur un lien étant issu d'un seul calcul OTP, les temps d'attente n'ont pas pu être correctement estimés. Prenons un exemple extrême, imaginons une gare de train où il y a un départ toutes les 50 minutes. Si le calcul OTP simulait un départ à cette gare 1 minute avant que le train démarre, alors le temps d'attente qui est mis sur le lien de transition en question est d'environ une minute, indépendamment du fait que l'attente moyenne est ici de 25 minutes. C'est pourquoi dans la méthodologie, il est préconisé de calculer les temps d'attente depuis une moyenne issue du fichier GTFS.

Il est à noter que les temps sans attente mentionnés par la suite ne tiennent pas compte du temps d'attente lors de l'embarquement à l'origine, mais tient compte tout de même des temps de transferts entre lignes qui eux sont égaux au temps d'attente calculé à ces arrêts-là.

Tableau 5.3: Comparaison statistique entre T_G et T_{Maps} avec et sans temps d'attente sur un ensemble de trajets entre nœuds TC

| Comparaison entre T_G et T_{maps} (min) | | | | | |
|---|--------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | Trajets | Sans attente | | Avec attente | |
| | | $T_G - T_{maps}$ | T_G / T_{maps} | $T_G - T_{maps}$ | T_G / T_{maps} |
| Moyenne | Ensemble | -26.87 | 0.60 | -13.77 | 0.91 |
| | < 30 minutes | -3.42 | 0.91 | 3.29 | 1.54 |
| | > 30 minutes | -33.16 | 0.52 | -18.35 | 0.74 |
| Mediane | Ensemble | -24.67 | 0.53 | -17.28 | 0.64 |
| | < 30 minutes | -2.87 | 0.81 | -1.02 | 0.93 |
| | > 30 minutes | -30.25 | 0.50 | -23.00 | 0.59 |
| Ecart-type | Ensemble | 21.50 | 0.32 | 35.16 | 1.03 |
| | < 30 minutes | 7.33 | 0.49 | 16.56 | 1.83 |
| | > 30 minutes | 19.61 | 0.18 | 37.35 | 0.57 |

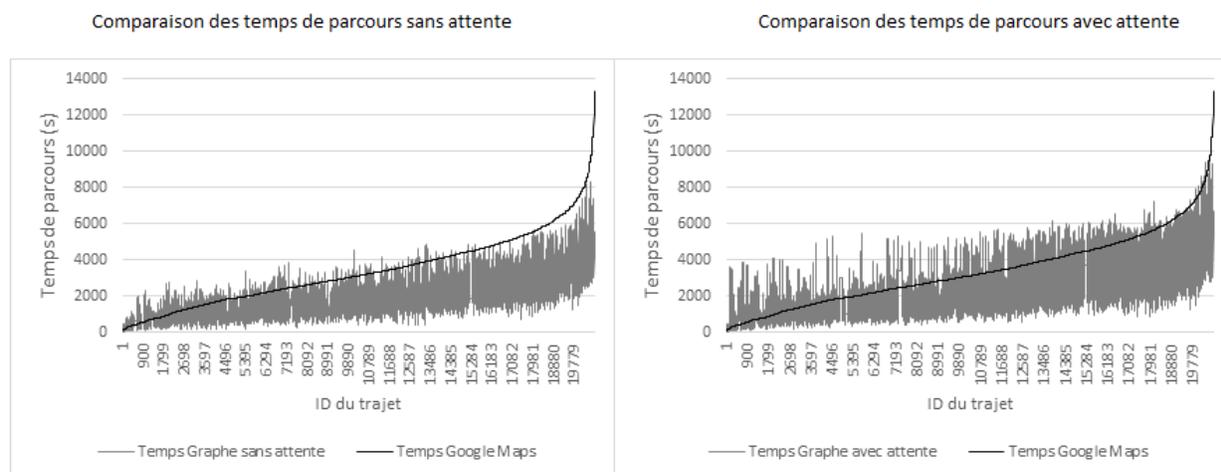


Figure 5.10: Comparaison de T_{Maps} et T_G avec et sans temps d'attente sur un ensemble de trajets entre nœuds TC

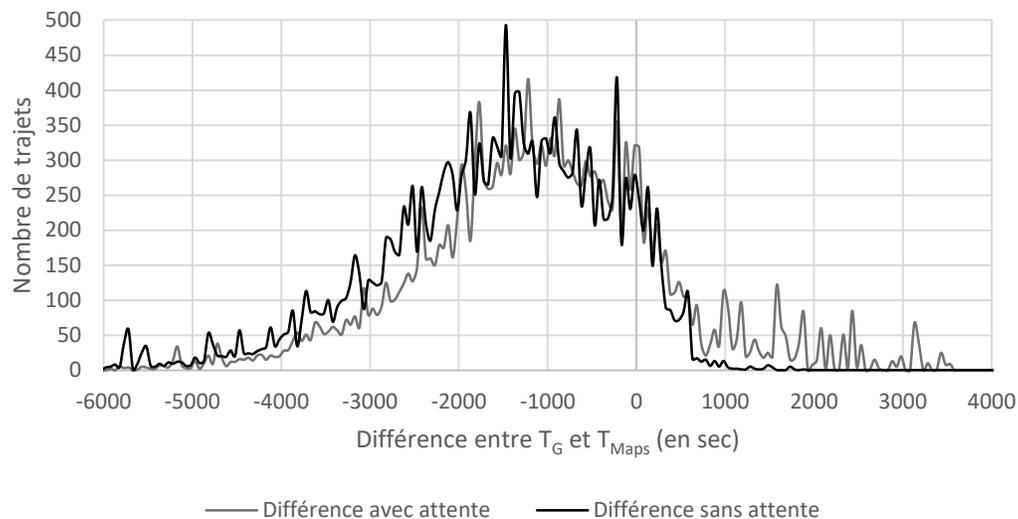


Figure 5.11: Distribution de $T_G - T_{Maps}$ avec et sans temps d'attente sur un ensemble de trajets entre nœuds TC

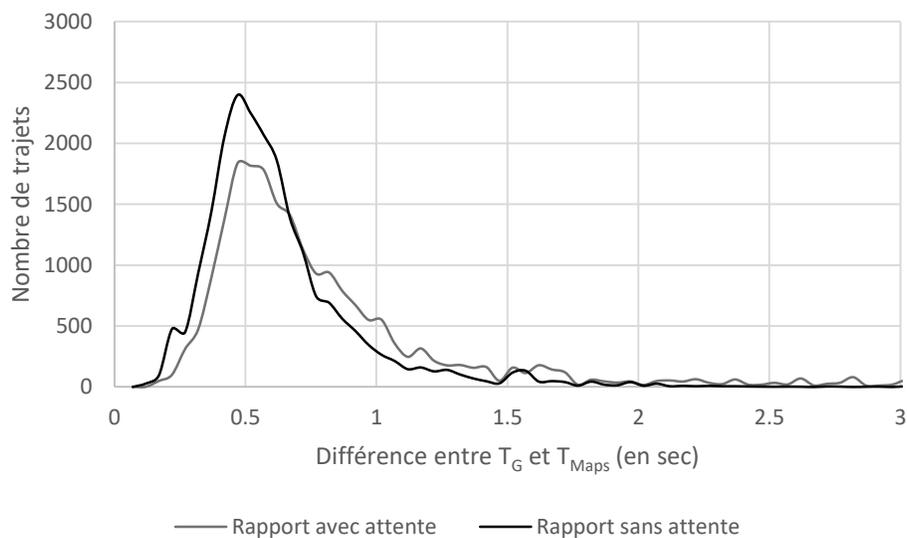


Figure 5.12: Distribution de T_G / T_{Maps} avec et sans temps d'attente sur un ensemble de trajets entre nœuds TC

5.4.1.3.2 Explications des résultats

Comme on peut le voir sur les figures précédentes, les résultats ne sont pas très satisfaisants. À l'inverse des tests sur les nœuds routiers où la distribution des rapports T_G / T_{Maps} se centrait

autour de 1.3, on voit sur la Figure 5.12 que ce même rapport est ici centré sur 0.5. En effet, la longueur des trajets est la plupart du temps sous-estimée (voir Figure 5.11).

Si on analyse les temps de parcours sans attente, c'est-à-dire uniquement en véhicule, on s'aperçoit que les temps de parcours sont sous-estimés, mais on peut remarquer qu'ils ne sont sous-estimés que de quelques trois minutes en moyenne pour les trajets courts. En effet, les trajets de moins de 30 minutes ne contiennent généralement pas de transfert et notre calcul des temps d'attente n'intervient donc jamais dans ces résultats. C'est certainement de là que provient la dégradation des résultats pour les trajets plus longs, c'est-à-dire qui durent plus de 30 minutes, que l'on observe dans le Tableau 5.3. On peut aussi remarquer que l'écart-type sur ces relevés sans temps d'attente est assez bas.

Par contre, en observant les graphiques et tableaux de mesures qui considèrent les temps d'attente, les résultats se détériorent significativement. En introduisant des temps supplémentaires, les temps de trajets sont logiquement un peu moins sous-estimés, mais le sont toujours. De plus, ces temps d'attente injectent une grande infidélité statistique dans le graphe. Les écarts-types relevés croissent grandement. C'est le phénomène mentionné ci-avant avec le temps d'attente du train dont l'intervalle de service est de 50 minutes, mais qui est calculé à 1 minute, car le calcul d'OTP a été fait une minute avant son départ. Les temps d'attente générés sont aléatoires dans l'intervalle de service et ne font qu'ajouter du bruit aux prédictions sur la Figure 5.10.

Ce dernier test sur les temps de parcours TC montre que la méthode alternative de calcul des temps de parcours sur les liens TC utilisée pour construire ce graphe minimal ne donne pas de bons résultats. Effectivement, les temps de parcours sur les liens sont basés sur un unique calcul OTP et on remarque que les temps d'attente en sont particulièrement affectés. De même, la décision de mélanger les transports de nuit et de jour sans choisir un intervalle de temps pour le graphe est génératrice d'erreurs. Néanmoins, cette dernière décision est pleinement assumée, dans le but de prouver la génération possible de trajets multimodaux plausible via notre graphe dans le test suivant.

5.4.2 Mise en situation

5.4.2.1 Présentation du test et de ses enjeux

Ce second test met à l'épreuve l'ensemble de la méthodologie énoncé. L'algorithme global de covoiturage est mis en situation réelle de demandes de covoiturage. Effectivement, l'ensemble des 25 000 trajets de l'enquête OD est considéré comme un ensemble de demandes de covoiturage. On estime que ces demandeurs possèdent une voiture et peuvent donc être indifféremment passagers ou conducteurs. Via notre algorithme (cf. Figure 3.1), pour chaque utilisateur, un classement des meilleurs jumelages avec les conducteurs disponibles est réalisé. Ce classement dépend alors du détour qu'engendre ce jumelage pour le conducteur, c'est-à-dire le rapport entre la durée de son trajet initial et la durée de son trajet, s'il s'occupe de transporter le passager. Ce classement est réalisé par un ensemble de calculs sur le graphe multimodal. Le but du test est alors de confronter ce classement, issu du graphe multimodal, au même classement qui serait lui généré via un calculateur de chemin précis, soit Google Maps. Il faut garder à l'esprit que ce sont les quelques meilleurs jumelages de ce classement qui sont sélectionnés pour être étudiés plus finement, filtrés et, pour les meilleurs, proposés à l'utilisateur. Ce sont donc les premiers meilleurs jumelages du classement qui doivent être observés en priorité.

5.4.2.2 Présentation des résultats du test

Pour chaque utilisateur, soit pour chaque trajet de l'enquête OD, le tri ajustable est réalisé, c'est-à-dire que les conducteurs qui ne partent pas du tout à la même heure que l'utilisateur ou qui ne remplissent pas des conditions géographiques simples avec l'utilisateur sont écartés de la liste des conducteurs disponibles (cf. Présentation de l'algorithme de jumelage). Aussi chaque utilisateur possède-t-il une liste propre de conducteurs disponibles. Dans ces utilisateurs, 100 d'entre eux, ayant entre 80 et 120 conducteurs disponibles dans leur liste, sont sélectionnés. Ce sont sur ces 100 utilisateurs qu'est mené le test.

Premièrement, le graphe multimodal est utilisé pour générer l'ensemble des meilleurs trajets possible pour chaque utilisateur, comme mentionné dans le b.2 de la Figure 3.1. Ensuite, pour chacun de ces trajets possibles, on imagine que les conducteurs disponibles récupèrent le passager et réalisent l'intégralité du segment routier qui lui est nécessaire, puis se rendent à leur

destination. À partir de là, le classement des opérations qui génèrent le moins de détours au conducteur peut être réalisé.

Finalement, on obtient 100 classements, un par utilisateur, ayant été générés par le graphe multimodal. En addition, on va générer ces mêmes classements via Google Maps pour pouvoir quantifier la justesse de nos classements. En effet, pour chaque utilisateur, on va calculer le détour de chacun de ses conducteurs pour faire l'opération de covoiturage trouvée par notre graphe. Un classement appelé Google Maps sera généré pour chaque utilisateur grâce à ce calcul. Pour comparer ces classements, le premier critère pris en compte concerne le conducteur en première place du classement généré par le graphe, appelé meneur. On observe le placement du meneur dans le classement généré par Google Maps. En observant les 100 classements, on peut relever la position moyenne du meneur dans les classements Google Maps, sa position médiane et le pourcentage de fois où il est aussi le premier.

Tableau 5.4: État du meneur dans les classements Google Maps

| | |
|----------------------------|-----------------|
| Position moyenne du meneur | 14 ^e |
| Position médiane du meneur | 7 ^e |
| %age de même meneur | 19 % |

Le meneur est donc près d'une fois sur cinq également meneur dans le classement Google Maps et pour la moitié des classements, le meneur se trouve à une meilleure place que la 7^{ème} inclusivement.

Comme 2^e critère, on observe la position moyenne du meneur et de ses deux poursuivants (soient les deux conducteurs placés 2^e et 3^e dans le classement issu du graphe multimodal) dans le classement Google Maps. L'étude sur les cent classements nous donne que le meneur et ses deux poursuivants sont en moyenne 17^e dans les classements Google Maps. La médiane de cet indicateur est la 15^e place.

En pratique, l'algorithme étudiera précisément seulement les quelques meilleurs jumelages, pour ensuite proposer le(s) meilleur(s) à l'utilisateur. En prenant comme hypothèse que celui-ci ne prendra que les dix meilleurs jumelages pour les étudier précisément, il est intéressant de savoir combien de fois le meneur sera dans les dix meilleurs jumelages selon Google Maps. De même, on

peut regarder cela pour les deux poursuivants. En faisant le test sur les cent classements, on trouve les résultats du Tableau 5.5.

Tableau 5.5: Répartition des meneurs dans les 10 premiers du classement Google Maps

| | Pourcentage de classements dans lesquels le meneur est dans les 10 premiers du classement Google Maps |
|---------------|---|
| Meneur | 64% |
| Poursuivant 1 | 44% |
| Poursuivant 2 | 47% |

5.4.2.3 Explication des résultats du test

Ce test est intéressant afin de fixer le nombre de jumelages à analyser finement. En effet, notre système de covoiturage a pour but de générer une petite liste de jumelages qui doivent être analysés plus en détail via un calculateur de chemin précis. Ces jumelages générés par notre système contiennent les informations suivantes :

- conducteur et passager,
- origine conducteur, origine passager, destination conducteur, destination passager.

À partir de cette liste et en faisant fonctionner un calculateur de chemin classique, l'utilisateur du système se verra proposer le meilleur jumelage. Néanmoins, lorsque l'on crée cette liste de jumelage, il faut être sûr qu'elle contienne le meilleur jumelage au final. 1 fois sur 5 le meneur est bien le meilleur jumelage possible et 2 fois sur 3, il est dans les 10 meilleurs jumelages possibles. Cependant, il faut bien tenir compte que dans ce test, l'ensemble des 25000 trajets de notre échantillon de l'enquête OD ont été pris comme des demandes de covoiturage. Si en réalité, la demande est un peu plus faible, conséquemment les jumelages dans les classements seront plus hétérogènes et le choix des meilleurs jumelages plus facile.

Tout de même, il est intéressant de voir que des trajets multimodaux plausibles sont générés. En voici quelques exemples sur la Figure 5.13. Sur le trajet de gauche, l'utilisateur part de Saint-Sauveur en voiture, à Saint-Jérôme il quitte la voiture et fait la transition vers la ligne de bus 9 Saint-Jérôme – Laval du CIT des Laurentides. L'utilisateur parcourt cette ligne de bus jusqu'au terminus qui correspond à la station de métro Montmorency de la ligne orange de la STM, ligne qu'il emprunte jusqu'au centre-ville de Montréal où il arrive à destination.

Sur le trajet de droite, l'utilisateur démarre du sud de Sainte-Julie en voiture et contourne le parc national du Mont-Saint Bruno pour se rendre à la gare de Saint-Basile-le-Grand où il embarque dans le train du Mont-Saint-Hilaire en direction de Montréal. Arrivé à la Gare Centrale, il peut emprunter la ligne de métro orange de la STM à partir de la station Bonaventure jusqu'aux alentours de Rosemont, sa destination. D'autres trajets sont disponibles à l'Annexe E.

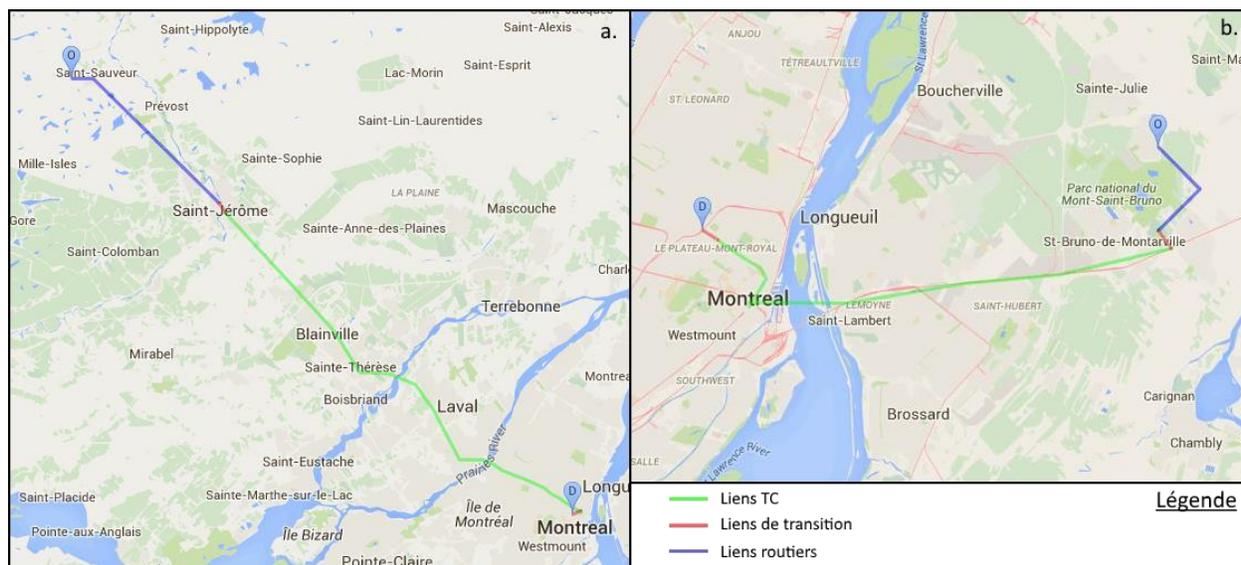


Figure 5.13: Exemples de trajets multimodaux générés

Pour finir, de manière plus générale, lors de la génération des trajets multimodaux, la répartition des différents types de trajets est présentée sur le Tableau 5.6. Étant donné que les temps de parcours, et surtout les temps d'attente sur le graphe TC ne sont pas précis, il a été choisi de ne générer que des trajets multimodaux qui sont uniquement soit routier puis TC soit TC puis routier, et donc de ne pas permettre d'enchaîner de nombreuses transitions. De ce fait, les résultats du Tableau 5.6 sont séparés entre les trajets multimodaux de type TC-routier et routier-TC. Les types de trajets sont catégorisés de la façon suivante : « pas de connexion de l'origine (la destination) du trajet OD au réseau TC » signifie qu'il n'y a aucune station TC accessible à la marche depuis l'origine (la destination du trajet), « trajet uniquement routier » signifie qu'aucun trajet TC n'est avantageux, le trajet routier pour se rendre au TC correspondant serait aussi long, voire plus long que le trajet routier pour faire le déplacement complet, « trajet uniquement TC » signifie que l'origine et la destination sont joignables sans emprunter le réseau routier et enfin « trajet multimodal routier-TC » signifie que le réseau routier doit obligatoirement être parcouru à un moment donné, car il n'y a aucun trajet TC qui puisse remplir le besoin de déplacement au complet.

Tableau 5.6: Répartition types de trajets lors de la génération des trajets multimodaux

| TC-Routier | Catégorie | Pourcentage |
|------------|--|-------------|
| | Pas de connexion de la destination du trajet OD au réseau TC | 54% |
| | Trajet uniquement routier | 3% |
| | Trajet uniquement TC | 21% |
| | Trajet multimodal Routier-TC | 22% |

| Routier-TC | Catégorie | Pourcentage |
|------------|---|-------------|
| | Pas de connexion de l'origine du trajet OD au réseau TC | 66% |
| | Trajet uniquement routier | 2% |
| | Trajet uniquement TC | 21% |
| | Trajet multimodal Routier-TC | 11% |

En conclusion, nous sommes donc capables de générer des trajets multimodaux. Néanmoins, le Tableau 5.6 montre que pour plus de la moitié des déplacements provenant de l'enquête OD, il n'est pas possible d'amorcer (ou terminer) le déplacement en transport en commun. De plus, très peu de déplacements sont dans le cas où ils pourraient être amorcer (ou terminer) en transport en commun mais dont le segment routier pour compléter ce segment TC serait alors plus long que si le déplacement entier était fait directement en voiture. Enfin, 20% peuvent être fait en transport en commun au complet et 20% supplémentaires sont multimodaux.

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

6.1 Résumé des travaux

Le but des travaux était de formuler une méthodologie pour créer un système, basé sur des informations géographiques pertinentes, qui permette de générer un ensemble de trajets multimodaux (combinant plusieurs modes de transport) pour se rendre d'une origine à une destination. Ce système a été présenté sous la forme d'un graphe et d'un algorithme. Effectivement, le mémoire présente comment construire, à partir d'un ensemble de données géographiques, un graphe sur lequel il est possible de générer des trajets multimodaux, grâce à la théorie des graphes.

C'est avec l'avènement du covoiturage que les besoins en calculateur de chemins multimodaux comprenant des segments en voiture vont se faire sentir dans les années à venir. On voit qu'avec seulement quelques données, comme ici les fichiers GTFS, le réseau routier et des données d'utilisation du sol issues d'OSM, on peut créer une méthodologie de génération de chemin multimodal. Ce système est loin d'être parfait et requiert encore l'utilisation des calculateurs de chemin classiques sur les quelques meilleurs jumelages qu'il génère, mais il représente une piste de réflexion sur comment créer un système viable, rapide, peu coûteux en calcul, qui puisse donner à l'utilisateur des réponses à ses besoins de déplacement de manière quasi instantanée (150ms sont nécessaires pour trier les 25000 trajets, en conserver 100 et faire le classement de leurs conducteurs en fonction du détour engendré par le jumelage (plus de détails dans Gagnon (2016)).

Le but du système présenté dans ce mémoire est donc de générer des alternatives de déplacements en covoiturage multimodal qui soient cohérentes. Pour ce faire, il faut d'une part générer des propositions de déplacement multimodal, et d'autre part les classer pour ne proposer à l'utilisateur que les quelques meilleures. Au niveau de la génération des trajets multimodaux, les tests ont montré que le système était efficace et que de multiples trajets multimodaux pouvaient être créés via notre graphe. Tout d'abord, on est capable de générer plusieurs alternatives de covoiturage et ensuite, on a pu voir dans le test de mise en situation qu'on pouvait générer des classements de trajets qui n'étaient pas si éloignés des classements Google Maps. Le système pourrait être opérationnel, d'ores et déjà, pour générer quelques propositions de trajets et les valider en les envoyant à Google Maps. Cette capacité de génération de trajets multimodaux a pu être mise

en évidence notamment grâce à la décision de mélanger, dans le graphe que l'on a créé pour les tests, toutes les lignes TC du réseau montréalais indépendamment de leur horaire de leur service, afin d'avoir un réseau TC des plus complets. Néanmoins, cette prise de décision a eu un contre-coup attendu. En effet, pour ce qui est de l'autre objectif de notre système, c'est-à-dire de classer les trajets en fonction de leur pertinence, les résultats des tests menés sont malheureusement moins satisfaisants. Ceci est dû à deux aspects du graphe utilisé lors des tests. Le premier est celui résultant de la construction du graphe minimal, et non d'un graphe suivant la méthodologie de construction globale. Les temps de parcours qui sont générés par le graphe pour se rendre d'une origine O à une destination D prend en compte des lignes de TC qui en réalité ne sont pas en service à l'heure considérée. Le second dépend d'un manque de temps lors de la réalisation des tests qui nous a mené à simplifier le calcul des temps de parcours sur les liens du graphe TC. Ainsi, on a pu constater lors des tests que les temps de parcours estimés lors de l'emprunt des liens de transport en commun étaient mauvais.

Malgré ce manque de précisions sur les temps de parcours, le système réussit à générer des solutions de déplacement multimodales et à les classer relativement correctement (cf. les résultats de la mise en situation). Maintenant qu'il a été montré que le système était capable de générer de la multimodalité dans ces propositions de trajets, il serait intéressant de tester le système, non plus sur un graphe minimal, mais sur un graphe dont la construction suit correctement la méthodologie énoncée, et particulièrement au niveau des temps de parcours sur le graphe TC, en prenant en compte un vrai intervalle de temps et les seules lignes TC alors en service. De plus, cette méthodologie peut encore largement être améliorée, comme le prouve la liste de ses limites ci-après. Il faut garder à l'idée que ce système vise à créer des possibilités de jumelages multimodaux, puis à les trier et à fournir les meilleures options à un calculateur de chemin précis. Meilleure sera la méthodologie, moins la liste des meilleures options pour ce calculateur aura besoin d'être longue et donc plus le système sera rapide.

6.2 Limites

La méthodologie de génération des trajets multimodaux énoncée dans ce mémoire contient plusieurs limites. Ces limites sont séparées en deux catégories. Premièrement, il y a les limites propres au graphe multimodal. Deuxièmement, il y a aussi les limites propres à la méthodologie de jumelage de covoitureurs dans son ensemble.

6.2.1 Limites du graphe multimodal

6.2.1.1 Zonage carré uniforme

La ville est partitionnée en un ensemble de zones carrées. Ce découpage n'est certainement pas optimal au niveau de notre méthodologie puisque la précision géographique du graphe est ainsi la même partout. En effet, même dans les zones rurales dans lesquelles la demande en transport est très faible, il y a un centroïde routier tous les deux kilomètres, tout comme en centre-ville. Une solution serait donc d'adapter la taille des zones en fonction de la densité de demande en transport. Plus il y aurait de demandes de transport vers (ou depuis) une zone Z , plus cette zone Z serait petite.

De même, la forme des zones peut être retravaillée. Effectivement, les zones pourraient avoir des formes adaptées à l'utilisation du sol, au réseau routier, aux barrières physiques naturelles ou encore au réseau de transport en commun.

Toute la méthodologie se base sur ce système de zones, qui semblent être un bon compromis par rapport à un calculateur de chemin classique basé sur une origine et destination précises. Néanmoins, l'inconvénient intrinsèque à l'utilisation de zones réside dans l'impossibilité de générer des trajets à l'intérieur d'une zone. En étudiant l'échantillon des 25295 trajets de l'enquête OD, ces trajets intrazones représentent tout de même 1032 trajets. Cependant, ces déplacements ne sont probablement pas adaptés à une opération de covoiturage.

6.2.1.2 Intervalle de temps du graphe

Le graphe se doit de représenter une certaine plage horaire. Pour contrer la grande différence qu'il y a entre le réseau de transport la nuit et en pleine heure de pointe, il est préconisé d'avoir au minimum trois graphes différents (heures de pointe, intermédiaire et soir-nuit). Ce nombre peut être augmenté pour avoir un système de plus en plus précis. Néanmoins, en se basant sur un intervalle de temps, il y a toujours la possibilité d'avoir une ligne de transport en commun qui n'est en fait pas disponible, qui l'était par exemple au début de l'intervalle de temps, mais dont le service s'interrompt. De même pour le réseau routier, il est fortement probable que les conditions routières évoluent au sein d'une même plage horaire.

6.2.2 Limites de la méthodologie

6.2.2.1 Absence de certains modes de transport

Dans la méthodologie énoncée dans ce mémoire, les trajets proposés à l'utilisateur contiennent des segments en moyen de transport suivants : automobile, transport en commun, marche. Néanmoins, cette méthodologie ne considère pas le vélo comme mode de transport, par exemple. Or, le vélo peut être intégré à des systèmes de covoiturage, notamment grâce aux systèmes de vélos en libre-service. Effectivement, si un utilisateur mentionne qu'il a un abonnement à ce mode de transport, ou s'il mentionne qu'il possède un vélo, il pourrait être intéressant d'intégrer dans ses propositions de transport des segments en vélo. La méthodologie devrait donc certainement être adaptée à nouveau pour intégrer ce genre de mode de transport.

6.2.2.2 Distances à vol d'oiseau

Dans certains domaines, la méthodologie se base sur des distances à vol d'oiseau. On parle notamment de d_m , la distance de marche maximale acceptable. Cette distance calculée à vol d'oiseau est une limite. Par exemple, lorsqu'on définit un point de jonction, car il est proche d'une station de transport en commun, la notion de proximité est validée via une distance à vol d'oiseau, ce qui ne couvre pas la potentielle présence d'une voie ferrée empêchant l'accès au point de jonction. C'est ici que la possibilité de donner à l'utilisateur le droit de noter un point de jonction, ou de le signaler, prend tout son sens.

6.3 Perspectives de recherche et recommandations

La méthodologie énoncée reste une base de réflexion pour un système de génération de trajets multimodaux robuste, fiable et rapide. De nombreuses améliorations à la fois sur le graphe et même sur la méthodologie générale peuvent être menées. Des pistes d'amélioration du graphe ont été, par exemple, identifiées ci-dessous et la liste des limites précédemment énoncée peut être un point d'appui pour l'amélioration du système.

6.3.1 Pistes d'amélioration du graphe

6.3.1.1 Suppression des faux liens routiers

Une fois la création du graphe terminée, on peut remarquer que de nombreuses améliorations peuvent être entreprises et que certaines sont même nécessaires. Premièrement, on peut s'apercevoir qu'il y a des liens sur le réseau qui n'ont pas de sens physiquement et qui ne représentent aucun trajet. On pense en premier lieu aux liens reliant deux zones, séparées par un bras de fleuve, et dont aucun pont ne fait la liaison. Il y a aussi les liens allant dans des zones interdites comme les zones aéroportuaires par exemple. Tous ces liens devraient être supprimés puisqu'ils ne représentent aucune réalité et qu'ils alourdissent le graphe.

Pour les détecter, une méthode peut être réalisée, c'est de supprimer les liens dont le temps de parcours est beaucoup trop élevé. Par exemple, pour les liens traversant un fleuve, le temps de parcours sur le lien calculé correspond à des véhicules faisant un détour par le pont le plus proche et le temps de parcours est donc plus élevé que sur un lien normal. Sur la Figure 6.1, on peut voir un ensemble de liens dont le temps de parcours excède les 1000 secondes (ce qui correspondrait à une vitesse de 10 km/h). En supprimant ces liens, on allège donc le graphe sans affecter son réalisme.

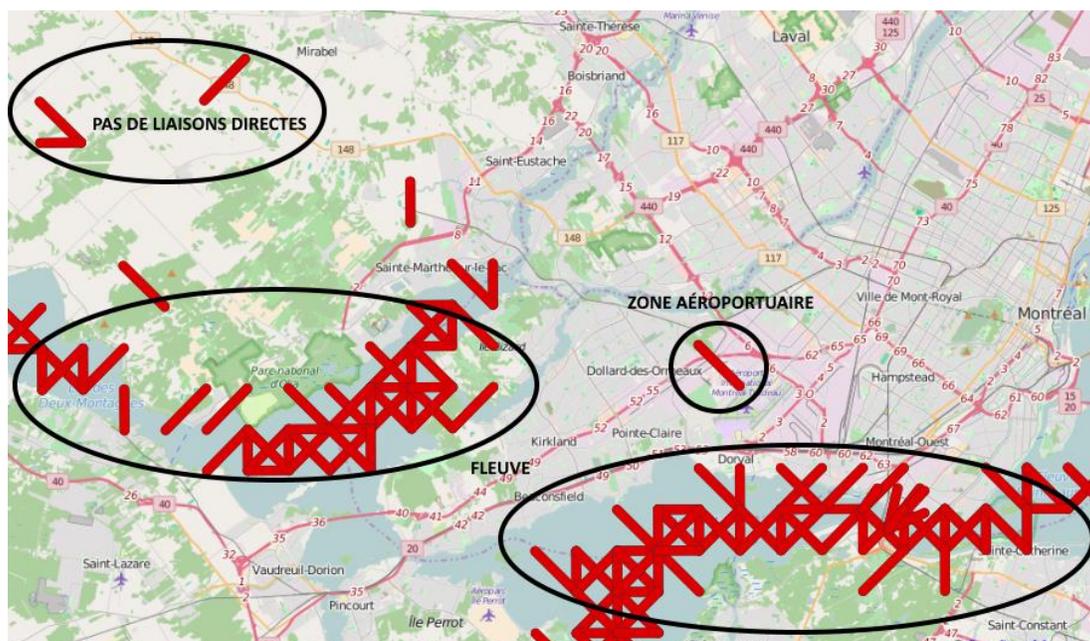


Figure 6.1: Faux liens routiers

6.3.1.2 Suppression des liens routiers artériels superflus

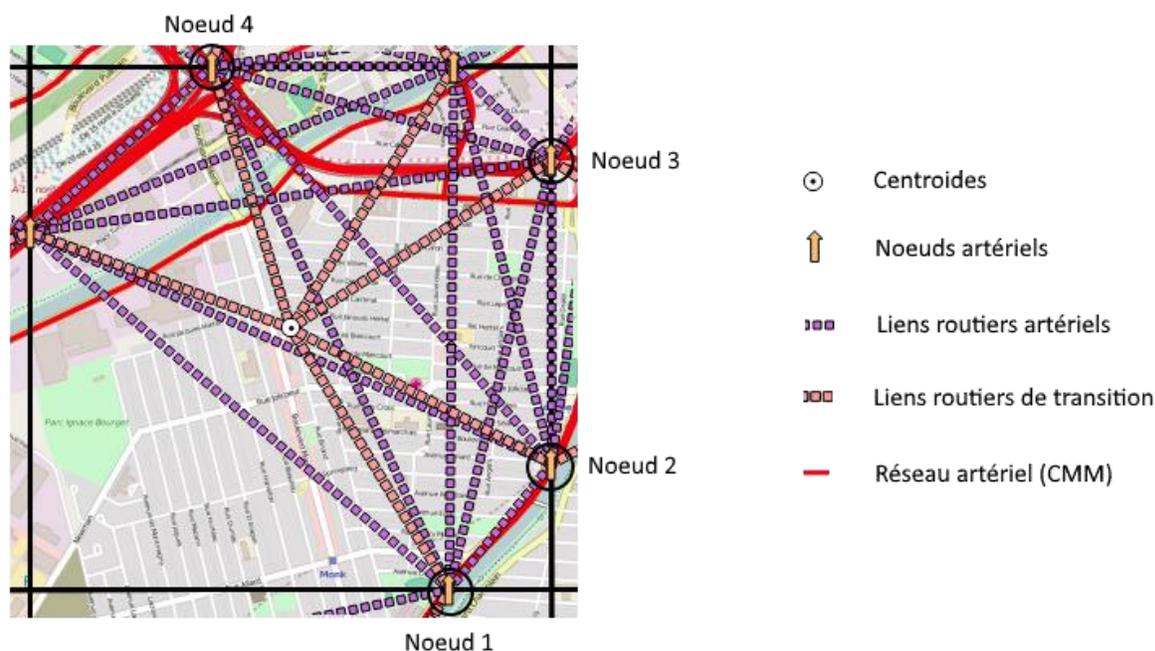


Figure 6.2: Exemples de liens superflus

Une seconde piste d'amélioration est identifiable grâce à la Figure 6.2. On y voit une zone avec un grand nombre de nœuds (et donc de liens) artériels. En effet, il s'agit d'une zone contenant un échangeur autoroutier, ce qui entraîne une grande densité de voies définies comme artérielles. La zone contient donc plus d'une dizaine de liens artériels (et les liens de base ont ici été cachés de manière à garder l'image lisible). Or, parmi ces liens, on imagine bien que certains sont de trop et sont superflus. Mentionnons, par exemple, une situation dans laquelle un utilisateur doit traverser la zone du sud au nord. Il se situe donc sur le nœud 1 et veut se rendre au nœud 4. Un lien artériel simule ce trajet, il s'agit du lien artériel existant entre ces deux nœuds.

Pour ce qui est du temps parcouru sur ce lien, il a été calculé en simulant le temps exact de trajet entre ces deux points et, comme on le devine, le meilleur itinéraire pour aller du nœud 1 au nœud 4 est d'emprunter l'autoroute en passant par le nœud 2, puis le nœud 3 et enfin arriver au nœud 4. Théoriquement, le temps de parcours sur le lien artériel nœud 1-nœud 4 est donc équivalent à l'addition des temps de parcours sur les liens nœud 1 – nœud 2, nœud 2 – nœud 3 et nœud 3 – nœud 4. Le lien artériel nœud 1 – nœud 4 est donc un lien superflu puisqu'en arrivant sur le nœud

1 pour se rendre au nœud 4, l'algorithme de calcul du plus court chemin peut emprunter indépendamment les deux alternatives citées dessus. Pour alléger le graphe, il serait donc intéressant de supprimer les liens d'une des deux alternatives. Or, l'alternative passant par les 4 nœuds contient des liens qui sont utiles dans d'autres circonstances. On peut par exemple penser au lien nœud 3 – nœud 4 pour aller de l'est au nord. La solution d'optimisation du graphe est donc dans ce cas-là dans la suppression du lien artériel entre le nœud 1 et le nœud 4.

Pour généraliser cette manipulation d'optimisation du graphe, il faut supprimer tous les liens qui ont une alternative aussi rapide par d'autres liens que le lien lui-même. Posons donc la règle suivante : soit un lien reliant un nœud A à un nœud B et t_{AB} , le temps de parcours sur ce lien, si on supprime ce lien et qu'alors le calcul de chemin le plus court entre A et B donne un temps de parcours égal à $t_{AB} + \varepsilon$, alors ce lien est superflu et peut être supprimé. En introduisant ε , on intègre le fait qu'un lien artériel n'a pas d'intérêt à exister s'il ne fait qu'économiser une durée ε à un trajet. En fixant $\varepsilon = 15s$ par exemple, on supprime tous les liens qui ont une alternative en passant par d'autres liens d'une durée à peine plus élevée (de moins de 15s en l'occurrence). Le fait d'introduire cet ε permet de réduire le graphe si nécessaire. En effet, pour avoir un graphe complet, on peut prendre ε nul. Néanmoins, s'il y a un besoin de réduction du graphe, l'augmentation peut la permettre.

6.3.1.3 Suppression de tous les liens non parcourus

Alors que précédemment a été mentionnée la possible suppression des liens routiers artériels superflus, on pourrait penser à supprimer du graphe les liens qui ne sont jamais utilisés. Effectivement, il se peut que des liens soient aberrants, du point de vue de la méthodologie ou du point de vue du réseau de transport en lui-même, et qu'ils ne soient donc jamais utilisés. La présence de ces liens ne fait, dans ce cas, qu'alourdir le graphe. Après qu'un très grand nombre de trajets aient été générés par le graphe et que les liens aient pu être qualifiés de non parcourus, il serait certainement judicieux de les supprimer du graphe. Pour commencer à éprouver le graphe sans avoir besoin d'attendre de vrais utilisateurs, il est intéressant de générer des trajets via des données de trajets déjà disponibles, notamment les déplacements de l'enquête OD à Montréal.

6.3.2 Pistes d'amélioration de la méthodologie

Bien qu'il semble pertinent de d'abord mettre l'effort sur l'amélioration des trajets multimodaux générés et l'estimation de leur temps de parcours, des améliorations de la méthodologie générales sont ici brièvement énoncées.

6.3.2.1 Intégration de nouveaux modes de transport

Afin de populariser l'utilisation du covoiturage, les trajets de covoiturage proposés par les grands acteurs du milieu se doivent d'être toujours plus attractifs. Ils ne doivent pas engendrer de temps de parcours supplémentaires et dans l'idéal, ils devraient permettre de se déplacer plus rapidement. Il faudrait par exemple que s'il y a de la congestion, le système soit capable de proposer de prendre le vélo en libre-service pour contourner les artères congestionnées et prendre un covoiturage plus loin. Pour arriver à un tel état, les systèmes de covoiturage se doivent d'intégrer un maximum de modes de transport afin de toujours trouver l'alternative de déplacement la plus rapide. On pourrait dans notre cas penser à intégrer les systèmes de vélos en libre-service ou encore de voiture en libre-service. C'est par la complétion, et donc l'efficacité des systèmes de covoiturage que passera leur viabilité. Les usagers se tourneront vers les systèmes de covoiturations seulement si ceux-ci sont plus rapides, ou du moins tout aussi rapides, que les autres moyens de déplacement.

6.3.2.2 Prise en compte des trajets déjà effectués

Plus tôt, il a été mentionné l'idée de prendre en compte le retour des utilisateurs sur la qualité des points de jonction, mais il est intéressant de considérer les retours des utilisateurs sur d'autres aspects du système. On pourrait penser à étudier les trajets déjà effectués, dans l'optique d'améliorer le graphe et ses prédictions de temps de parcours. De même, on pourrait proposer à un utilisateur A, qui a déjà fait un covoiturage avec un utilisateur B, de refaire d'autres covoiturations avec ce dernier s'ils font des demandes de déplacement similaires.

6.3.3 Tests supplémentaires

Dans le but d'améliorer le système global, il serait intéressant de mener d'autres tests pour analyser les points faibles du système. Un exemple de test pouvant être réalisé serait de regarder, dans le cadre du test de mise en situation, la position du meneur Google Maps dans le classement généré par notre graphe. Effectivement, de cette manière, on pourrait avoir un ordre de grandeur

de combien de jumelages doivent être finement analysés par un calculateur de chemin classique avant que ces jumelages ne soient proposés à l'utilisateur, afin de ne pas rater le meilleur jumelage.

BIBLIOGRAPHIE

- Agatz, N., Erera, A., Savelsbergh, M., & Wang, X. (2012). Optimization for dynamic ride-sharing: A review. *European Journal of Operational Research*, 223(2), 295-303. doi: 10.1016/j.ejor.2012.05.028
- Aissat, K., & Oulamara, A. (2014, 9-12 Dec. 2014). *Dynamic ridesharing with intermediate locations*. Paper presented at the Computational Intelligence in Vehicles and Transportation Systems (CIVTS), 2014 IEEE Symposium on, Orlando, Florida.
- Baldacci, R., Maniezzo, V., & Mingozzi, A. (2004). An Exact Method for the Car Pooling Problem Based on Lagrangean Column Generation. *Operations Research*, 52(3), 422-439. doi: doi:10.1287/opre.1030.0106
- Battista, M. G., Lucertini, M., & Simeone, B. (1996). *Path Composition and Multiple Choice in a Bimodal Transportation Network. Volume 2: Modelling Transport Systems*. Paper presented at the World Transport Research. Proceedings of the 7th World Conference on Transport Research.
- Bielli, M., Boulmakoul, A., & Mouncif, H. (2006). Object modeling and path computation for multimodal travel systems. *European Journal of Operational Research*, 175(3), 1705-1730. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2005.02.036>
- Caulfield, B. (2009). Estimating the environmental benefits of ride-sharing: A case study of Dublin. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(7), 527-531. doi: 10.1016/j.trd.2009.07.008
- Cordeau, J.-F., & Laporte, G. (2007). The dial-a-ride problem: models and algorithms. *Annals of Operations Research*, 153(1), 29-46. doi: 10.1007/s10479-007-0170-8
- Developpers, G. (2016, July 26, 2016). GTFS Static Overview. Retrieved 06/06/2016, 2016, from <https://developers.google.com/transit/gtfs/>
- Drews, F., & Luxen, D. (2013). *Multi-hop ride sharing*. Paper presented at the Sixth Annual Symposium on Combinatorial Search.
- Fellows, N. T., & Pitfield, D. E. (2000). An economic and operational evaluation of urban car-sharing. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 5(1), 1-10. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S1361-9209\(99\)00016-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1361-9209(99)00016-4)
- Gagnon, M. (2016). *Algorithme de jumelage multimodal pour le covoiturage*. (Diplome de maitrise en sciences appliquées), Polytechnique Montréal.
- Gibory, E. (2015, 21 Décembre). Covoiturage : des effets positifs sur les courtes distances, *Le Parisien*.
- Graham, M. (2016, January 16). Ridesharing, apps could fill remaining gaps in Chicago transit, *Chicago Tribune*.
- Haklay. (2010). Completeness in volunteered geographical information – the evolution of OpenStreetMap coverage (2008-2009). from

<https://povesham.wordpress.com/2010/08/13/completeness-in-volunteered-geographical-information-%E2%80%93-the-evolution-of-openstreetmap-coverage-2008-2009/>

- Haklay, M. (2010). How good is volunteered geographical information? A comparative study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets. *Environment and planning B: Planning and design*, 37(4), 682-703.
- Herbawi, W., & Weber, M. (2011). Evolutionary multiobjective route planning in dynamic multi-hop ridesharing *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization* (pp. 84-95): Springer.
- Hochmair, H. H. (2008). Grouping of optimized pedestrian routes for multi-modal route planning: A comparison of two cities *The european information society* (pp. 339-358): Springer.
- Hrnčíř, J., Rovatsos, M., & Jakob, M. (2015). Ridesharing on Timetabled Transport Services: A Multiagent Planning Approach. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 19(1), 89-105. doi: 10.1080/15472450.2014.941759
- Jacqué, P. (2016, 16 janvier). Les conséquences brutales du covoiturage et de l'autopartage sur la filière automobile, *Le Monde*.
- Kleiner, A., Nebel, B., & Ziparo, V. (2011). A mechanism for dynamic ride sharing based on parallel auctions.
- Larrañaga, P., Kuijpers, C. M. H., Murga, R. H., Inza, I., & Dizdarevic, S. (1999). Genetic algorithms for the travelling salesman problem: A review of representations and operators. *Artificial Intelligence Review*, 13(2), 129-170.
- Li, J.-Q., Zhou, K., Zhang, L., & Zhang, W.-B. (2012). A Multimodal Trip Planning System With Real-Time Traffic and Transit Information. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 16(2), 60-69. doi: 10.1080/15472450.2012.671708
- Lozano, A., & Storchi, G. (2001). Shortest viable path algorithm in multimodal networks. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 35(3), 225-241. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0965-8564\(99\)00056-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0965-8564(99)00056-7)
- Marković, N., Nair, R., Schonfeld, P., Miller-Hooks, E., & Mohebbi, M. (2015). Optimizing dial-a-ride services in Maryland: Benefits of computerized routing and scheduling. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 55, 156-165. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2015.01.011>
- Marler, R. T., & Arora, J. S. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(6), 369-395. doi: 10.1007/s00158-003-0368-6
- Martin-Fernandez, F., Caballero-Gil, P., Caballero-Gil, C., & Molina-Gil, J. (2014). *Increasing privacy and trust in cooperative social platforms for vehicular applications*. Paper presented at the 11th International Workshop on Security in Information Systems, WOSIS 2014 - In Conjunction with the 16th International Conference on Enterprise Information Systems, ICEIS 2014, April 1, 2014 - April 1, 2014, Lisbon, Portugal.
- McCormack, J. E., & Roberts, S. A. (1996). Exploiting object oriented methods for multi-modal trip planning systems. *Information and Software Technology*, 38(6), 409-417. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0950-5849\(95\)01078-5](http://dx.doi.org/10.1016/0950-5849(95)01078-5)

- Nancy-Metz, A. (2012). Mesures et incertitudes.
- Neis, P., & Zielstra, D. (2014). Recent developments and future trends in volunteered geographic information research: The case of OpenStreetMap. *Future Internet*, 6(1), 76-106.
- Pentico, D. W. (2007). Assignment problems: A golden anniversary survey. *European Journal of Operational Research*, 176(2), 774-793.
- Roughgarden, T. (2005). *Selfish routing and the price of anarchy* (Vol. 174): MIT press Cambridge.
- Sterling, G. (2014). Founder: OpenStreetMap Already As Good Or Better Than Google Maps, *Search Engine Land*. Retrieved from <http://searchengineland.com/founder-openstreetmap-good-better-google-maps-already-192089>
- Su, J.-m., & Chang, C.-h. (2010). The multimodal trip planning system of intercity transportation in Taiwan. *Expert Systems with Applications*, 37(10), 6850-6861. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2010.03.037>
- Templier, S. (2015, 10 février). Covoiturage quotidien: un simple regain d'intérêt?, *La Presse*.
- villedurable.org. (2012, 23/10/2012). Le covoiturage dynamique: où en est-on? Retrieved 25/10/2015, from <http://liv.ac.uk.libanswers.com/faq/49511>
- Yang, F., Yao, Z., Cheng, Y., Ran, B., & Yang, D. (2016). Multimode trip information detection using personal trajectory data. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 1-12. doi: 10.1080/15472450.2016.1151791
- Zhang, L., Li, J.-Q., Zhou, K., Gupta, S., Li, M., Zhang, W.-B., . . . Misener, J. (2011). Traveler Information Tool with Integrated Real-Time Transit Information and Multimodal Trip Planning. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2215, 1-10. doi: doi:10.3141/2215-01
- Zielstra, D., & Zipf, A. (2010). *A comparative study of proprietary geodata and volunteered geographic information for Germany*. Paper presented at the 13th AGILE international conference on geographic information science.
- Zipkin, A. (2015, NOV. 5, 2015). Ride-Sharing Apps Bring Back Car-Pooling, *The New York Times*.

ANNEXE A – PREMIÈRE PISTE ÉTUDIÉ : ASSOCIATION DE PATTERNS DE ZONES

Durant les premiers mois de ce projet de recherche, une tout autre approche, se montrant par la suite peu convaincante, avait été envisagée et est décrite ici.

I. Description générale de la méthode envisagée

Lorsqu'un utilisateur passager fait une demande de déplacement t , ayant pour origine O et pour destination D , on va essayer de trouver les conducteurs en attente qui ont un trajet relativement semblable. Une fois ces conducteurs sélectionnés, leur jumelage avec le passager est analysé plus en détail afin de sélectionner les meilleurs et de les proposer aux utilisateurs concernés. Le premier tri, qui sélectionne, parmi l'ensemble des conducteurs en attente, ceux dont le trajet est relativement semblable au passager, s'appelle le tri grossier. Ensuite, le second tri, qui, parmi les conducteurs restants, analyse plus précisément l'action de covoiturage et classe les jumelages en ordre croissant est appelé tri fin.

II. Mise en place d'un tri grossier

a. Fonction du tri grossier

Pour proposer à l'utilisateur, voulant faire un trajet t_0 , une opération de covoiturage judicieuse, il est nécessaire d'étudier tous les scénarios de covoiturage possibles avec tous les autres trajets proposés par les utilisateurs en attente. L'étude de tous ces scénarios étant très vorace en temps de calcul et le traitement d'un grand nombre de demandes en simultanée étant impératif, il est indispensable de réduire la taille de l'échantillon des trajets avec lesquels les scénarios de covoiturage doivent être étudiés. Ainsi, une étape, que l'on va appeler « tri grossier », doit être ajoutée en amont pour permettre de réduire la taille de cet échantillon en éliminant tous les trajets étant, à coup sûr, trop différents du trajet t_0 pour pouvoir réaliser une action de covoiturage avec ce dernier. Ce tri doit donc consister en des opérations très simples, rapides, qui seront exécutées sur l'intégralité des trajets en attente. Cette étape précède un tri plus fin, qui lui, est plus lourd en temps de calcul, et qui est donc préférablement administré sur cet échantillon plus réduit de trajets.

b. Contraintes fonctionnelles du tri grossier

Si on réalise un bilan des contraintes auxquelles doit répondre le tri grossier à mettre en place, on peut obtenir la liste suivante :

- Rapide : il faut que le tri ne contienne que des tests très rapides et simples afin que le temps de calcul soit le plus réduit possible puisque l'échantillon à trier est grand,
- Calibrable : il faut que le tri puisse se calibrer facilement. Un calibrage est nécessaire afin que la taille de l'échantillon qui en ressorte soit assez grande pour conserver les matchs qui se trouveront être les plus judicieux après le tri fin, tout en étant assez petite pour que le tri fin, plus lourd en temps de calcul, ne prenne pas trop de temps.
- Adaptatif : lors de l'installation du système dans une nouvelle ville, ou lors de la modification de l'environnement dans lequel va évoluer le système, il faut que le tri grossier soit efficace sans avoir à modifier son fonctionnement.

c. Notion de statisme du tri grossier

Le tri grossier, que l'on veut mettre en place, sélectionne des trajets en les comparant à un trajet t , afin de mettre en avant leur ressemblance et donc leur intérêt à réaliser une opération de covoiturage. Or, il semble évident que, comme une ville a une taille finie, le nombre de déplacements possibles en son sein est lui aussi un nombre fini. Il est donc possible de dénombrer et de lister l'intégralité des déplacements dans une ville.

Bien entendu, ce nombre est fini, mais sa taille dépend de la résolution que l'on choisit pour la définition des origines de départ et d'arrivée. Si on estime une résolution de 100 mètres, alors deux déplacements dont l'origine et la destination sont distantes de 10 mètres seront considérés comme un seul et même déplacement.

Sachant que le nombre de déplacements dans une ville est fini, nous pouvons introduire la notion de statisme. Effectivement, tous ces déplacements peuvent être répertoriés et listés. On peut donc, préalablement, tous les sélectionner et les comparer entre eux. Cette comparaison entre tous les déplacements d'une même ville est une étape très lourde en calcul, néanmoins, elle n'a besoin d'être réalisée qu'une seule fois. La notion de statisme réside dans ce dernier aspect. Lors du tri grossier, aucun test ou calcul n'aura à être effectué. En effet, il suffira d'aller chercher le nécessaire

dans les résultats de l'étude de comparaison menée une seule fois, en amont. Cette notion de statisme s'oppose à la notion de dynamisme qui voudrait que tous les calculs nécessaires soient faits en temps réel, en réponse à chaque demande d'un utilisateur.

d. Description du tri grossier

Dans cette partie, je vais décrire le tri grossier proposé qui répond aux contraintes présentées ci-dessus.

d.1 Création de la matrice des patterns

Tout d'abord, en arrivant dans une nouvelle ville ou après modification de l'environnement d'étude, il faut quadriller la ville en différentes zones. La taille de ces zones carrées correspond à la résolution, notion définie plus haut. En effet, pour ce tri grossier, tous les déplacements dont les origines sont dans une même zone seront considérés comme ayant la même origine.

Une fois les zones créées, l'idée est de savoir toutes les suites de zones qui doivent être empruntées pour aller d'une zone Ω_i vers une zone Δ_i . Admettons que l'on soit quelque part dans la zone Ω_0 et que nous voulons nous rendre à un point de la zone Δ_0 , il existe alors un chemin le plus court pour aller de notre origine à notre destination. Ce chemin coupe un ensemble de zones, ensemble que l'on appellera un pattern. Un pattern est donc la suite ordonnée de zones traversées par le chemin le plus court pour se rendre d'un point d'une zone Ω_i à un autre point d'une zone Δ_i . Sachant qu'une zone est vaste et qu'elle peut contenir plusieurs origines et plusieurs destinations dans tout son territoire, il existe plusieurs patterns entre deux mêmes zones. En fonction de si l'origine est au nord ou au sud d'une zone par exemple, le chemin pour aller jusqu'à la destination traversera possiblement des zones différentes. Ainsi, si on se trouve toujours dans la zone Ω_0 , mais à un autre endroit, le chemin le plus court sera possiblement différent, et donc le pattern aussi, probablement. D'une zone Ω_i à une zone Δ_i , il existe donc un nombre l_i de patterns.

Finalement, on peut obtenir la matrice des patterns. Il s'agit d'un tableau dont l'entrée des colonnes est la zone d'origine Ω_i et l'entrée des lignes est la zone de destination Δ_i . Les valeurs correspondent alors à la liste des l_i patterns qui existe entre Ω_i et Δ_i . Cette matrice a finalement besoin de n'être calculée qu'une seule fois. Peut-être devra-t-elle être recalculée lors de changements importants sur le réseau, mais, dans tous les cas, ce calcul ne fait pas parti du travail dynamique réalisé par le système en réponse aux utilisateurs. Il peut être fait sur d'autres machines

que celles utilisées pour le calcul dynamique et n'altère donc pas la vitesse de calcul et la réactivité du système.

d.2 Création de la matrice des scores d'affinités

L'intérêt du relevé de ces patterns est le suivant. Lorsqu'un utilisateur formule un souhait de déplacement t_0 , on regarde sa zone origine Ω_0 et sa zone destination Δ_0 . En allant chercher dans la matrice des patterns à l'endroit correspondant, on peut extraire la liste des l_0 patterns de cet utilisateur. D'un autre côté, pour chaque trajet conducteur $t_i \in T_C$, l'ensemble des trajets conducteurs, il existe l_i patterns entre sa zone origine Ω_i et sa zone destination Δ_i . Alors, pour tout $t_i \in T_C$, on va relever les l_i patterns et on va chercher dans cette matrice des scores d'affinité, l'affinité entre chacun des l_0 patterns et chacun des l_i patterns.

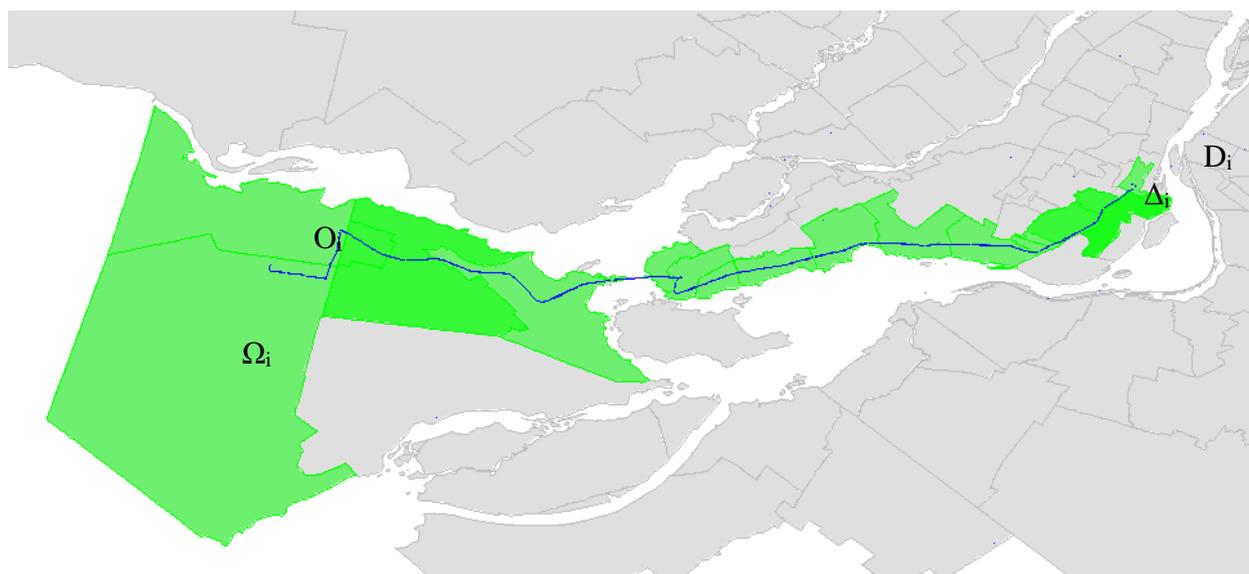


Figure A.1 Exemple de trajet avec pattern associé

Ce que l'on appelle affinité correspond à un score attribué à un couple de patterns en fonction de l'intérêt qu'il y a à faire covoiturer deux utilisateurs empruntant ces patterns. Ce travail sur le calcul de l'affinité a été mené par Mathieu Gagnon et est sommairement présenté dans la partie suivante.

d.3 Mise en place d'une méthode de calcul de score

Pour un premier essai, une méthode de calcul de score très simple a d'abord été proposée. Elle consistait à regarder, entre les deux patterns considérés, les suites de zones communes. Si les deux patterns ont une zone en commun, le score d'affinité augmente de 1. Si de plus les deux

ANNEXE B – EMPRISE TOTALE DU GRAPHE

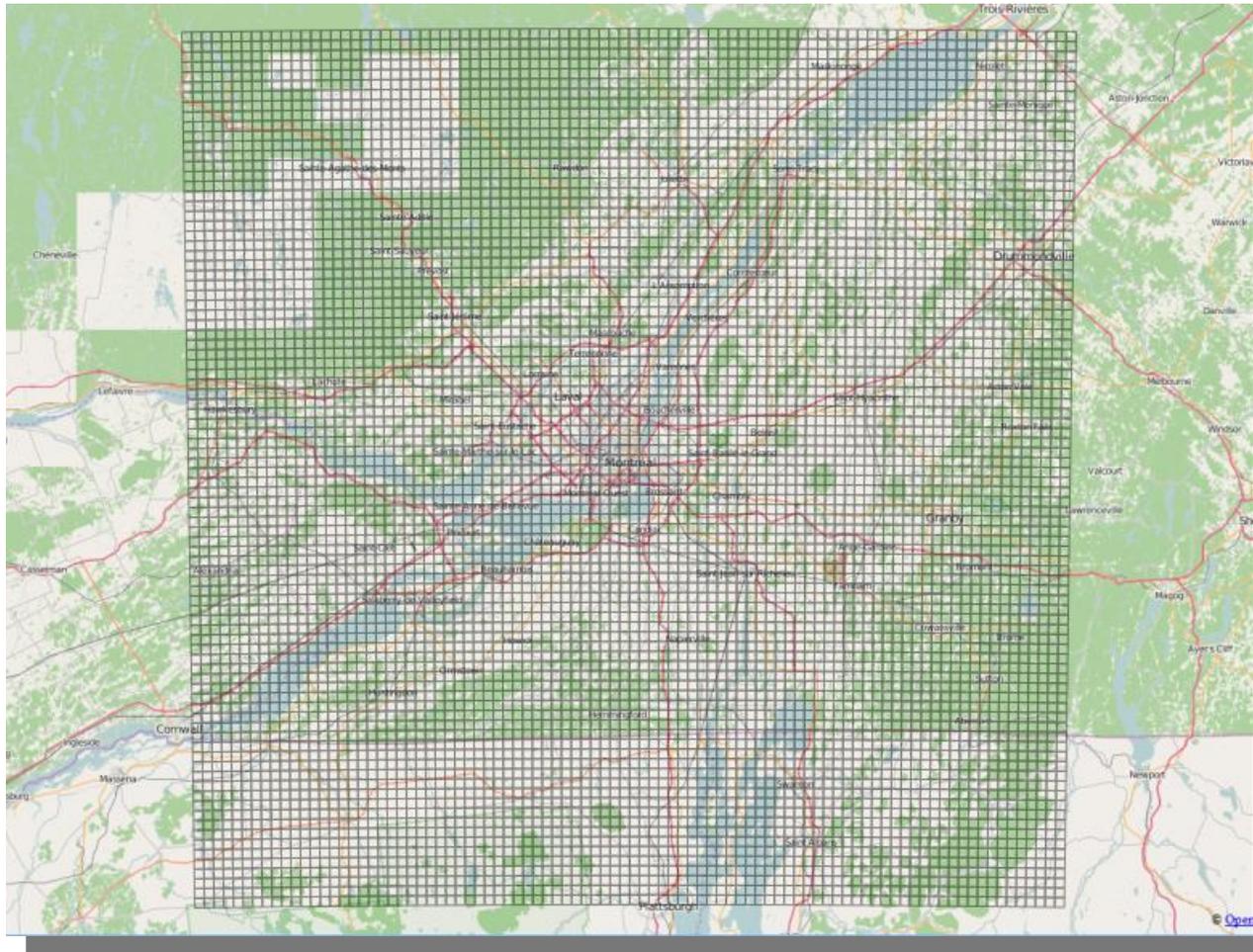


Figure B.1 Emprise totale du quadrillage de Montréal

L'emprise totale du graphe sur Montréal est ici représentée. Il s'agit d'un carré de 250 kms de côtés.

ANNEXE C – UTILISATION D’API OVERPASS

The screenshot displays the Overpass Turbo web interface. On the left, a text editor contains an OSM query (labeled '1.') that filters for various amenities like hospitals, supermarkets, motels, colleges, and fuel stations, and also includes a 'goodParking' function. The main area shows a map of Montreal (labeled '2.') with blue circular markers indicating the locations of the queried amenities. At the top right, a toolbar (labeled '3.') includes buttons for 'Exécuter', 'Partager', 'Exporter', 'Assistant', 'Enregistrer', 'Charger', 'Paramètres', and 'Aide', along with a search bar and a 'Flattr this!' button. The map interface also includes a 'Carte' and 'Données' tab, a scale bar, and status information at the bottom.

Figure C.1 Aperçu de l’API Overpass

L’interface de l’API Overpass est présentée ci-dessus.

Dans la section 1, il est possible de formuler une requête afin de choisir le type de données que l’on veut récupérer sur OSM.

Dans la section 2, une carte géographiquement répartit les données récupérées.

Dans la section 3, une barre d’outils permet notamment d’exporter les données sous le format souhaité.

ANNEXE D – EXTRAIT DU WIKI OSM

| Key | Default | Value | Element | Comment |
|---|---------|---|---|--|
| amenity | N/A | parking |   | Tag either an area or a central node, but <i>not</i> both. |
| All sub-tags below are optional. | | | | |
| name | None | * |   | The name of the car park. |
| ref | None | * |   | |
| access | N/A | yes; customers; permissive; private |   | Distinction between public parking lots, customers parking lots (such as at cinemas, etc.), and private parking lots (such as for staff in a business park). In this case, yes denotes a public parking lot. |
| highway | N/A | service |  | Road inside parking lot. Add tag service=parking_aisle . |
| parking | None | surface |   | One level of parking on the ground. |
| | | multi-storey | | Two or more levels of parking decks in a building structure. |
| | | underground | | Underground parking. |
| | | rooftop | | One level of a parking deck on top of the building. |
| | | sheds | | Private hangars for vehicles, located close to owner's home. Usually constructed of profiled metal. |
| | | carports | | Structure used to offer limited protection to vehicles, primarily cars, from the elements (Carports on Wikipedia). |
| | | garage_boxes | | One level buildings with individual boxes for one car, each, usually made of brick and metal. Usually, this area belong to garage cooperative with own name, chairman, budget, rules, security, etc. |
| park_ride | None | yes; no; bus; train; tram; metro; ferry |   | Park and ride . Values of the key define connected means of transport. If unsure, use <i>yes</i> . (see Proposal) |
| fee | no | yes; no; <i>interval</i> |   | Whether you have to pay a parking fee or not. If the fee must be paid only on certain hours, the same syntax can be used as for opening hours . (See the discussion page .) |
| supervised | no | yes; no; <i>interval</i> |   | Whether the cars are guarded to prevent car theft and vandalism. If a guard is only present on certain hours, the same syntax can be used as for opening hours . |

Figure D.1 Aperçu du Wiki OSM

On peut voir ici un extrait du wiki OSM qui définit des normes pour l'utilisation des tags, dans la définition des stationnements en l'occurrence. Pour chaque clé, on doit définir une valeur parmi celles qui sont listées dans ce wiki. Des commentaires permettent d'épauler les cartographes dans la définition des différents tags.

ANNEXE E – EXEMPLES DE TRAJETS MULTIMODAUX GÉNÉRÉS

Dans la suite, plusieurs exemples de trajets multimodaux générés via le graphe sont illustrés. Une coloration des différents liens empruntés a été mise en place. En bleu, on peut observer les liens routiers, en orange les liens de transition et en vert les liens de transport en commun.

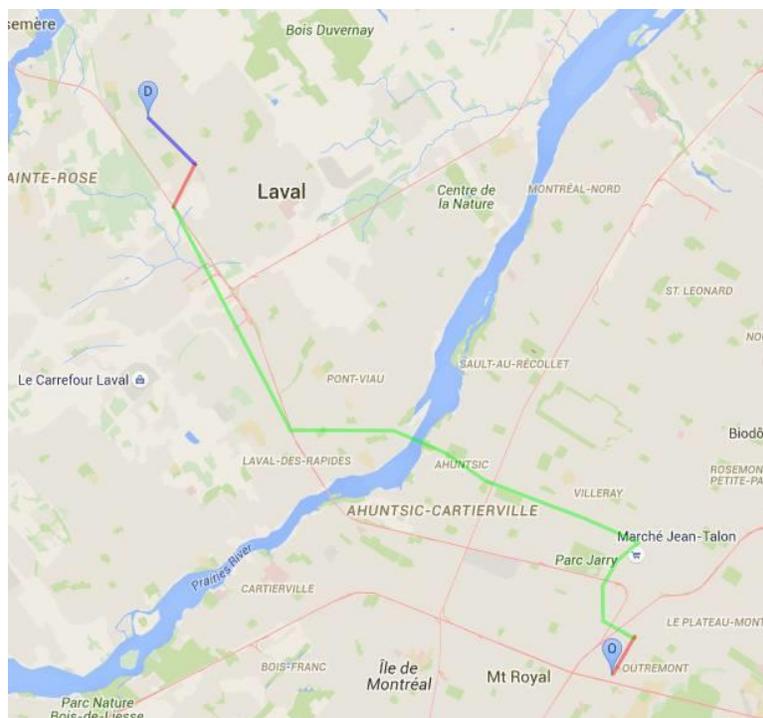


Figure E.1 Exemple 1 de trajet multimodal



Figure E.2 Exemple 2 de trajet multimodal