POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Outil d'aide au diagnostic et à la conception des réseaux de transport en commun

YANN JEUDY

Département des génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise ès sciences appliquées

Génie civil

juillet 2019

© Yann Jeudy, 2019.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé:

Outil d'aide au diagnostic et à la conception des réseaux de transport en commun

présenté par **Yann JEUDY**

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

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

Francesco CIARI, président

Catherine MORENCY, membre et directrice de recherche

Kinan BAHBOUH, membre externe

DÉDICACE

À mes parents qui m'ont comblé d'amour

et m'ont permis d'être l'homme que je suis.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements les plus sincères à ma directrice de recherche, Mme Catherine Morency (département des génies civil, géologique et des mines de Polytechnique de Montréal), pour sa guidance et son soutien tout au long de mon projet de recherche.

Un merci tout spécial à Kinan Bahbouh qui a pris le temps de me rencontrer à plusieurs reprises pour m'expliquer son outil (Traclus_DL). De plus, il a su me guider en me donnant de nombreux conseils afin d'effectuer un bon projet de recherche.

Un gros merci revient à ma famille plus spécifiquement mes deux parents qui m'ont toujours poussé dès mon plus jeune âge. Durant ces 10 dernières années, ils ont effectué de nombreux sacrifices pour permettre à ma sœur et moi d'avancer. Dès mon départ d'Haïti en 2010 après le tremblement de terre, ils ont toujours été là pour m'encourager et m'offrir un environnement de vie et de travail sans nul pareil. Je les aime énormément et je leur dois ce que je suis actuellement.

Un très grand merci à ma copine, Mlle Catherine Landry, qui a toujours été là pour m'aider et me pousser durant mes dernières années de baccalauréat et tout au long de ma maitrise recherche.

Je salue par la même occasion tous les associés de recherche de la chaire de Mobilité ainsi que mes collègues étudiants qui m'ont aidé durant mon parcours. Un merci spécial à M. Gabriel Lefebvre-Ropars qui a su répondre à mes nombreuses questions sans jamais se lasser.

RÉSUMÉ

Le transport au Québec est responsable en grande partie des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Une meilleure planification des services de transport en commun et actifs pourrait permettre la diminution de ceux-ci en favorisant un transfert modal au détriment de l'automobile. Cependant, la première étape consiste à effectuer un diagnostic de la situation et comprendre où se situent les lacunes du système.

Dans la littérature, il existe de nombreuses méthodes telles des enquêtes ou des études d'indicateurs directs de service ou encore des études spatiales pour effectuer un bilan des services fournis. Un outil prometteur pour comprendre la structure spatio-temporelle de l'offre et de la demande de transport est Traclus_DL, « Trajectory Clustering for Desired lines » qui s'appuie sur le concept de corridors.

Le but principal de ce projet de recherche est la mise en place d'un outil qui aide à évaluer la qualité de la configuration spatio-temporelle des services de transport public. Pour y arriver, ce mémoire se concentre sur la bonification de Traclus_DL et de la mise en place d'un outil de lissage automatisé, Grille_CR. Ce mémoire est divisé en trois grandes parties.

Tout d'abord, une revue de littérature est effectuée sur le sujet de l'optimisation des réseaux de transport en commun afin de mieux comprendre l'importance d'avoir un diagnostic préétabli de la situation actuelle du service offert. Par la suite, cette revue explore en détail les différentes méthodes de diagnostic existantes pour déterminer leurs avantages et désavantages. Pour faire suite à cela, elle se concentre sur le concept de corridors ainsi que sur l'outil Traclus_DL, qui est un algorithme de regroupement spatial. Enfin, le concept de carroyage est exploré. Ce concept permet de mettre en place l'outil de lissage automatisé, Grille_CR, qui facilite la visualisation et l'interprétation des résultats de Traclus-DL.

La deuxième partie de ce mémoire présente tout d'abord un guide d'utilisation de Traclus_DL. Il facilite le choix de paramètres adéquats. En parallèle, l'ensemble des améliorations apportées à cet outil sont mises de l'avant. Par la suite, l'outil de lissage est présenté. Celui-ci couvre une des grandes lacunes de Traclus_DL qui est la visualisation difficile des résultats obtenus. Pour terminer, les indicateurs pour caractériser le service offert ainsi que le processus de caractérisation des grilles produites sont expliqués en détail.

La troisième partie de ce mémoire présente deux études de cas pour permettre de comprendre l'utilisation possible de ces deux outils. La première étude se concentre sur les déplacements effectués à vélo et sur le potentiel d'un changement modal vers le vélo pour deux établissements scolaires (Université de Montréal et Brébeuf). La deuxième étude de cas analyse les lignes de bus desservant la station de métro Honoré Beaugrand et tente de comprendre le comportement des utilisateurs qui se trouvent aux alentours de ces lignes, mais qui optent pour l'automobile.

ABSTRACT

In the Quebec Province, Transportation is largely responsible for the emissions of greenhouse gas emissions into the atmosphere. Better planning of public transit and active transportation services could help reduce those emissions by promoting a modal shift to the detriment of the automobile.

The first step is to diagnose alternative transportation options and identify the gaps in transit supply. In the literature, there are many methods such as surveys or studies of direct service indicators or spatial analysis to perform a diagnostic of the services provided. One of the most promising tools to understand the spatial-temporal structure of travel supply and demand is Traclus_DL, Trajectory Clustering for Desired Lines, which relies the concept of corridors.

The main goal of this research project is to put in place a tool to assess the quality of the spatio-temporal configuration of public transit systems. To get there, this thesis concentrates on the improvement of Traclus_DL and on the development of an automated smoothing tool, Grille_CR. This thesis is divided into three main parts.

First, a literature review is conducted on the topic of transit network optimization to better understand the importance of having a pre-established diagnosis of the current state of the service provided. Subsequently, we explore in detail different diagnostic methods available in the literature. As a follow-up to this, we focus on the concept of corridors as well as on the Traclus_DL tool, which is a spatial clustering algorithm. Finally, the concept of grid is explored. This concept makes it possible to set up a tool for automated smoothing, Grille_CR, which facilitates the visualization and the interpretation of the results of Traclus-DL.

The second part of this thesis presents a user guide of Traclus_DL. It facilitates the choice of suitable parameters. In parallel, all the improvements made to this tool are put forward. Subsequently, the smoothing tool is presented. This tool enhances the Traclus_DL by providing visualization functions of the obtained results. Finally, the indicators to characterize the available services as well as the characterization process of the grids created are explained in detail.

The third part of this thesis presents two case studies to help better understand the possible use of this combination of tools. The first study focuses on cycling trips on the island of Montreal and the potential for modal shift to cycling for two specific schools (University of Montreal and Brébeuf).

The second case study analyzes the bus lines serving the Honoré Beaugrand metro station and tries to understand the behavior of the users whose trip's origin are around those lines, but who prefer to use the car.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE III

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ V

ABSTRACT VII

TABLE DES MATIÈRES IX

LISTE DES TABLEAUX XII

LISTE DES FIGURES XIII

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XIX

LISTE DES ANNEXES XX

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1.1 Mise en contexte 1

1.2 Objectif et plan du mémoire 4

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE 6

2.1 Mise en contexte 6

2.1.1 Objectif de conception 7

2.1.2 Paramètres de conception 8

2.1.3 Méthode d'optimisation 9

2.1.4 Résumé 10

2.2 Indicateur de performance 12

2.2.1 Perception de la performance 12

2.2.2 Type d'indicateurs 15

2.3 Outil de diagnostic 18

2.4 Corridors 21

2.5 Traclus_DL 26

2.6 Concept de carroyage 28

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE 33

3.1 Mise en contexte 33

3.2 Mode de fonctionnement général de Traclus_DL 36

3.3 Comment choisir les paramètres de Traclus_DL? 45

3.4 Méthode de lissage (Grille_CR) 63

3.4.1 Pourquoi créer un outil de lissage ? 63

3.4.2 Fonctionnement de Grille_CR 63

3.4.3 Caractérisation des grilles 71

3.5 Particularités de l'application à l'offre de transport en commun 71

3.6 Comparaison de l'offre et de la demande 81

3.7 Distribution temporelle 81

CHAPITRE 4 PROFIL DE L'EST DE L'ÎLE DE MONTRÉAL 84

4.1 Étude de cas 1 - Déplacements à vélo sur l'île de Montréal 84

4.1.1 Profil des utilisateurs et de leurs déplacements 85

4.1.2 Détermination des paramètres pour Traclus_DL et Grille_CR 87

4.1.3 Analyse par grille 93

4.1.4 Piste cyclable sur l'île de Montréal 96

4.1.5 Analyse des déplacements vers Université de Montréal et le collège Brébeuf 102

4.2 Étude de cas 2 – Étude de l'offre de bus vers la station de métro Honoré Beaugrand 108

4.2.1 Profil de la desserte vers le métro Honoré Beaugrand 108

4.2.2 Profil des déplacements des utilisateurs en auto à comportement de déplacements similaires 111

4.2.3 Comparaison spatiale de l'offre et de la demande (Traclus_DL + Grille_CR) 112

CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 127

5.1 Synthèse des travaux 127

5.2 Contributions 128

5.3 Limitations 129

5.4 Perspectives 131

RÉFÉRENCES 137

ANNEXES 142

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1: Objectifs d'optimisation selon différents groupes. 7

Tableau 2-2: Paramètres à considérer pour l'optimisation du service. 8

Tableau 2-3: Mots clés caractérisant un corridor. 22

Tableau 3-1: Effet de la distance de recherche (% de regroupement, distribution des longueurs des zones convexes, distribution des largeurs des zones convexes, ...).....54

Tableau 3-2: % de variation du temps de calcul en fonction de l'angle maximal de déviation pour un même poids minimal de création (référence angle maximal de déviation de 2.5). 60

Tableau 4-1: Résumé du service offert ainsi que la demande. 109

Tableau 4-2: Taux de détour et niveau de service de chaque ligne bus se dirigeant vers le métro Honoré Beaugrand.....113

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1: Schéma conceptuel sur l'optimisation d'un système de transport en commun (inspiré des travaux de Kepaptsoglou et de Karlaftis).....11

Figure 2-3: Différence entre distance réseau et à vol d'oiseau 15

Figure 2-4: Illustration du coût angulaire (Frappier, 2015) 16

Figure 2-5: Illustration de la hauteur maximale (Frappier, 2015).....16

Figure 2-6: Exemple de partition d'un déplacement (El Mahrsi, 2011). 24

Figure 2-7: Étape de création d'un corridor à l'aide de Traclus (El Mahrsi, 2011).....25

Figure 2-8: Exemple d'une zone à forte densité. 25

Figure 2-9: Exemple d'une ligne de désir 26

Figure 2-10: Corridors créés par Traclus_Dl pour les lignes de désirs en automobile entre 7h30 et 8h00.....27

Figure 2-11: Exemple de grille de désir (mailles de 20 mètres de largeur). 30

Figure 2-12: Exemple de grilles de désir (mailles de 500 mètres de largeur).....30

Figure 2-13: Exemple de grille de désir (mailles de 100 mètres de largeur) 30

Figure 2-14: Influence de la localisation d'un maillage sur la distribution des entités étudiées (Lajoie, 1992).....31

Figure 3-1: Déplacements internes (tout mode, excluant motif : retour au domicile) à la zone d'étude.....33

Figure 3-2: Schéma conceptuel de la création de grilles de désir 35

Figure 3-3: Angle maximum entre un corridor de demande et des lignes de désirs (selon : Bahbouh, 2017).....37

Figure 3-4: Division des observations en segments (Bahbouh, 2017).....39

Figure 3-5: Assignation d'un segment d'une ligne de désir à un corridor potentiel.....39

Figure 3-6: Expansion de la zone de recherche (exemple) 41

Figure 3-7: Exemple d'assignation finale des corridors.....43

Figure 3-8: Exemple d'une subdivision d'une observation 45

Figure 3-9: Exemple de prolongement des déplacements par Traclus_DL pour atteindre la longueur de segmentation (2400 mètres). 46

Figure 3-10: Exemple de segments créés par la version modifiée de Traclus_DL.....47

Figure 3-11: Comparaison de corridors créés en fonction de la longueur de segmentation (200 m vs 1200m). Autres paramètres: distance maximale de recherche 400 m, poids minimal 200 déplacements pondérés et angle maximal de déviation 15°. 48

Figure 3-12: Segments (flèches vertes) assignés à un corridor (flèche rouge). 49

Figure 3-13: Effet de la longueur de segmentation sur le temps de calcul 50

Figure 3-14: Exemple d'un polygone convexe regroupant les segments appartenant à un même corridor 52

Figure 3-15: Distribution des facteurs de pondération déplacement entre 7h00 et 8h30 de la zone étudiée 57

Figure 3-16: % des segments des déplacements internes de la zone à l'étude (excluant retour au domicile, distance maximale de recherche: 200 m, longueur de segmentation : 100 m) assignés à un corridor 58

Figure 3-17: Temps d'exécution de Traclus_DL en fonction de l'angle de déviation et du poids minimal de création 59

Figure 3-18: Effet de la quantité de lignes de désir analysées sur le temps de calcul pour un angle maximal de déviation fixe (déplacements internes de la zone présentée dans la Figure 3.1) 61

Figure 3-19: Dimensions d'une maille.....63

Figure 3-20: Coordonnées extrêmes de la zone de création.....64

Figure 3-21: Exemple d'un corridor (0) créé à partir de segments avec Traclus_DL 65

Figure 3-22: Polygone à distance minimale tracé autour du corridor de la Figure 3-21.....65

Figure 3-23: Création d'un nouveau corridor (0) centré pondéré et prolongé 66

Figure 3-24: Scénarios possibles lors de la création de grilles de désir 67

Figure 3-25: Exemple de la composition d'une cellule si le double comptage n'est pas évité 68

Figure 3-26: Exemple du processus de nettoyage des doublons présents au sein d'une même cellule 69

Figure 3-27: Exemple d'une transformation de déplacements bruts entre 7H00 AM et 8H30 AM de la zone à l'étude 70

Figure 3-28: Ensemble de données GTFS (Wikipédia, 2019a) 72

Figure 3-29: Exemple d'un trajet de bus 73

Figure 3-30: Exemple de segments de trajet direct pour différentes lignes de bus.....73

Figure 3-31: Processus de création d'une offre de niveau 2 (Level2Services).....75

Figure 3-32: Exemple des champs nécessaires 76

Figure 3-33: Exemple de lignes d'offre de niveau 2 à considérer pour le trajet de la Figure 3-29 77

Figure 3-34: Différence de structure de trajet entre un taux de détour qui tend vers 0 et un taux de détour qui tend vers 1 78

Figure 3-35: Exemple d'un trajet.....79

Figure 3-36: Exemple d'un segment de trajet emprunter par deux lignes de bus 80

Figure 3-37: Exemple de la méthode de duplication.....80

Figure 3-38: Bus standard (STM, 2013) 81

Figure 3-39: Bus articulé (STM, 2013).....81

Figure 3-40: Metro AZUR (STM, 2013) 81

Figure 3-41: Exemple d'une distribution temporelle (déplacements internes de la zone se trouvant à la Figure 3-1) 82

Figure 3-42: Exemple pour expliquer la différence entre passage-arrêts et voyages.....83

Figure 4-1: Lignes de désir des déplacements à vélo sur l'île de Montréal (enquête OD 2013)....85

Figure 4-2: Pourcentage des déplacements selon le groupe d'âge 86

Figure 4-3: Nombre de déplacements selon l'occupation et le groupe d'âge 86

Figure 4-4: Distribution temporelle des déplacements à vélo (jour moyen de semaine, O-D 2013) 87

Figure 4-5: Distribution de la distance à vol d'oiseau des déplacements 88

Figure 4-6: Distribution des facteurs de pondération 89

Figure 4-7: Distribution du nombre de segments par corridor 90

Figure 4-8: Distribution de la longueur de la zone convexe des segments d'un même corridor....91

Figure 4-9: Grille de base 92

Figure 4-10: Grille des déplacements à vélo (zone 1) 94

Figure 4-11: Grille des déplacements à vélo (zone 2) 94

Figure 4-12: Grille des déplacements à vélo (zone 3) 95

Figure 4-13: Grille des déplacements à vélo (zone 4) 95

Figure 4-14: Exemple de chaussée désignée (SAAQ, 2018) 96

Figure 4-15: Exemple d'une bande cyclable (SAAQ, 2018) 97

Figure 4-16: Exemple d'une piste cyclable sur rue (Arrondissement_Outremont, 2018) 97

Figure 4-17: Exemple d'un sentier polyvalent (Québec, 2017b) 98

Figure 4-18: Exemple d'une piste cyclable au niveau du trottoir (Québec, 2017a).....99

Figure 4-19: Exemple d'une piste cyclable en site propre (SAAQ, 2018) 100

Figure 4-20: Pistes cyclables actuelles sur l'île de Montréal selon leur niveau de sécurité (figure créée grâce aux données ouvertes de Montréal).....101

Figure 4-21: Localisation des quatre lieux étudiés.....102

Figure 4-22: Lignes de désir produites par les quatre lieux étudiés.....102

Figure 4-23: % du mode utilisé selon la distance à vol d'oiseau des déplacements effectués vers ou en partance des 4 établissements étudiés.....103

Figure 4-24: Grille de désir de la zone 1 (30º à 119º) des déplacements de moins de 5 km non effectués à vélo ou à la marche 105

Figure 4-25: Grille de désir de la zone 2 (120º à 209º) des déplacements de moins de 5 km non effectués à vélo ou à la marche 105

Figure 4-26: Grille de désir de la zone 3 (210o à 299o) des déplacements de moins de 5 km non effectués à vélo ou à la marche 106

Figure 4-27 : Grille de désir de la zone 4 (300o à 29o) des déplacements de moins de 5 km non effectués à vélo ou à la marche 106

Figure 4-28: Offre de service de bus vers Honoré Beaugrand ; Origine des déplacements en bus vers Honoré Beaugrand.....110

Figure 4-29: Nombre de passage-arrêts et nombre de voyages pour l'étude de cas en cours. 110

Figure 4-30: Secteurs d'origine et principaux secteurs de destination des utilisateurs des lignes de bus présentées.....111

Figure 4-31: Grille d'offre vers la station Honoré Beaugrand ; zone 1: 60º à 149º. 118

Figure 4-32: Grille d'offre vers la station Honoré Beaugrand ; zone 2: 150º à 239º. 118

Figure 4-33: Grille d'offre vers la station Honoré Beaugrand ; zone 3: 240º à 329º. 118

Figure 4-34: Grille d'offre vers la station Honoré Beaugrand ; zone 4: 330º à 59º. 118

Figure 4-35: Grille de demande potentielle vers la station Honoré Beaugrand ; zone 1: 60º à 149º 121

Figure 4-36: Grille de demande potentielle vers la station Honoré Beaugrand ; zone 2: 150º à 239º 121

Figure 4-37: Grille de demande potentielle vers la station Honoré Beaugrand ; zone 3: 240º à 329º 121

Figure 4-38: Caractérisation des grilles de demande potentielles (motif) 121

Figure 4-39: Caractérisation des grilles de demande potentielles (heure de déplacements).....122

Figure 4-40: Caractérisation des grilles de demande potentielles (groupe d'âge).....122

Figure 4-41: Couverture de l'offre de bus se dirigeant vers la station Honoré Beaugrand sur la demande potentielle.....123

Figure 4-42: Analyse du service offert quantitativement.....125

Figure 5-1: Angle maximal qui peut exister entre deux segments d'un même corridor.....130

Figure 5-2: Exemple d'une offre de niveau 3. 132

Figure 5-3: 4 grands types de demandes latentes (traduit de: Clifton & Moura, 2017).....136

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AC	Auto Conducteur
AP	Auto Passager
DBSCAN	Density Based Spatial Clustering of Application with Noise
GES	Gaz à Effet de Serre
Grille_CR	Grille Création
GTFS	General Transit Feed Specification
LCSS	Longest Common SubSequences
QGIS	Quantum Geographic Information Systems
REM	Réseau Express Métropolitain
STM	Société de Transport de Montréal
Traclus_DL	Trajectory Clustering Desired Line
TRNDP	Transit Route Network Design Problem
UdeM	Université de Montréal

LISTE DES ANNEXES

Annexe A – Ensemble du code écrit 142

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Selon de nombreux auteurs, le transport est un domaine multidimensionnel dont l'importance est historique, sociale, politique, économique et environnementale (J.-P. Rodrigue, Comtois, & Slack, 2016). Chacun de ces termes peut être expliqué de la manière suivante :

- **Historique** : Le transport joue un rôle important dans le développement d'une civilisation ou d'une société et apporte une perspective pour mieux comprendre l'histoire d'une région.
- **Sociale** : Le transport joue un rôle important au niveau de l'accessibilité : à des centres de santé, à des événements culturels, au lieu de travail et tant d'autres. Ainsi, le transport peut facilement modeler une société en favorisant ou non les interactions sociales et même façonner la structure sociale de celle-ci (accès à un mode de transport ou non).
- **Politique** : La politique a un effet considérable sur le domaine des transports puisqu'elle est le plus souvent responsable des investissements dans ce champ. En fonction du gouvernement en place, ces fonds monétaires peuvent être subdivisés différemment. Par exemple, certains gouvernements attribueront une plus grande partie des investissements au développement de nouvelles autoroutes tandis que d'autres les attribueront à l'amélioration des transports en commun. Le rôle de la politique ma un grand impact sur le volet social.
- **Économique** : Le transport en lui-même peut être vu comme une industrie (ex. marché d'automobiles). De plus, en fonction de son développement, il peut amener un apport économique. Le meilleur exemple est la construction du Réseau express métropolitain (REM) qui augmente la valeur foncière des propriétés se trouvant aux alentours (Dubuc, 2019).
- **Environnementale** : Malgré ses multiples bienfaits, le transport a aussi un effet néfaste sur l'environnement (utilisation de ressources naturelles, émissions de gaz à effets de serre, pollution sonore, …). Cette caractéristique du transport rappelle qu'il faut avoir un second regard lors de la planification de celui-ci. Puisqu'indispensable, il faut tenter au mieux de limiter son empreinte écologique.

Trois de ces cinq enjeux (social, économique et environnemental) font ressortir l'importance d'un type de mode de transport, le transport collectif. Ainsi, les transports collectifs jouent un rôle important dans la dynamique des sociétés d'aujourd'hui et dans le développement urbain.

Au Québec, le transport est responsable d'une grande partie des émissions de GES totales de la province, soit 41,7 %, dont 78,8 % qui proviennent des transports routiers (MELCC, 2018). Dans la grande région de Montréal, près de 70 % des déplacements sont effectués exclusivement en automobile avec un taux d'occupation très faible, soit 1,2 passager par véhicule (Origine-Destination, 2013). Cette forte utilisation de l'automobile favorise la sédentarité chez la population en réduisant de façon considérable le niveau d'activité physique quotidienne (Équiterre, 2010). De plus, les transports émettent dans l'atmosphère de nombreux polluants tels que les particules fines ($PM_{2.5}$) (Gouvernement_du_Québec, 2019). L'émission de ces polluants dans l'atmosphère, ainsi que la diminution des activités physiques quotidiennes, engendrent une détérioration de l'état de santé de la population due au déclin de la qualité de l'air et à une augmentation des risques d'obésité, entre autres. Ainsi, une bonne planification des réseaux de transport collectif contribuera à réduire la congestion routière, les émissions de GES et les émissions de particules fines, tout en améliorant la santé publique et l'inclusion sociale. De plus, elle permettra d'engendrer un changement dans les habitudes de déplacement de la population. Cependant, les coûts associés à la mise en œuvre de tels réseaux, tant au niveau des infrastructures requises que de leur exploitation, peuvent être très élevés.

Par ailleurs, la demande de déplacements change et fluctue en fonction de l'heure, de la journée et à travers les années. Il faut donc continuellement remettre en question la configuration spatio-temporelle des réseaux pour demeurer en phase avec la demande. Face à cette dynamique, offrir un réseau optimal est alors un défi et résulte d'un arbitrage. Le service doit être attractif pour répondre aux besoins des utilisateurs et offrir à tous les segments de la population un bon niveau d'accessibilité. En contrepartie, les opérateurs tentent de réduire leurs coûts, sachant que les revenus des utilisateurs ne couvrent pas tous les coûts associés à l'exploitation du service.

Cependant avant de penser à mettre en place de nouveaux services, il faut être en mesure de faire un diagnostic concret de l'offre, être en mesure d'évaluer si l'offre actuelle répond ou non à la

demande de transport de la population à travers différents secteurs et être capable d'identifier celles qui sont à améliorer.

1.2 Contributions de ce projet de recherche

La contribution principale de ce projet de recherche est la mise en place de concepts et d'outils qui contribuent à mieux comprendre la demande et faire le diagnostic de l'offre. Cette contribution se présente de la manière suivante :

1. Amélioration de l'outil de Traclus_DL

   Traclus_DL, « Trajectory Clustering for Desire Lines », est un outil qui permet d'effectuer un regroupement spatial de lignes de désir similaires en corridors. Cependant, Traclus_DL présente quelques lacunes. Ainsi, une partie de ce projet se concentre sur l'amélioration de cet outil.

2. Mise en place d'une méthodologie pour le choix de paramètres adéquats

   Une des plus grandes difficultés de Traclus_DL est le choix des paramètres. Ce mémoire présente de manière détaillée l'ensemble des étapes à suivre pour s'assurer d'effectuer un choix adéquat de paramètres selon le type d'étude.

3. Mise en place d'une méthodologie pour modéliser l'offre avec Traclus_DL

   Une autre des contributions de ce projet est l'adaptation d'une méthode pour l'utilisation de Traclus_DL pour modéliser l'offre en transport. Level2Services est un outil qui est développé pour permettre cette modélisation. Cette méthode permet par la suite d'effectuer, si voulu, une comparaison entre la demande et l'offre.

4. Création d'un outil de lissage automatisé

   Une des perspectives souhaitées par l'inventeur de Traclus_DL était l'élaboration d'un algorithme de lissage afin de faciliter l'exploitation des résultats (Bahbouh, 2017). Une des grandes contributions de ce projet de recherche est la création de cet outil de lissage, Grille_CR, qui facilite la visualisation des regroupements produits par Traclus_DL.

1.3 Objectif et plan du mémoire

Ainsi, ces contributions aideront les utilisateurs à évaluer la qualité de la configuration spatio-temporelle des services de transport public qui par la suite aidera à produire un diagnostic des réseaux de transports en commun. Il est important de spécifier que les outils présentés pourront servir aussi à étudier des lignes de désir relatives à d'autres modes de transport tels que le vélo ou encore l'automobile.

Pour y arriver, ce mémoire est divisé en différentes parties qui sont décrites ci-dessous.

Chapitre 2

Le chapitre 2 présente les enseignements tirés de la littérature. Ils permettent d'avoir une meilleure compréhension des notions nécessaires pour effectuer ce projet de recherche.

- La première partie de ce chapitre s'attaque au sujet de l'optimisation des systèmes de transport en commun. Une recherche dans la littérature sur ce sujet permet de situer le projet de recherche, de comprendre le cheminement pour effectuer cette optimisation et de présenter les différents volets à couvrir (les objectifs de conception, les paramètres du problème et les différentes approches ou techniques pour l'optimisation).
- La deuxième partie de ce chapitre présente quelques méthodes de diagnostic de réseaux de transport en commun qui existent dans la littérature. Cette recherche, dans la littérature, permet d'effectuer une comparaison entre différentes approches de diagnostic de réseaux de transport en commun.
- La troisième partie de ce chapitre continue dans l'exploration de la littérature. Cette fois-ci, une recherche est effectuée sur le concept de corridors. Cette notion est l'ingrédient de base pour comprendre l'idée derrière l'outil étudié, Traclus_DL.
- La quatrième partie présente Traclus_DL. Une revue de littérature est réalisée sur cet outil. Celle-ci permet d'identifier la provenance de celui-ci et de comprendre sa logique de fonctionnement.
- Pour terminer, la dernière partie de ce mémoire présente le concept de carroyage. Celui-ci a permis le développement de l'outil de lissage automatisé qui complémente Traclus_DL.

Chapitre 3

Le chapitre 3 présente l'ensemble de la méthodologie derrière ce projet de recherche.

- Tout d'abord, le fonctionnement de Traclus_DL est expliqué en détail. Cette analyse permet par la suite d'identifier les pistes d'améliorations nécessaires.
- Par la suite, les différentes améliorations apportées à Traclus_DL ainsi qu'un guide méthodologique pour le choix de paramètres adéquats sont présentés en parallèle.
- Puis, Grille_CR, outil de lissage automatisé qui complète Traclus_DL, est introduit. Au cours de cette section, une explication complète de la logique derrière cet outil est fournie ainsi qu'une explication sur la méthode de fonctionnement.
- Pour terminer, l'ensemble des particularités à considérer pour l'application de ces deux outils à l'offre de transport sont mises de l'avant.

Chapitre 4

Le chapitre 4 présente deux études de cas qui permettent de comprendre l'utilité de cette méthodologie et de savoir à quel type d'étude cette méthodologie peut contribuer.

- La première étude est effectuée sur les déplacements effectués à vélo et sur le potentiel d'un changement modal vers ce mode de transports pour deux établissements scolaires, l'Université de Montréal et le Collège Brébeuf.
- La deuxième étude se concentre sur l'offre de transport en commun vers la station de métro Honoré Beaugrand. De plus, une analyse est effectuée sur les utilisateurs en automobile qui ont un comportement semblable aux utilisateurs des services de bus.

Conclusion

La dernière partie du mémoire effectue un résumé de l'ensemble des points couverts, présente différentes perspectives et améliorations possibles pour ces deux outils, identifie les différentes limites et contraintes de ceux-ci et discute des nouvelles pistes de recherche qui pourraient être explorées sur le sujet.

Le but ultime de ce mémoire est de permettre une utilisation facile de ces deux outils (Traclus_DL et Grille_CR) dans le monde professionnel ou éducationnel.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Mise en contexte

Les recherches sur le problème de conception des itinéraires de transport en commun (TRNDP) ont commencé à la fin des années soixante. L'auteur Holroyd est l'un des premiers à s'être attaqué théoriquement au problème en essayant de trouver des itinéraires optimaux ainsi qu'une fréquence de passages optimale (Holroyd, 1967) tel que cité par (Kepaptsoglou & Karlaftis, 2009). Le problème a été traité de manière analytique avec quelques hypothèses, comme celle d'avoir une grille rectangulaire pour représenter les arrêts de bus. En 1979, Newell aborde le problème relié à l'utilisation d'une telle hypothèse (Newell, 1979) tel que cité par (Kepaptsoglou & Karlaftis, 2009). Depuis, la manière de résoudre ces problèmes a beaucoup évolué.

En 1998, dans un de ses articles, Pattnaik et al. dénotent que trois caractéristiques doivent être respectées pour qu'un modèle d'optimisation soit utilisable. Le modèle doit (Pattnaik, Mohan, & Tom, 1998) :

- « Être capable de gérer plusieurs types de problèmes de conception tels que l'attribution de fréquences, l'amélioration d'un réseau existant ou encore la conception de l'ensemble d'un réseau;
- Effectuer une optimisation dans un temps de calcul raisonnable;
- Être accessible et compréhensible ».

Un problème de conception de réseau de transport en commun (TRNDP) peut être séparé en trois grandes parties (Kepaptsoglou & Karlaftis, 2009) :

- Quel est l'objectif de la conception?
- Quels sont les paramètres du problème?
- Quelle est l'approche d'optimisation à utiliser?

2.1.1 Objectif de conception

Trois groupes peuvent être affectés par la conception d'un réseau de transport en commun: les utilisateurs, les opérateurs et la communauté (Van Oudheusden, Ranjithan, & Singh, 1987). Ainsi, certains des objectifs pouvant être formulés pour chaque groupe sont présentés au Tableau 2-1.

Tableau 2-1: Quelques objectifs d'optimisation selon différents groupes (Van Oudheusden et al., 1987).

Groupe affecté	But
Utilisateurs	• Minimiser la durée du voyage • Minimiser le coût du déplacement • Minimiser les paramètres usagers (temps d'attente, nombre de transferts, …)
Opérateurs	• Minimiser le coût pour l'opérateur • Maximiser les revenus • Maximiser l'utilisation de la flotte de bus
Environnement ou communauté	• Minimiser la pollution • Minimiser la congestion • Maximiser l'accessibilité

La résolution d'un seul objectif peut être coûteuse pour la santé du réseau de transport en commun. Par exemple, réduire les coûts des utilisateurs uniquement pourrait entraîner des coûts élevés pour les opérateurs et ainsi entraîner la faillite de ceux-ci.

Il est recommandé de combiner plusieurs objectifs d'optimisation. Par exemple, une des principales combinaisons utilisées dans plusieurs articles consiste à minimiser les coûts pour les utilisateurs et à maximiser les revenus des opérateurs (Chien & Spasovic, 2002; Tom & Mohan, 2003). Cette dernière combinaison est généralement appelée « Bien-être total ».

2.1.2 Paramètres de conception

Il est primordial de choisir, pour le modèle d'optimisation, des paramètres qui respectent la complexité de la zone à l'étude (ex. tracé de route, type de demande, …) et des contraintes opérationnelles (type de bus disponible, grille tarifaire, …). Ils varient en fonction de type d'étude effectuée. Dans la littérature, les paramètres à prendre en compte lors de la conception sont divisés plus en moins en 5 groupes (Kepaptsoglou & Karlaftis, 2009). Le Tableau 2-2 présente un résumé des paramètres les plus retrouvés dans la littérature.

Tableau 2-2: Paramètres à considérer pour l'optimisation du service (Kepaptsoglou & Karlaftis, 2009).

Groupe	Paramètres
Variables de décisions	• Tracé des routes • Fréquence • Tarif • Localisation des arrêts
Modèle de demande	• Plusieurs à un : plusieurs lieux d'origine vers une destination principale (ex. départ provenant de différentes banlieues vers le centre-ville) • Plusieurs à plusieurs : différentes origines vers des destinations différentes
Caractéristiques de la demande	• Fixe • Variable (selon heure, période, …)
Stratégies d'opération	• Type de service (Express, régulier, …)
Contraintes	• Taille des bus • Taille de la flotte de bus • Durée maximale et minimale des trajets de bus

	• Nombre de lignes

2.1.3 Méthode d'optimisation

Étant donné que la fonction à optimiser pour améliorer un réseau de transport en commun (fonction d'objectif de conception) est une fonction non convexe (Newell, 1979) tel que cité par (Chakroborty & Engineering, 2003) la résolution d'un tel problème devient très compliquée. Une fonction non convexe est définie comme étant une fonction possédant plusieurs optimaux locaux. La non-convexité de cette fonction rend pratiquement impossible la recherche du maximum global (ou du moins la certitude d'avoir trouvé le maximum global). De plus, l'optimisation d'un tel système est d'autant plus complexe puisqu'il est difficile de représenter mathématiquement certaines caractéristiques telles que les transferts (Chakroborty & Engineering, 2003). Par conséquent, la conception d'un réseau de transit est un problème combinatoire classé dans la catégorie NP-difficile (Barra, Carvalho, Teypaz, Cung, & Balassiano, 2007).

Dans la littérature, il existe principalement deux approches de résolution (Kepaptsoglou & Karlaftis, 2009) :

- Approche conventionnelle

  Une approche conventionnelle propose un modèle qui utilise un réseau simplifié ou idéalisé pour en déduire des paramètres tels que la distance ou le temps de passage entre véhicules de service (ex. bus) ou encore la longueur des trajets. Cependant, il a été souligné dans de nombreux articles que ce type d'approche ne peut pas être utilisé pour concevoir un véritable réseau (Chakroborty & Engineering, 2003; Kepaptsoglou & Karlaftis, 2009; van Nes, Hamerslag, & Immers, 1988).

- Approche heuristique

  Une approche heuristique propose une méthode qui est applicable à un réseau réel. En comparaison à l'approche conventionnelle, celle-ci traite de manière simultanée la conception d'un réseau de transport en commun (structure de la route) ainsi que la détermination de ses paramètres (ex. fréquence de passage). Une approche heuristique

permet de trouver une très bonne solution (pas obligatoirement la solution optimale) au problème de configuration d'un réseau en un temps raisonnable (Fan, 2004).

2.1.4 Résumé

L'ensemble des points couverts sur le sujet d'optimisation d'un réseau de transport en commun est résumé à l'aide d'un schéma conceptuel à la Figure 2-1.

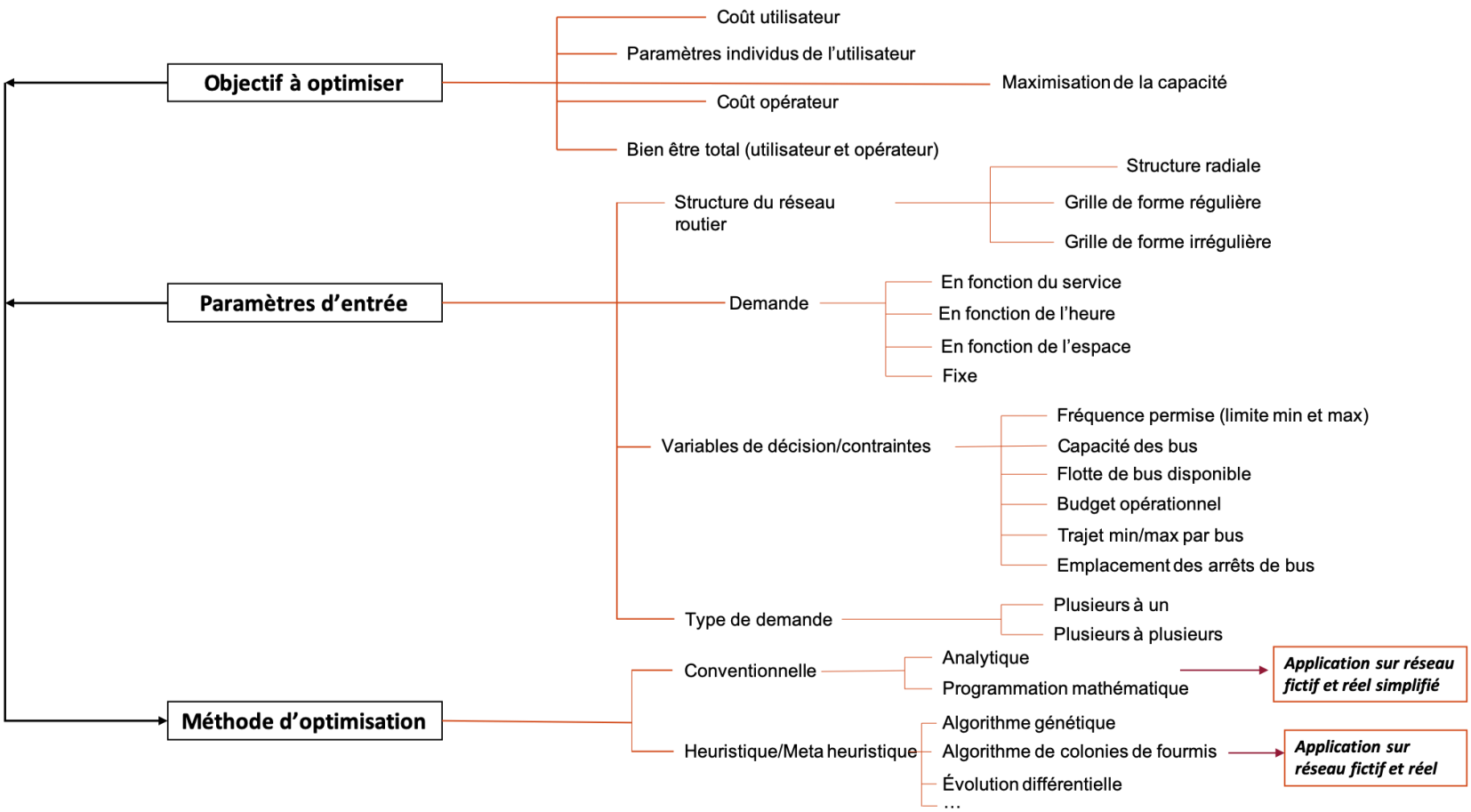


Figure 2-1: Schéma conceptuel sur l'optimisation d'un système de transport en commun (inspiré des travaux de Kepaptsoglou et de Karlaftis)

La Figure 2-1 est inspirée des travaux de Kepaptsoglou qui examine en détail les différentes recherches effectuées sur les problèmes de conception de réseaux de transport en commun (Kepaptsoglou & Karlaftis, 2009).

Ce projet de recherche se concentre principalement sur la partie « Paramètres d'entrée ». En effet, à l'aide d'un diagnostic de l'état actuel du réseau de transport en commun ainsi que d'outils d'aide à la conception, il est possible d'identifier les paramètres adéquats à utiliser.

2.2 Indicateur de performance

2.2.1 Perception de la performance

La définition du mot performance varie en fonction du point de vue de celui qui en parle. Les transports en commun affectent directement ou indirectement différents groupes. Ainsi, plusieurs d'entre eux sont intéressés au rendement des services du transport en commun (KFH_Group, 2013) :

1. **Les usagers du transport en commun**

   Ils doivent décider du mode à utiliser (bus, métro, train, …) en fonction de leur disponibilité ou non. Les options de déplacements de ces usagers peuvent être limitées par la qualité du service.

2. **Les responsables des agences de transport en commun et les décideurs**

   Ils décident de la manière dont sont allouées les ressources disponibles. Ils doivent s'assurer de répondre aux buts et objectifs de l'agence.

3. **Les automobilistes**

   Le transport en commun a un effet sur les automobilistes. D'une part, il peut y avoir selon eux des apports positifs comme la diminution de la congestion lorsque certains d'entre eux décident de se tourner vers le transport en commun. D'une autre part, il peut y avoir des apports négatifs comme l'ajout d'infrastructures pour les transports en commun qui risquent de diminuer la capacité routière (ex. l'ajout de voies réservées).

4. **Les membres de la communauté**

Les membres de la communauté contribuent au transport en commun en payant des taxes. Ils souhaitent pouvoir bénéficier des bienfaits que celui-ci peut avoir tels que la réduction de la congestion, l'amélioration de la qualité de l'air et une amélioration de l'accessibilité, entre autres.

Chacun de ces groupes vise ses intérêts propres. Il est possible que certains points de vue s'opposent à d'autres (ex. automobilistes contre utilisateurs du TC). Par conséquent, il est important que la performance du réseau de transport en commun « soit traitée de manière à prendre en compte l'ensemble des points de vue » (KFH_Group, 2013). Le « Transit Capacity and Quality of Service Manual » propose un tableau très intéressant qui regroupe les champs d'intérêt à prendre en considération selon le groupe concerné ainsi que quelques indicateurs qui pourraient être calculés. Le Tableau 2-3 présente une version traduite ce tableau.

Tableau 2-3: Champs d'intérêt selon les parties prenantes et quelques indicateurs (traduit de : (KFH_Group, 2013))

		Champs d'intérêt	Exemple d'indicateurs de performance
	Utilisateur du TC	Disponibilité du service	• Couverture du service • Fréquence • Heures de service
		Qualité du service fourni	• Niveau de confort • Satisfaction du client • Niveau de fiabilité
		Niveau de sécurité	• Taux d'accident • Taux de criminalité au niveau du TC • Présence de dispositifs de sécurité
		Entretien	• Nettoyage de la flotte • Ratio de réserve
	Les agences de transport	Économique	• Taux d'achalandage • Rapport coût-efficacité • Rentabilité
La communauté		Effet du TC	• Impact économique • Impact environnemental • Taux de mobilité • Impact sur l'emploi
	Les automobilistes	Capacité	• Capacité routière
		Temps de voyage	• Retard engendré • Vitesse moyenne

2.2.2 Type d'indicateurs

Ainsi, le service de transport en commun doit être analysé sous différents angles. Voici une liste plus détaillée de quelques indicateurs.

Indicateurs de la performance opérationnelle

Dans la littérature, plusieurs auteurs se concentrent sur la mise en place d'indicateurs de performance qui décrivent le bon fonctionnement ou non d'un réseau de transport en commun (Bahbouh, 2017). Des indicateurs tels que les heures de service planifiées, la vitesse moyenne planifiée, la vitesse moyenne actuelle ou encore la capacité horaire (fréquence * capacité théorique du bus) permettent de caractériser la performance des services de transport en commun (Bertini & El-Geneidy, 2003; Frappier, 2015; KFH_Group, 2013).

Indicateurs pour l'évaluation de la structure

Les indicateurs issus de la demande qui étudient la structure spatiale d'un réseau « reflètent l'attractivité de l'offre »(C. Viggiano, Koutsopoulos, Wilson, & Attanucci, 2015) tel que cité par (Bahbouh, 2017). Ils sont communément appelés « expérience déplacement ». Parmi les nombreux indicateurs de ce genre, il est possible de prendre comme exemple :

- La tortuosité

  La tortuosité est une mesure de la complexité d'un chemin (Lina, 1999). Elle permet d'évaluer la forme du réseau. La tortuosité est égale à (Bahbouh, 2017) :

$$Tortuosité = \frac{Distance\ parcourue\ sur\ le\ réseau}{Distance\ à\ vol\ d'oiseau}$$

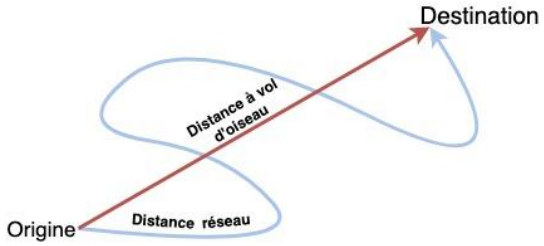


Figure 2-2: Différence entre distance réseau et à vol d'oiseau

  Une valeur qui tend vers 1 représente un réseau avec pratiquement aucun détour (ligne droite).

- Le coût angulaire

  Le coût angulaire est un indicateur qui permet d'étudier la distorsion géométrique. Il reflète « la déviation qu'un voyageur doit subir pour se rendre de son origine à sa destination » (Frappier, 2015). Il est calculé de la manière suivante :

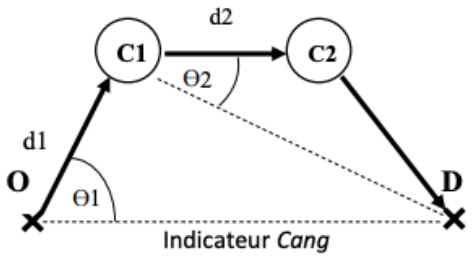


Figure 2-3: Illustration du coût angulaire (Frappier, 2015)

$$Coût\ angulaire = \sum_{l} dl * \sin\left(\frac{\theta l}{2}\right)$$

- La hauteur maximale

  Frappier a développé un autre indicateur qui est la hauteur maximale. La hauteur maximale définit la distance maximale entre le trajet à vol d'oiseau et le trajet de la ligne de bus à l'étude (Frappier, 2015). La Figure 2-4 illustre cet indicateur.

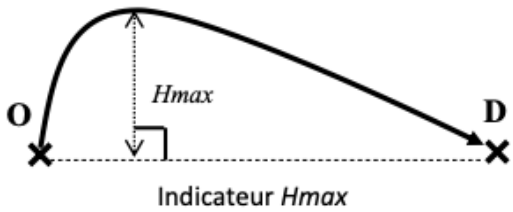


Figure 2-4: Illustration de la hauteur maximale (Frappier, 2015)

<u>Indicateur d'accessibilité</u>

L'accessibilité est définie comme étant « la facilité avec laquelle on accède à une activité à partir d'un lieu donné et d'un mode » (Godin, 2012). Godin a dédié tout un mémoire pour développer des méthodes et des indicateurs qui aident à prévoir l'impact que peuvent avoir des investissements majeurs ainsi que l'application de nouvelles politiques sur le niveau d'accès (Litman, 2007) tel que cité par (Godin, 2012) .

<u>Indicateur de confort</u>

Le transport en commun est « moins attrayant lorsque les passagers doivent rester debout pendant de longues périodes, en particulier lorsque les véhicules sont encombrés» (KFH_Group, 2013). Le niveau de confort est déterminé par le nombre de sièges disponibles et le taux d'occupation des véhicules. Le taux d'occupation permet de déterminer l'espace disponible moyen (m^2/passager) qui existe entre les passagers afin de décrire le niveau d'encombrement des véhicules (KFH_Group, 2013).

<u>Indicateur pour l'évaluation des impacts sociaux et environnementaux</u>

Sioui présente en détail différents indicateurs qui permettent d'évaluer les impacts sociaux et environnementaux du transport (Sioui, 2014). En voici quelques exemples :

- Potentiel de contact social grâce aux déplacements

  Cet indicateur permet « d'évaluer la contribution de la mobilité aux interactions sociales qui peuvent survenir à la fois durant le déplacement et lors de la réalisation d'une activité à l'extérieur de chez soi, activité possible grâce au déplacement » (Sioui, 2014). Il est calculé de la manière suivante :

  $Part\ d'interaction = \frac{\sum_{mode}(Potentiel\ d'interaction_{mode} * Temps\ de\ déplacement_{mode})}{\sum Temps\ de\ déplacement}$, avec le potentiel d'interaction étant une valeur qui varie entre 0 et 1 selon le mode utilisé.

- Déplacement avec peu de nuisances et favorisant l'ambiance du quartier

  Cet indicateur cherche à mettre en chiffre le niveau d'agréabilité d'une communauté (Sioui, 2014). L'auteur caractérise un déplacement nuisible lorsqu'il est effectué en automobile puisqu'il engendre de la pollution sonore et atmosphérique. Il est calculé de la manière suivante :

  $$Part\ des\ déplacements\ avec\ peu\ de\ nuisances = \frac{\sum Origines\ et\ destinations_{TC,Marche,Vélo}}{\sum Origines\ et\ destinations}$$

- Part d'activité physique recommandée attribuable aux déplacements

  Cet indicateur évalue « la contribution des transports à la réalisation d'activité physique quotidienne » (Sioui, 2014). Cet indicateur est calculé en deux étapes :

  $$Nb\ de\ pas\ équivalent = \frac{Distance\ de\ trajet_{marche}}{Foulée\ (\frac{m}{pas})} + Temps\ trajet_{vélo} * Féq\ (\frac{pas}{\min})$$

Où

La foulée moyenne est déterminée selon l'âge de l'individu.

Le facteur d'équivalence pour le vélo correspond à 4500 pas pour 15 mns, 10000 pas pour 30 mns et 13500 pas pour 60 mns (Sioui, 2014).

Sioui propose plusieurs autres indicateurs tels que le calcul des émissions des gaz à effet de serre, le calcul des émissions de polluants (ex. particules fines), le calcul de la contribution du transport au PIB (Produit Intérieur Brut) et tant d'autres qui permettent d'évaluer l'impact social et environnemental des transports (Sioui, 2014).

2.3 Outil de diagnostic

Dans la littérature, il existe de nombreuses méthodes qui aident à effectuer le diagnostic de la performance d'un réseau en transport en commun. Celles-ci sont abordées sous différents angles.

Une des méthodes est l'utilisation d'enquêtes. Les usagers du transport en commun répondent à un ensemble de questions sur la performance des services, la qualité des infrastructures ou encore sur la perception des transports en commun. Par la suite, à l'aide des données récoltées, des indicateurs sont calculés et des modèles sont développés. Le but de ce genre d'étude est de déterminer de manière subjective la performance et la qualité actuelle des services de transport en commun et d'identifier ses points faibles (Tyrinopoulos & Antoniou, 2008). Différentes études ont recours à ce type de méthodologie, par exemple :

- Tyrinopoulos et Antoniou (2008) mettent en place une enquête pour connaître le niveau de satisfaction des usagers et connaître leur perception sur la performance du réseau de transport en commun. Après avoir collecté un assez grand nombre de réponses, ils proposent une méthodologie basée sur l'application de 2 méthodes statistiques, le logit ordonné et l'analyse factorielle, qui leur permettent d'étudier la variabilité du comportement des usagers face au transport en commun et leur degré de satisfaction (Tyrinopoulos & Antoniou, 2008).
- Iseki et Taylor (2010) mettent en place une enquête pour examiner la perception des usagers sur la qualité du service et des infrastructures des arrêts de bus. Par la suite, un modèle de régression logistique ordonné est utilisé pour analyser les résultats (Iseki & Taylor, 2010).

Le deuxième type de méthode utilisée pour analyser la performance des réseaux de transport en commun est l'analyse d'indicateurs de performance directe. Cette analyse permet d'identifier les inefficacités opérationnelles. Les données d'analyse proviennent le plus souvent des compagnies de service de transport en commun (ex. données de carte à puce, données GPS provenant des bus, …).

Quelques articles ont recours à cette méthodologie, par exemple :

- Dans un de ses articles, Tanaboriboon (1993) définit les indicateurs de performance selon 5 critères :

  1. La disponibilité des données
  2. La facilité de compréhension
  3. La possibilité de contrôle par les opérateurs
  4. La facilité de comparaison avec d'autres opérateurs
  5. La fiabilité des données disponibles

  De ces 5 critères découlent une vingtaine indicateurs tels que le coût total par voyage, le nombre de veh-km par bus, le nombre de passagers par litre d'essence, le nombre de véh-heure par bus ou encore le coût d'opération par bus (Tanaboriboon, Quium, & Changsingha, 1993).

- Dans un de ses articles, Bertini et al. (2003) démontrent comment les données recueillies lors des trajets de bus peuvent être utilisées pour produire des mesures de performance (Bertini & El-Geneidy, 2003). Une trentaine d'entre elles ont été développées sous différentes catégories telles :

  - Performance au niveau de l'accessibilité, de la mobilité et du développement économique (ex. temps des voyages, pourcentage de la population à une distance d'accès d'un service de transport en commun, disponibilité de stationnements incitatifs, fréquence du service, …)
  - Performance globale du système (ex. revenu annuel, dépenses pour l'ensemble du système, achalandage, …)

- Performance au niveau de la route (ex. heures de service planifiées, vitesse moyenne planifiée, vitesse moyenne actuelle, nombre de chauffeurs, nombre de passagers à bord, temps total d'arrêt, …)

La troisième méthode consiste à combiner les deux méthodes précédentes. Comme noté par Eboli et al., lier les points de vue des usagers à des mesures de performance objectives permet aux agences de transport en commun d'évaluer leur service et de définir des objectifs réalistes et quantifiables d'amélioration (Eboli & Mazzulla, 2011). Ainsi, ce type d'étude regroupe une analyse objective et subjective de la performance des réseaux de transport en commun. Plusieurs articles ont utilisé ce genre de méthode, par exemple :

- Eboli et al. (2011) proposent une méthode permettant de développer des indicateurs qui prennent en compte le côté subjectif (perception des utilisateurs) et le côté objectif (mesure de performance directe) de chacun des aspects du transport en commun. Pour y arriver, ces indicateurs sont obtenus en résolvant un problème d'optimisation (Eboli & Mazzulla, 2011).
- Mahmoud et al. présentent un cadre méthodologique pour évaluer la qualité du service de transport en commun. Pour y arriver, des paramètres de qualité traditionnels (indicateurs subjectifs) ainsi que des paramètres de performance du système (indicateurs objectifs) sont traités afin de développer une méthode de mesure du service (Mahmoud, Hine, & Kashyap, 2011).

La dernière méthode trouvée dans la littérature est la mise en place de techniques pour développer des indicateurs d'analyse spatiale. Parmi les nombreux articles existants dans la littérature, il est possible d'en présenter quelques exemples :

- Fortin développe un cadre d'analyse permettant d'effectuer le diagnostic systématique d'un réseau de transport en commun à l'aide de données GTFS. Il propose un ensemble d'indicateurs spatiotemporels. À l'aide de ceux-ci, il est possible de produire des cartes décrivant la situation actuelle du service. Des cartes d'opportunités aux arrêts ou d'opportunités de départs ou encore de taux d'utilisation d'une ligne spécifique peuvent être produites (Fortin, 2016). Ce type d'informations contribue au diagnostic d'un réseau de transport en commun.

- Bahbouh développe un outil, Traclus_DL, qui permet d'effectuer de la modélisation de corridors de déplacements (Bahbouh, 2017). Le présent mémoire se concentre principalement sur l'amélioration de cet outil.

Les prochaines sections se concentrent sur la définition du mot corridor ainsi que la provenance de Traclus_DL (inspiration, paramètres, limitations, …).

2.4 Corridors

Un des concepts les plus importants à comprendre pour ce mémoire est celui de corridors dans le domaine des transports. On trouve dans la littérature de nombreuses définitions. En voici quelques-unes:

- « Lieux de convergence des transactions et de l'accumulation spatiale dans un espace tampon entre des points d'articulation (CAO & YAN, 2003). »
- « Une zone dans laquelle des déplacements ont tendance à se regrouper selon une forme linéaire, avec des routes de desserte (autoroute, de transit ou non motorisée) reliant des lignes principales qui effectuent des trajets plus longs dans une région métropolitaine (Smith, 1999). »
- « Large secteur géographique linéaire défini par les déplacements existants et prévus (Reiss, Gordon, Neudorff, & Harding, 2006) » tel que cité par (Bahbouh, 2017).
- « Orientation linéaire des routes et des flux reliant des lieux importants qui agissent comme des points d'origines/destinations (Comtois & Slack, 2009) » tel que cité par (Bahbouh, 2017).
- « Accumulation de flux et d'infrastructures dont leur développement est lié au processus économique, infrastructurel et technologique (J. P. Rodrigue, 2004). »

Plusieurs autres définitions pourraient être mentionnées, mais celle qui résume le mieux l'ensemble des définitions est celle-ci :

- « **Moyens de connexion** qui tracent des zones géographiques **multi échelles**, **dynamiques** et **linéaires** enveloppant une **densité élevée** de déplacements similaires (Bahbouh, 2017).»

Babhbouh (2017) effectue une très bonne revue de littérature sur le concept de corridors. En analysant la redondance de certains groupes de mots dans les multiples définitions de corridors, il est possible de décortiquer cette dernière définition:

Tableau 2-4: Mots clés caractérisant un corridor (suite)

Mots redondants	**Grande définition**
• Bande de terre qui comprend un axe de transport • Réseau autoroutier • Zone qui relie • Route de desserte • …	Moyen de connexion
• Orientation linéaire • Large secteur géographique linéaire • Forme linéaire • …	Linéaire
• Lieux importants • Principales destinations • Besoins similaires • Centre d’attraction	Densité élevée
• Entités dynamiques • Habitudes de déplacements • Déplacements actuels ou prévus • …	Dynamique

Tableau 2-4 : Mots clés caractérisant un corridor (fin)

• Interaction entre plusieurs groupes d'activités. • Lié au processus économique, infrastructurel et technologique	Multi échelle

Ainsi, ces 5 traits d'un corridor peuvent être définis de la manière suivante (Bahbouh, 2017) :

- **Moyens de connexion** : C'est un moyen de communication entre une origine et une destination. Selon certains auteurs, un corridor est considéré comme un succès lorsque celui-ci est « fluide, accessible et avec une bonne capacité (Bahbouh, 2017).
- **Linéaire** : Dans son livre, l'auteur Smith définit un corridor comme étant « un hangar de déplacement ainsi qu'une zone dans laquelle des déplacements se regroupent sous une forme linéaire » (Smith, 1999). La linéarité explique la direction qui existe entre le lieu de départ et le lieu de destination par rapport aux points cardinaux (Bahbouh, 2017).
- **Densité élevée** : Souvent dans la définition d'un corridor, il est possible de retrouver le terme « regroupement de déplacements similaires » ou des synonymes de celui-ci. Le point important ici est le mot regroupement qui est communément appelé « cluster ». Une des règles générales pour la création d'un « cluster » est d'avoir un nombre minimal d'observations similaires (Neethu & Surendran, 2013) d'où l'importance d'avoir le terme « densité élevée » dans la définition d'un corridor.
- **Dynamique** : Ce terme caractérise la nature changeante d'un corridor. Celui-ci pour une même zone géographique ne sera pas le même pour différentes heures de la journée ou pour des groupes de populations différentes (groupe d'âge, statuts, sexe,…) (Bahbouh, 2017).
- **Multi échelle** : Ce terme réfère au caractère multidimensionnel d'un corridor. En effet, selon certains auteurs, un corridor de transport regroupe « un ensemble d'activités (politique, économique, environnementale et sociale) interagissant entre elles et avec les services de transports offerts »(Bahbouh, 2017).

Cela permet de réaliser que le concept de corridors peut être utilisé comme unité de base pour comprendre et analyser la demande. Par la suite, cette analyse permet de savoir si le service fourni au niveau des transports répond bien au besoin de la population pour ses déplacements.

En sachant qu'un corridor est un **regroupement** de déplacements similaires, la prochaine question est de savoir quelles sont les méthodes qui existent dans la littérature pour effectuer cette agrégation.

Dans la littérature, il est possible de retrouver de nombreux algorithmes qui permettent la création de corridors tels que l'algorithme « Longest Common SubSequences » (LCSS), l'algorithme « Traclus » ou encore l'algorithme « Traclus_DL » qui est une version améliorée de « Traclus ».

Le premier algorithme, LCSS, traite un déplacement dans sa globalité et cherche à regrouper ceux qui partagent des caractéristiques similaires. Comme bien expliqué par Bahbouh dans sa thèse, cet algorithme attribue un score de similarité pour chaque paire de trajectoires grâce à une équation de distance (mesure de similarité). Par la suite, les corridors sont créés à partir de déplacements ayant un score de ressemblance satisfaisant. Il est avantageux d'utiliser un tel algorithme pour les trajets ayant de nombreux détours (Bahbouh, 2017).

En comparaison à l'algorithme LCSS, Traclus étudie la similarité de déplacements en partie. Initialement, cette méthode mathématique a été mise en place pour distinguer les corridors de déplacements d'animaux ou encore de cyclones (Bahbouh, 2017). Il fonctionne en deux parties (El Mahrsi, 2011):

1. Partitionnement des déplacements

   Cette étape consiste à identifier les points caractéristiques des déplacements. Ceux-ci correspondent au lieu où il y a un changement considérable de directions ou de vitesses.

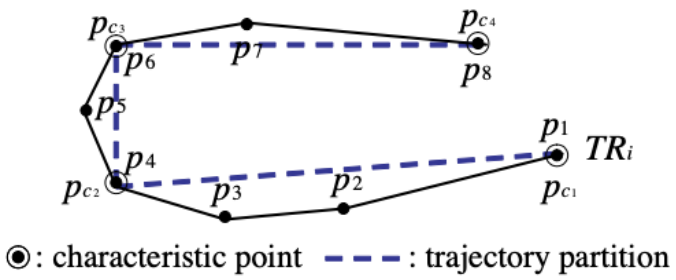


Figure 2-5: Exemple de partition d'un déplacement (El Mahrsi, 2011).

2. Création de corridors (regroupement de déplacements similaires)

   Cette étape crée un corridor à partir des partitions de déplacements créées (segments de déplacements). Un corridor contient des segments de déplacements ayant un score de similarité satisfaisant. De plus, un corridor n'est créé que s'il y a un nombre de segments de déplacements supérieurs au nombre minimal de créations (paramètres spécifiés par l'utilisateur).

   La Figure 2-6 présente les étapes de création d'un corridor à l'aide de Traclus.

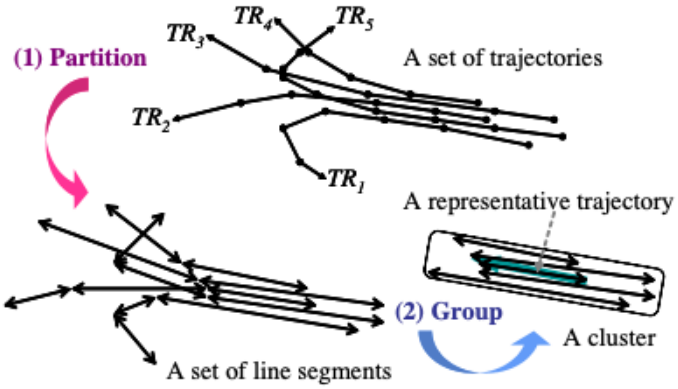


Figure 2-6: Étape de création d'un corridor à l'aide de Traclus (El Mahrsi, 2011).

Ainsi, cet algorithme permet d'étudier des segments de déplacements et d'ainsi localiser les lieux de déplacements à fortes densités, même si ces déplacements ne sont pas similaires dans leur globalité (ex. Figure 2-7).

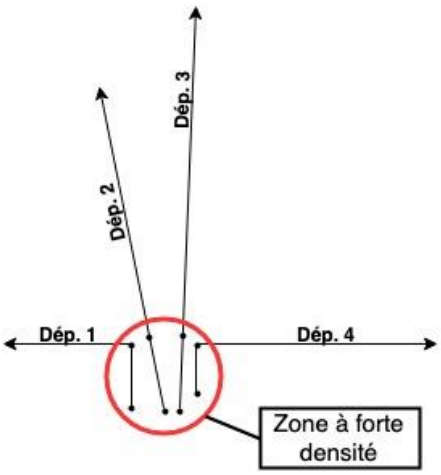


Figure 2-7: Exemple d'une zone à forte densité.

Cependant, selon quelques chercheurs, il y a une difficulté au niveau de l'application directe de Traclus à des problèmes dans le domaine du transport (Bahbouh, 2017). Traclus nécessite deux paramètres d'entrées, le niveau de similarité (ε) et le minimum de segments nécessaire pour la création d'un corridor (MinLns) (El Mahrsi, 2011). Une des difficultés est de déterminer la valeur de ces paramètres. Le niveau de similarité est calculé à partir d'une équation assez complexe. De plus, spécifier un nombre minimal de segments ne fonctionne que s'il n'y a pas de facteurs de pondération à prendre en compte.

Sachant qu'une ligne de désir est définie comme étant une ligne directe qui relie l'origine à sa destination ou encore une représentation simplifiée de la demande (ex. Figure 2-8), il est alors très difficile d'effectuer de la segmentation puisque celle-ci est effectuée en étudiant les changements de direction ou de vitesse.

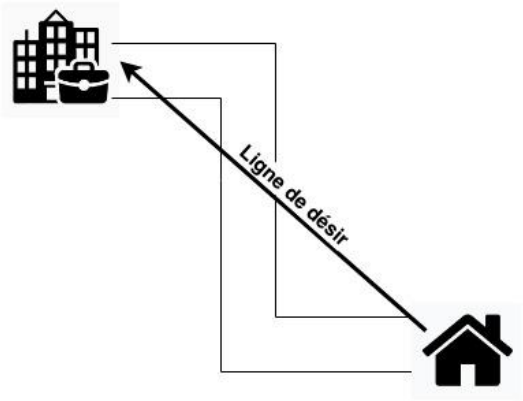


Figure 2-8: Exemple d'une ligne de désir

Par ailleurs, Traclus ne fournit aucune information sur les segments. C'est-à-dire qu'il est impossible de savoir quels segments qu'appartiennent à quel corridor et quels sont ceux qui ne sont pas regroupés. Seule l'information sur les corridors créés est fournie. En dernier lieu, Traclus ne supporte pas certaines caractéristiques d'une ligne de désir, par exemple la direction de celle-ci (Bahbouh, 2017). Ainsi, Traclus_DL est né en tirant profit du potentiel de Traclus et en tenant compte de ses limites pour l'application dans le domaine des transports.

2.5 Traclus_DL

Traclus_DL, « Trajectory Clustering for Desire Lines », est une version améliorée de Traclus qui permet d'effectuer un regroupement spatial de lignes de désir similaires en corridors. Cet

algorithme a été développé par Bahbouh (2017). En comparaison à Traclus, il fait appel à 4 paramètres intuitifs et faciles à concevoir. Ces 4 paramètres sont : la distance de recherche, l'angle maximal de déviation, le poids minimal de création et la longueur de segmentation. Cet algorithme est utilisé dans quelques études comme celle de Viggiano. Ce dernier utilise Traclus_DL pour regrouper des paires OD qu'il caractérise à l'aide de certains critères préétablis comme étant des paires OD qui peuvent bénéficier d'un nouveau service de bus (C. A. Viggiano, 2017). L'approche de cet auteur montre une possibilité d'utilisation de Traclus_DL dans le but de mettre en place de nouveaux services.

Cet algorithme est celui qui est utilisé pour ce projet de recherche. Il est expliqué en détail dans le Chapitre 3.

Traclus_DL a été testé pour plusieurs types de scénarios. Celui-ci facilite l'analyse d'un ensemble de déplacements en regroupant ceux qui sont similaires selon certains critères. Cependant, si aucun lissage des corridors n'est effectué, l'analyse des résultats obtenus est assez difficile. La Figure 2-9 présente les corridors créés par Traclus_DL pour des déplacements réalisés en automobile entre 7h30 AM et 8h00 AM sur l'île de Mon tréal.

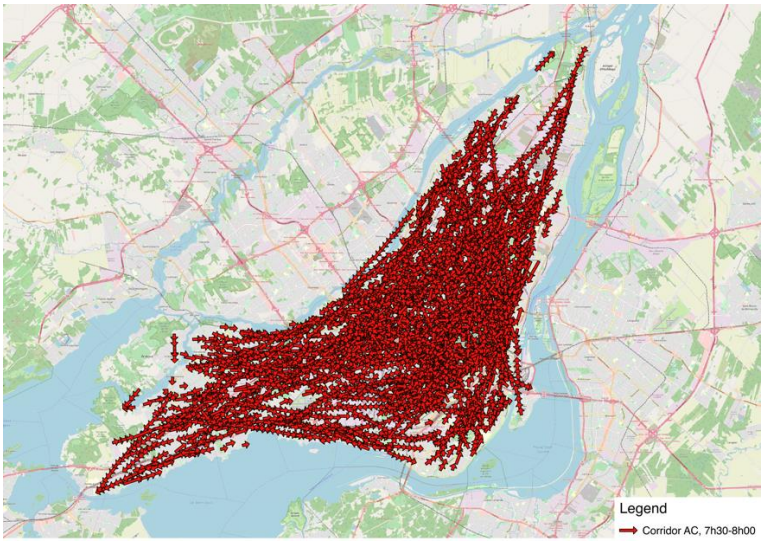


Figure 2-9: Corridors créés par Traclus_Dl pour les lignes de désirs en automobile entre 7h30 et 8h00

En regardant la Figure 2-9, il est impossible de faire ressortir de l'information pertinente de cette carte. Le dévelopement d'un algorithme de lissage permettrait de simplifier la visualisation des

résultats obtenus par Traclus_DL et de diminuer le temps de travail sachant que la production des résultats finaux (smoothing) doit s'effectuer manuellement.

Un des concepts trouvés dans la littérature qui permettrait de créer la base d'un outil de lissage automatisé est le concept de carroyage.

2.6 Concept de carroyage

Le carroyage est défini comme étant « un modèle de représentation de l'information géographique » (Lajoie, Landa, & Langlois, 1989). Il consiste à tout simplement croiser des données à analyser avec une grille. Il n'améliore pas explicitement la précision des données, mais il aide grandement à l'interprétation des résultats obtenus en termes de distribution spatiale (Dalvi et al., 2006). Selon plusieurs auteurs, le carroyage apporte une certaine homogénéité aux résultats et permet une visualisation facile, mais surtout une comparaison à même échelle de résultats de même dimension ou non (Lajoie, 1992; Rajerison, 2012a). Ainsi, les maillages obtenus peuvent être confrontés à eux-mêmes (ex. un carreau par rapport à son voisin), à des niveaux temporels différents (ex. un carreau par rapport à son homologue antérieur) ou encore sur des niveaux multidimensionnels (ex. un carreau de demande par rapport à son homologue de l'offre) (Rajerison, 2012b).

C'est un concept utilisé dans plusieurs domaines pour faciliter l'analyse de résultats. Il est retrouvé par exemple :

- En structure pour l'analyse de déplacements et de contraintes (Grediac, Sur, & Blaysat, 2016);
- En environnement pour l'étude des émissions de polluants (Dalvi et al., 2006);
- En botanique pour le recensement d'espèces végétales (Perring & Walters, 1962);
- En étude interurbaine pour le suivi de l'occupation de l'espace (Guermond & Lajoie, 1991).

Ainsi, pourquoi ne pas l'utiliser pour faciliter la production des résultats finaux de Traclus_DL ? La transformation des corridors de demande sous forme de grille permet de simplifier la visualisation des résultats obtenus et donne une possibilité de comparer la demande et l'offre (analyse de multidimensionnelle).

Les deux points à considérer lors de la conception d'une grille qui influencent les résultats au niveau statistique et au niveau de la représentation cartographique sont la forme et la taille des mailles.

Forme des mailles

Il existe deux formes courantes pour effectuer des analyses par maille (Badey, 2017) :

- Carré

  C'est la forme la plus simple. Cette forme de mailles est plus utilisée pour des études sur des terrains archéologiques.

- Hexagonale

  Cette forme de maille est plus adaptée pour le type d'étude souhaité (domaine des transports). En lisant plusieurs articles dans la littérature, la forme hexagonale apporte certains avantages. Les deux principales sont :

  - Le pavage hexagonal est la division du plan en surfaces égales ayant le plus petit périmètre, ce qui est un découpage idéal de l'aire étudiée (optimum iso périmétrique) (Badey, 2017).
  - En comparaison à une maille carrée, la distance entre le centre de chaque maille hexagonale et le centre de toutes les 6 mailles adjacentes est la même (Badey, 2017), ce qui permet d'avoir une meilleure constance au niveau de la répartition des corridors.

Tailles des mailles

L'unité de base d'un carroyage est un élément déterminant dans la justesse des résultats. Une maille trop étendue absorbe l'ensemble de l'information et engendre une trop grande simplification (Badey, 2017). Dans l'exagération, la perte d'information est maximale lorsque le nombre de mailles est égal à 1 et décroit linéairement avec l'augmentation de la quantité des mailles utilisée. À l'opposé, la perte d'information est nulle lorsque la résolution atteint celle de l'information de base (maillage infiniment petit) (Lajoie, 1992). Cependant, il faut qu'elle soit assez grosse pour permettre une bonne visualisation des résultats. La difficulté est au niveau du choix du nombre de mailles ou de la grosseur de celles-ci.

Dans la littérature, il n'y a pas de méthodes exactes pour déterminer une taille optimale. Il faut utiliser la méthode d'essai erreur (mesurer la sensibilité des résultats en fonction de la taille choisie) et trouver la taille de mailles qui convient à l'étude réalisée (Lajoie, 1992). Les cartes qui suivent présentent, pour une même étude, trois tailles de mailles différentes.

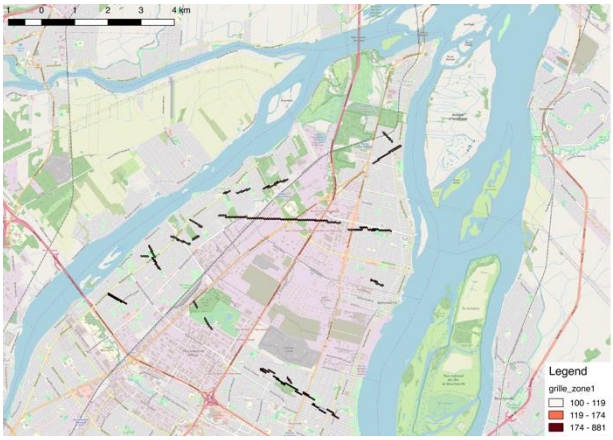


Figure 2-10: Exemple de grille de désir (mailles de 20 mètres de largeur).

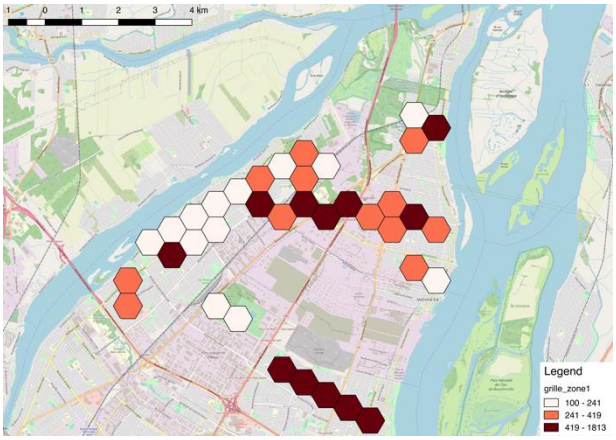


Figure 2-11: Exemple de grilles de désir (mailles de 500 mètres de largeur).

Figure 2-12: Exemple de grille de désir (mailles de 100 mètres de largeur)

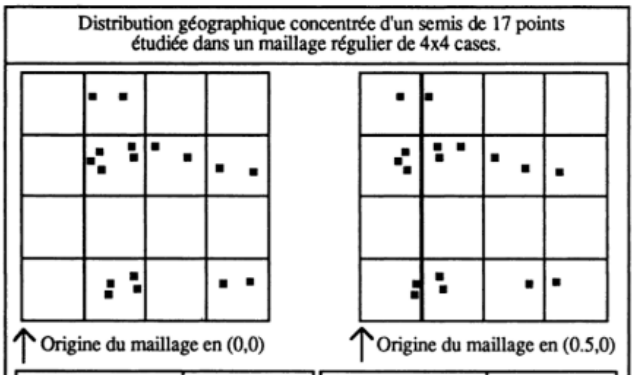
En analysant ces 3 cartes, il est possible de réaliser que :

- Des mailles de 20 mètres de large ne permettent pas une bonne visualisation des résultats (Figure 2-10);
- Des mailles de 500 mètres de large engendrent une perte d'information (Figure 2-11);

- Des mailles de 100 mètres de large permettent d'avoir un compromis entre une bonne visualisation et une précision adéquate des résultats (Figure 2-12).

Il est important de mentionner qu'il existe, dans la littérature, des études qui utilisent des mailles à tailles variables en fonction de la densité d'observation. Cependant, une telle méthode n'est pas appropriée dans ce contexte puisque des tailles variables rendent difficile la comparaison des résultats (une maille par rapport à une autre, une maille par rapport à elle-même dans le temps ou au niveau multidimensionnel).

Une autre des difficultés d'un maillage (grille) est sa localisation. Celle-ci affecte la manière dont la distribution des entités à l'étude est effectuée et peut ainsi causer des difficultés au niveau d'une étude de distribution due à la variabilité de positionnement (Lajoie, 1992). L'auteur présente un exemple pour illustrer cette problématique. Il est présenté à la Figure 2-13.



Nombre de points par maille	Fréquence observée
0	10
1	0
2	4
3	0
4	1
5	1

Nombre de points par maille	Fréquence observée
0	6
1	5
2	3
3	2
4	0
5	0

Figure 2-13: Influence de la localisation d'un maillage sur la distribution des entités étudiées (Lajoie, 1992).

Cette difficulté est abordée en insérant un système de zonage lors de la création des grilles. L'ensemble des détails de cette méthode est expliqué au sous-chapitre 3.4.1. De plus, il est possible d'imaginer qu'il pourrait y avoir une problématique au niveau du poids individuel de chaque maille. Ce problème se pose moins parce qu'ici les entités examinées sont des segments et une hypothèse de continuité de distribution est utilisée. Ce dernier point est aussi expliqué dans le sous-chapitre 3.4.1.

Ainsi lors de ce projet, un outil de lissage automatisé (Grille_CR) qui utilise ce concept de carroayge est mis en place.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

3.1 Mise en contexte

Avant de présenter la méthodologie, il est important de présenter l'enquête Origine-Destination (O-D) puisqu'elle est utilisée à plusieurs reprises au cours de ce mémoire. L'enquête O-D est une enquête descriptive qui caractérise les habitudes de déplacements des personnes pour un territoire donné (Transport_Québec, 2013). Elle couvre environ 5% à 15% du nombre total de ménages se trouvant dans la zone d'étude. Elle est généralement réalisée en automne.

Pour toutes paires OD (Origine/Destination) cartographiées, il est souvent difficile de les comprendre et de les analyser. Si comme exemple, des déplacements de l'enquête Origine-Destination 2013 d'une certaine zone sont cartographiés, le résultat est un fouillis non interprétable de lignes. La Figure 3-1 en montre un exemple.

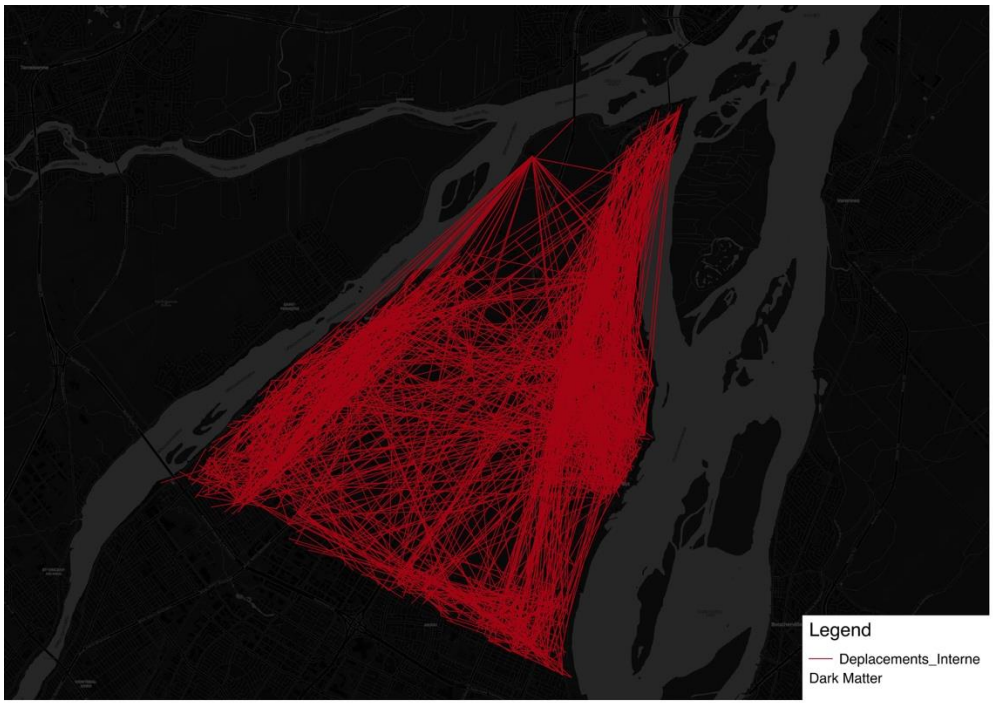


Figure 3-1: Déplacements internes (tout mode, excluant motif : retour au domicile) à la zone d'étude

Bien qu'on arrive à identifier certaines densités de lignes, il est difficile d'aller plus loin avec ce type de représentation, d'où l'utilité de Traclus_DL. Comme expliqué dans la revue de littérature, cet algorithme permet d'effectuer un regroupement spatial de lignes de désir similaires en corridors.

Ainsi, le sous-chapitre 3.2 au sous-chapitre 3.4 présentent le fonctionnement de Traclus_DL, la méthode à suivre pour effectuer le choix de ses paramètres, les améliorations apportées à ce programme ainsi que le fonctionnement de la méthode de lissage automatisée créée (Grille_CR). La Figure 3-2 schématise le processus global :

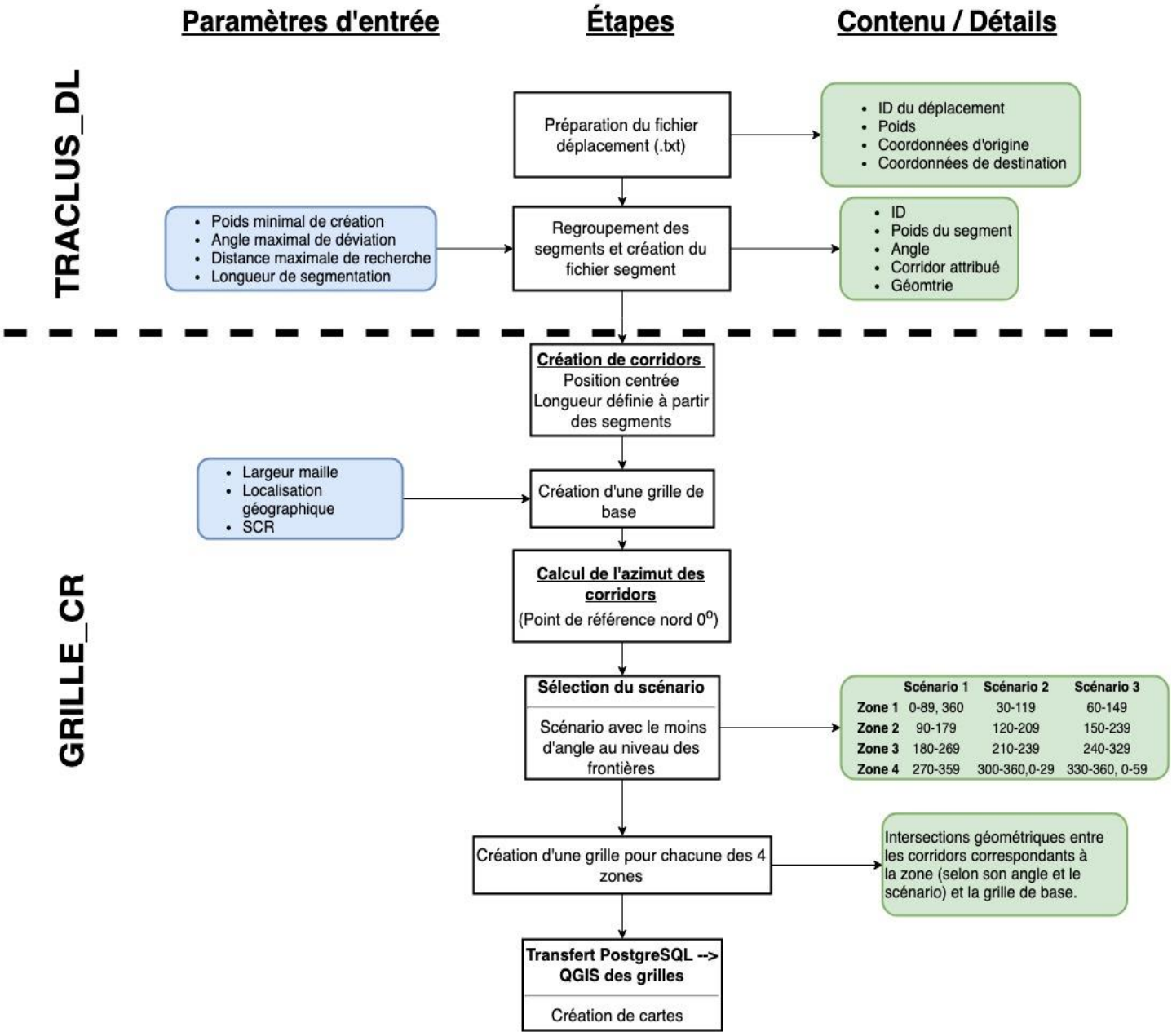


Figure 3-2: Schéma conceptuel de la création de grilles de désir

Pour mieux comprendre l'ensemble de ce schéma, chaque étape est présentée individuellement :

3.2 Mode de fonctionnement général de Traclus_DL

Traclus_Dl nécéssite 4 paramètres qui sont : la distance de recherche, l'angle maximal de déviation, le poids minimal de création et la longueur de segmentation. Chacun de ces paramètres est expliqué de la manière suivante :

Distance maximale de recherche (rayon initial de recherche)

Ce paramètre définit le rayon de recherche autour de chaque corridor potentiel. Cette zone de recherche de segments similaires est extensible et est basée sur un algorithme dénommé « Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) » (Bahbouh, 2017). Cet algorithme a été adapté par Bahbouh pour le contexte de Traclus_DL. Le fonctionnement de cette méthode de recherche est expliqué en détail au sous-chapitre 3.2.

Angle maximal de déviation

Cette valeur représente l'angle maximal qu'il peut y avoir entre la direction du corridor et le segment d'un déplacement (Bahbouh, 2017). C'est ce paramètre qui est l'équivalent du niveau de similarité (ε) dans Traclus. En gros, il s'assure qu'il existe une similarité entre les segments de déplacements regroupés en se fiant à la valeur de l'angle entre ceux-ci. Ce paramètre a été choisi comme critère de similitudes parce que dans la littérature, la caractéristique principale de la linéarité est définie comme étant « son sens caractéristique par rapport aux points cardinaux » (Reiss et al., 2006) tel que cité par (Bahbouh, 2017).

Il est pris comme hypothèse que deux segments appartenant à un même corridor ne peuvent pas avoir une différence d'angle supérieure à 45° (Bahbouh, 2017). Ainsi, la valeur maximale qui peut être attribuée à ce paramètre est de 22,5°. Une reproduction de l'esquisse utilisée par l'inventeur de Traclus_DL pour expliquer ce paramètre est présentée à la Figure 3-3.

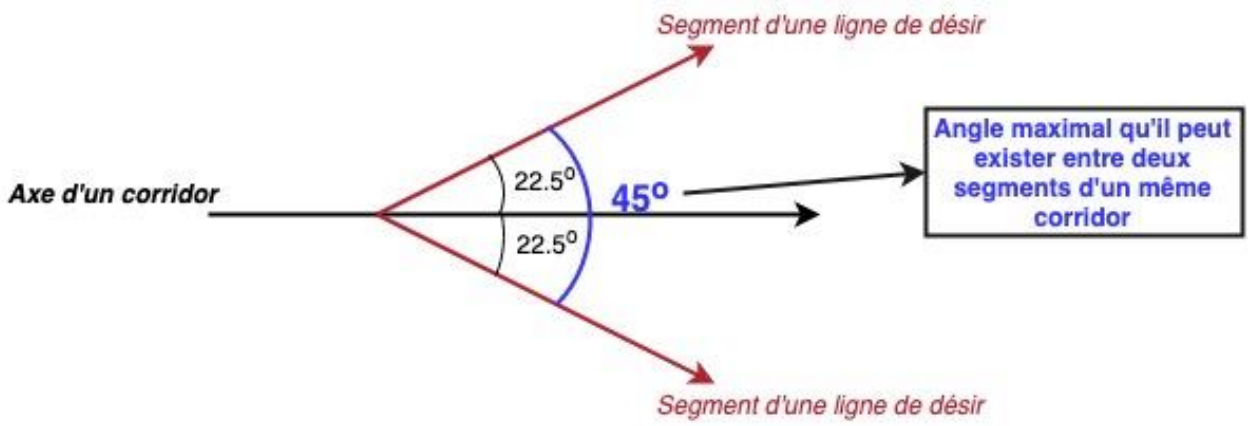


Figure 3-3: Angle maximum entre un corridor de demande et des lignes de désirs (selon : Bahbouh, 2017)

Poids minimum de création

La valeur attribuée à ce paramètre correspond au nombre minimal d'observations qui doit se trouver dans le rayon de recherche pour qu'un corridor soit créé (Bahbouh, 2017). Il a la même fonction que le paramètre « MinLns » de Traclus. Cependant, il est beaucoup mieux adapté au domaine des transports. En effet, la planification des transports est souvent réalisée en utilisant des enquêtes (ex. l'enquête Origine-Destination). Celles-ci sont généralement effectuées sur un échantillon de la population et font donc appel à des facteurs de pondération pour que soit représentée la population dans son ensemble (Bahbouh, 2017). Lorsqu'il y a des facteurs de pondération à prendre en compte, le problème avec l'utilisation d'un ensemble de segments (« MinLns ») est que le corridor conçu regroupe un nombre inconnu de déplacements jusqu'à création. Ainsi ce paramètre permet de facilement spécifier un nombre représentant le poids d'un ensemble de lignes de désir et non pas une quantité de ligne de désir.

Longueur de segmentation

Comme expliquer dans la section précédente, Traclus effectue sa segmentation en se fiant au changement de vitesse ou de directions (El Mahrsi, 2011). Ainsi, pour faciliter la segmentation de lignes de désir, l'inventeur de Traclus_DL a mis en place ce paramètre qui fixe une distance de découpage. Les segments créés gardent les caractéristiques de la ligne de désir dont ils proviennent

(ex. facteur de pondération, mode utilisé pour le déplacement, motif du déplacement …) (Bahbouh, 2017).

Préparation du fichier de déplacements pour Traclus_DL

Traclus_DL nécessite comme entrée un fichier « .txt » qui contient les champs suivants :

- ID du déplacement (1)
- Facteur d'expansion (2)
- Coordonnée X origine (3)
- Coordonnée Y origine (4)
- Coordonnée X destination (5)
- Coordonnée Y destination (6)

De plus, il faut spécifier au logiciel les 4 paramètres présentés juste avant:

Définir adéquatement quelle valeur utiliser pour chacun de ces 4 paramètres est la difficulté au niveau de l'utilisation de Traclus_DL. Pour chaque paramètre, une analyse et une réflexion sont faites pour s'assurer d'utiliser des valeurs adéquates selon l'étude souhaitée. Cependant, avant de parler du choix des paramètres, il faut comprendre comment Traclus_DL fonctionne.

L'inventeur de Traclus_DL le définit comme étant un algorithme de regroupement spatial par densité permettant d'identifier des corridors à partir de données désagrégées (Bahbouh, 2017).

Un des sous-algorithmes que Traclus_DL utilise est DBSCAN (Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise). DBSCAN est un algorithme de regroupement qui permet d'identifier les lieux où il y a un nombre minimal de points pour une distance donnée (Ester, Kriegel, Sander, & Xu, 1996).

Pour pouvoir être utilisé dans Traclus_DL, l'algorithme DBSCAN a été modifié pour gérer les segments de droites et non des points. Pour comprendre comment fonctionne Traclus_DL, il faut comprendre le fonctionnement de DBSCAN-seg.

L'algorithme de Traclus_DL est divisé en trois grandes étapes, le prétraitement des données, le traitement par DBSCAN-seg et l'assignation finale aux corridors (Bahbouh, 2017).

Prétraitement

La première étape consiste à lire chaque observation dans le fichier d'entrée et par la suite à les diviser en segments. La longueur des segments est déterminée en fonction du paramètre « Longueur de segmentation ».

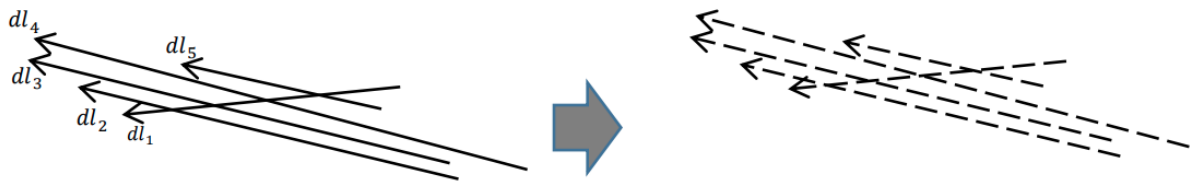


Figure 3-4: Division des observations en segments (Bahbouh, 2017).

<u>Traitement par DBSCAN-seg</u>

Cette partie est la partie la plus complexe de Traclus_DL.

Initialement, DBSCAN-seg considère séquentiellement chaque segment d'observation comme un lieu de regroupement possible (« cluster seed »). Par exemple, s'il y a 4 segments, chacun de ces 4 segments sera considéré comme un corridor (regroupement de segments d'observations similaires) potentiel.

Un des segments est choisi au hasard pour débuter le processus. Par la suite, l'algorithme calcule la distance minimale entre le point centre du corridor potentiel et de tous les segments des lignes de désir qui forment, avec ce « cluster seed », un angle inférieur à l'angle maximal de déviation. Si cette distance est inférieure à la distance maximale de recherche, les segments de chaque ligne de désir ayant le point le plus proche sont ajoutés au corridor potentiel. Pour mieux comprendre ce dernier point, la Figure 3-5 illustre un exemple.

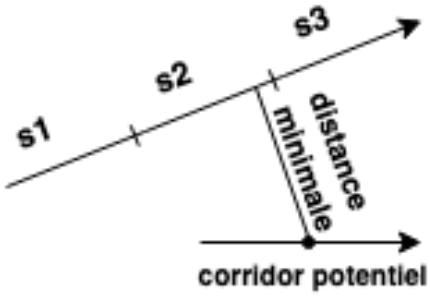


Figure 3-5: Assignation d'un segment d'une ligne de désir à un corridor potentiel

En supposant dans la Figure 3-5 que l'ensemble des critères sont respectés (angle maximal de déviation et distance maximale de recherche), c'est le segment 2 (s2) qui est ajouté au corridor potentiel parce que le point le plus proche de cette ligne de désir appartient à son deuxième segment (s2).

Avec un tel critère, un seul segment peut contribuer à un corridor et on évite ainsi le double comptage d'une ligne de désir dans un corridor.

L'algorithme calcule le poids total de l'ensemble des segments se trouvant dans le rayon de recherche du corridor potentiel. Si celui-ci est supérieur au poids minimal de création (paramètre initial) spécifié, le lieu de recherche est élargi sinon le corridor potentiel est écarté. Le lieu de recherche est élargi par une sous-fonction dénommée « Cluster Expansion subfonction ». Cette expansion de zone de recherche est effectuée à partir des segments assignés au corridor potentiel lors de l'itération précédente. Un cercle de rayon égal à la distance maximale de recherche est tracé autour de tous ces segments. Si le poids des segments se trouvant dans cette nouvelle zone est supérieur au poids minimum de création, ceux-ci (nouveaux sets de segments) sont ajoutés au corridor potentiel et la zone de recherche est encore une fois élargie. Il est important de spécifier que le critère d'angle est toujours vérifié par rapport au corridor potentiel (« cluster seed »). La meilleure façon de comprendre est avec un exemple et la Figure 3-6 en illustre un.

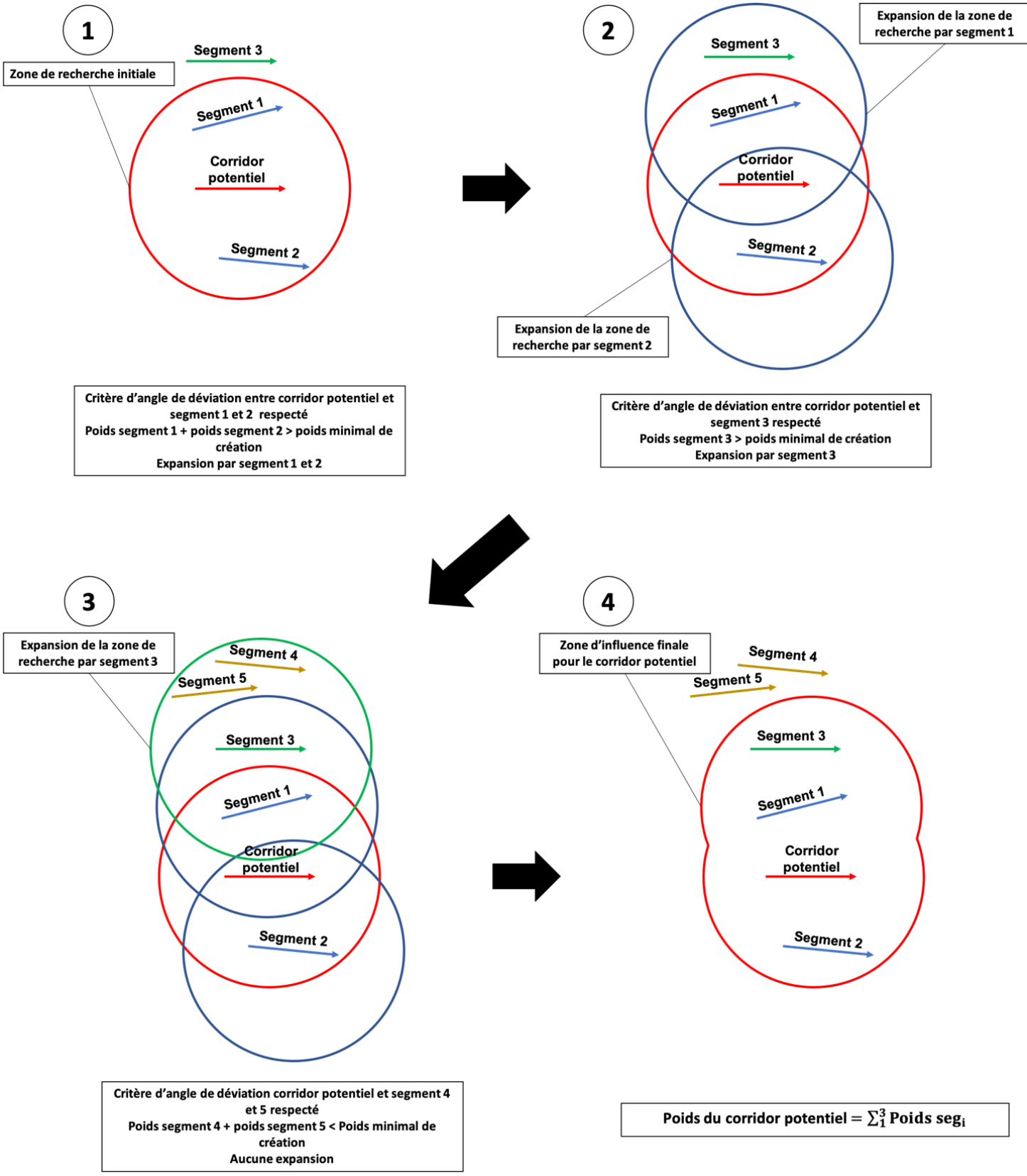


Figure 3-6: Expansion de la zone de recherche (exemple)

Dans la Figure 3-6, le corridor potentiel a initialement 2 segments dans sa zone de recherche. L'angle entre ces 2 segments et le corridor potentiel est respecté. Comme la somme de ces 2 segments (segments bleus) est supérieure au poids minimal de création, la zone de recherche est élargie. Celle-ci est élargie en traçant un cercle autour du centre de chacun de ces segments avec comme rayon la distance maximale de recherche prédéfinie (paramètre initial). Dans le cercle provenant du segment 1, il y a un segment, segment 3, qui respecte les critères de ressemblance au corridor potentiel et a un poids supérieur au poids minimal de création. Il est donc assimilé au corridor potentiel et la zone de recherche continue d'être élargie à partir de ce segment. Du côté du segment 2, il n'y a aucun segment donc il n'y a pas d'expansion de ce côté. Le processus continue du côté du segment 3, mais dans son rayon de recherche, le poids des segments (segment 4 et 5) s'y trouvant est inférieur au poids minimal de création donc ceux-ci ne sont pas assignés au corridor potentiel et il n'y a pas d'expansion de la zone de recherche. Ainsi, le corridor potentiel est composé des segments 1, 2 et 3 avec le poids du corridor potentiel égal à la somme du poids des segments 1 à 3.

Ce même processus est effectué pour chaque segment de manière indépendante. C'est-à-dire que chaque segment est considéré comme corridor potentiel et tout segment respectant l'ensemble des critères peut être assigné au corridor potentiel même s'ils avaient été assignés à un corridor potentiel précédent.

Par la suite, Traclus_DL passe à la dernière étape, l'assignation finale des segments aux corridors potentiels.

Assignation des segments aux corridors potentiels

L'ensemble des corridors potentiels créés sont rangés en ordre croissant. Il faut rappeler que pour qu'un corridor soit considéré comme corridor potentiel, il faut que son poids total soit supérieur au poids minimal de création. Le corridor potentiel le plus significatif (poids le plus élevé) est considéré comme le premier corridor final. Par la suite, l'ensemble des segments lui appartenant sont retirés de tous les corridors qui le suivent. Le poids de tous les corridors est recalculé. L'assignation se poursuit jusqu'au dernier corridor potentiel. Tout corridor potentiel ayant un poids inférieur au poids minimum de création est écarté. Un exemple est illustré à la Figure 3-7.

Poids minimum de création	Poids segment: 4, 25, 32	Poids segment: 11, 30, 31, 40	Poids segment: 27, 33
40	50	25	20

Position du corridor potentiel	Poids du corridor potentiel	Segments y appartenant
1	200	4, 11, 25, 30, 32
2	145	4, 11, 27, 31, 40
3	70	11, 31, 33

Position du corridor potentiel	Poids du corridor potentiel	Segments y appartenant
1	200	4, 11, 25, 30, 32
2	70	~~4~~, ~~11~~, 27, 31, 40
3	20	~~11~~, ~~31~~, 33

Corridor final	Poids du corridor	Segments y appartenant
1	200	4, 11, 25, 30, 32
2	70	27, 31, 40

Figure 3-7: Exemple d'assignation finale des corridors.

Dans l'exemple présenté à la Figure 3-7, il y a trois corridors potentiels qui ont été créés par le traitement de DBSCAN-seg. Lors de l'assignation finale, le corridor 3 est écarté puisqu'après redistribution des segments (tout segment ne peut être assimilé qu'à un seul corridor) son poids diminue à une valeur inférieure au poids minimum de création (40).

Traclus_DL produit deux fichiers « .csv » :

1. **Un fichier corridor**

Ce premier fichier « .csv » comprend l'ensemble des corridors de déplacements créés par Traclus_DL. Chaque corridor est renseigné par son ID, son poids ($\sum facteur\ de\ pondération\ des\ segments_{\ i}$) et sa géométrie.

2. **Un fichier segment**

Ce deuxième fichier « .csv » comprend l'ensemble des segments de lignes de désir (subdivision de chaque déplacement en petits segments de même longueur). Chaque segment est identifié par l'ID de son déplacement d'origine, son facteur de pondération (similaire au déplacement d'origine), son angle (angle du déplacement initial), le corridor auquel il est assigné et sa géométrie. Un facteur de « -1 » assigné au champ corridor d'un segment signifie que celui-ci n'a pas été assigné à un corridor. C'est ce fichier qui doit par la suite être utilisé comme entrée pour la création des grilles de désir.

Ceci complète l'explication du fonctionnement de Traclus_DL dans son ensemble. Si plus de détails sont souhaités, il est possible de consulter la thèse de Bahbouh (Bahbouh, 2017). Maintenant, il est possible de passer à la question du choix des paramètres adéquats.

3.3 Comment choisir les paramètres de Traclus_DL?

Il faut dire qu'il n'y a pas de bons ou de mauvais paramètres. Ils dépendent principalement du type d'étude que l'utilisateur souhaite effectuer. Cette section décrit principalement une méthode de choix de paramètres pour une étude de lignes de désir de déplacements en bus qui se trouvent dans une région urbaine plus précisément une région qui possède une bonne densité de déplacements comme Montréal ou encore Laval. Ces paramètres permettront d'obtenir des résultats avec une bonne granularité.

Longueur de la segmentation

Comme expliqué au sous-chapitre 2.5, la longueur de segmentation définit la longueur de chaque subdivision d'une observation et de la longueur des corridors créés.

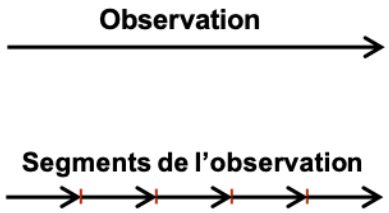


Figure 3-8: Exemple d'une subdivision d'une observation

Le concepteur de Traclus_DL a fait un choix de prolonger tout segment inférieur à la longueur de segmentation. Cependant, une erreur peut être engendrée par l'effet que ce paramètre peut avoir. En effet, pour atteindre une mesure équivalente à celle de la longueur de segmentation, Traclus_DL effectue une extrapolation (i.e. un prolongement) de tout segment ou observation ayant une longueur inférieure à ce paramètre.

Par exemple, si comme paramètre d'entrée, une longueur de segmentation de 2 400 mètres est choisie et qu'un déplacement de 800 mètres se trouve dans le fichier de déplacement d'entrée, celui-ci est prolongé jusqu'à atteindre une longueur de 2 400 mètres. De même, un déplacement de 5 000 mètres sera subdivisé en 3 segments de 2 400 mètres tandis qu'il devrait être subdivisé en 2 segments de 2 400 mètres et un segment de 200 mètres.

La Figure 3-9 présente quelques exemples. Cette figure a été produite en utilisant quelques déplacements de l'enquête O-D de la zone à l'étude inférieure à une longueur de segmentation égale à 2400 mètres.

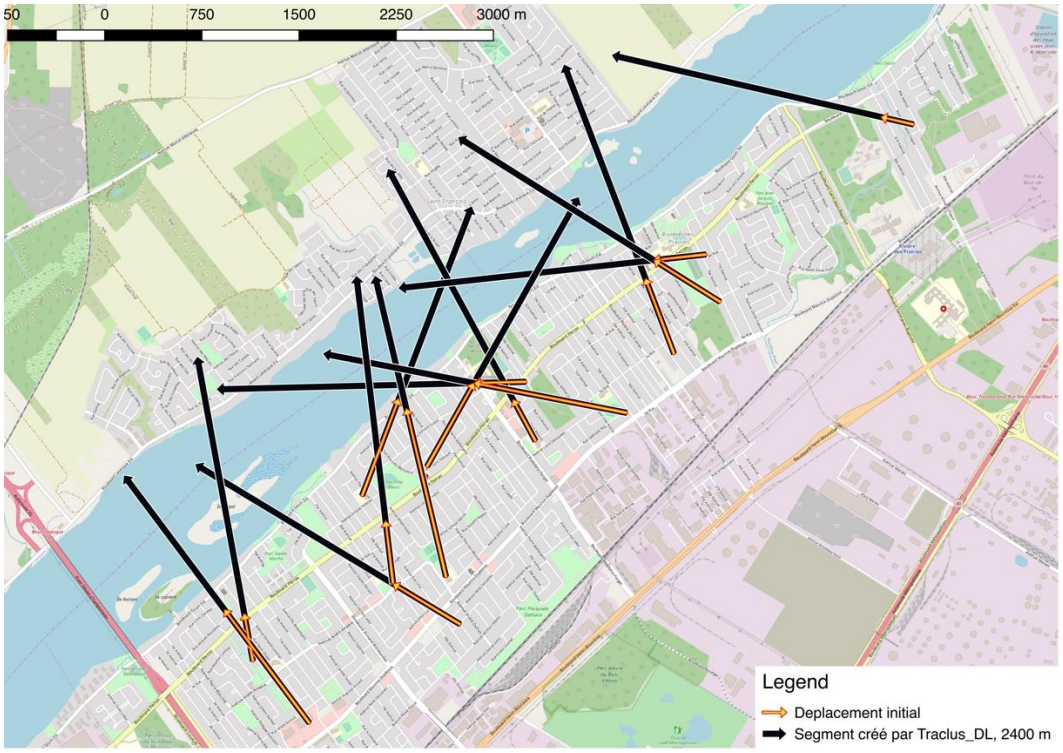


Figure 3-9: Exemple de prolongement des déplacements par Traclus_DL pour atteindre la longueur de segmentation (2400 mètres).

La modification de la longueur réelle des lignes de désir risque d'engendrer de grosses erreurs au niveau de l'analyse des résultats surtout si des corridors en découlent.

Pour y remédier, de nombreux changements sont apportés au script python des codes initiaux de Traclus_DL (Traclus_DL.py et Trajectory.py). La modification principale peut se résumer à la ligne suivante : si la ligne de désir ou le dernier segment de celle-ci a une distance inférieure à la longueur de segmentation utilisée comme paramètre initial, alors la distance reste la même et n'est pas prolongée. La Figure 3-10 présente les mêmes lignes de désir utilisées pour produire la Figure 3-9, mais cette fois-ci le code modifié de Traclus_DL est utilisé pour produire les segments de déplacements.

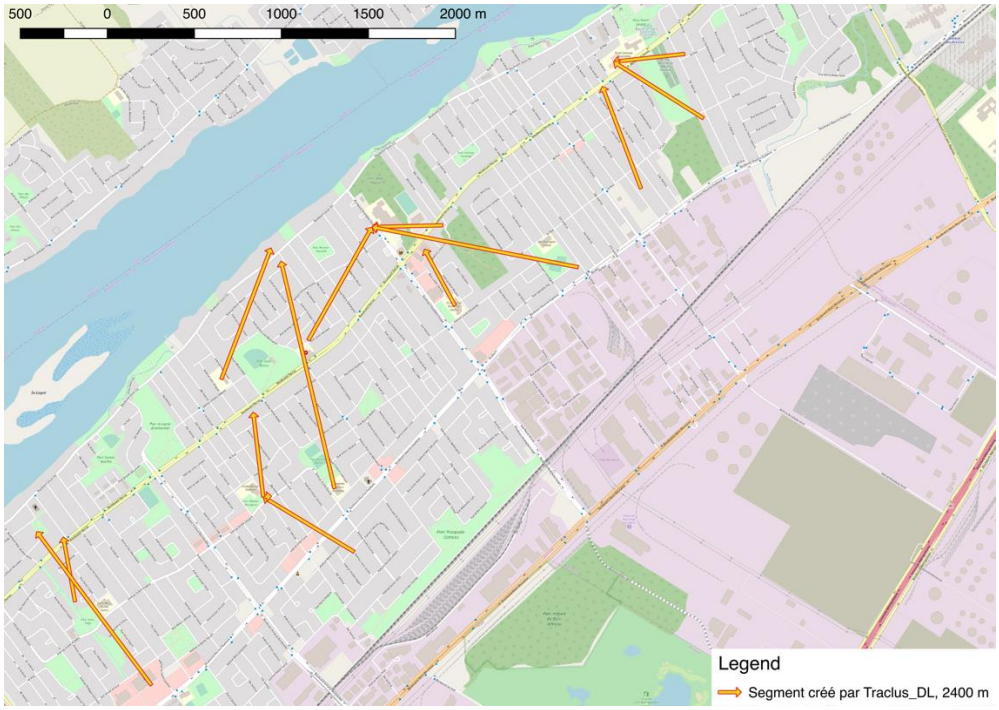


Figure 3-10: Exemple de segments créés par la version modifiée de Traclus_DL.

Comme il est possible de voir dans la Figure 3-10, aucun prolongement n'est effectué pour atteindre la longueur de segmentation de 2400 mètres. Ainsi cette nouvelle version de Traclus_DL ne déforme pas la réalité et conserve la longueur réelle des observations.

Par la même occasion, quelques lignes de codes sont ajoutées pour avoir une horloge interne permettant aux utilisateurs de connaitre le temps de calcul de chaque roulement et un pourcentage d'avancement du programme.

Pour l'ensemble des figures produites par la suite et des études effectuées, la nouvelle version de Traclus_DL est utilisée.

En se penchant à nouveau sur le choix de la longueur de segmentation, la Figure 3-11 présente un exemple de deux cartes côte à côte permettant de visualiser le type de corridors créés pour deux différentes longueurs de segmentation, soit 200 mètres et 1 200 mètres. Pour créer ces deux cartes, les déplacements utilisés sont ceux entre 7h00 et 8h30 de la zone présentée à la Figure 3-1.

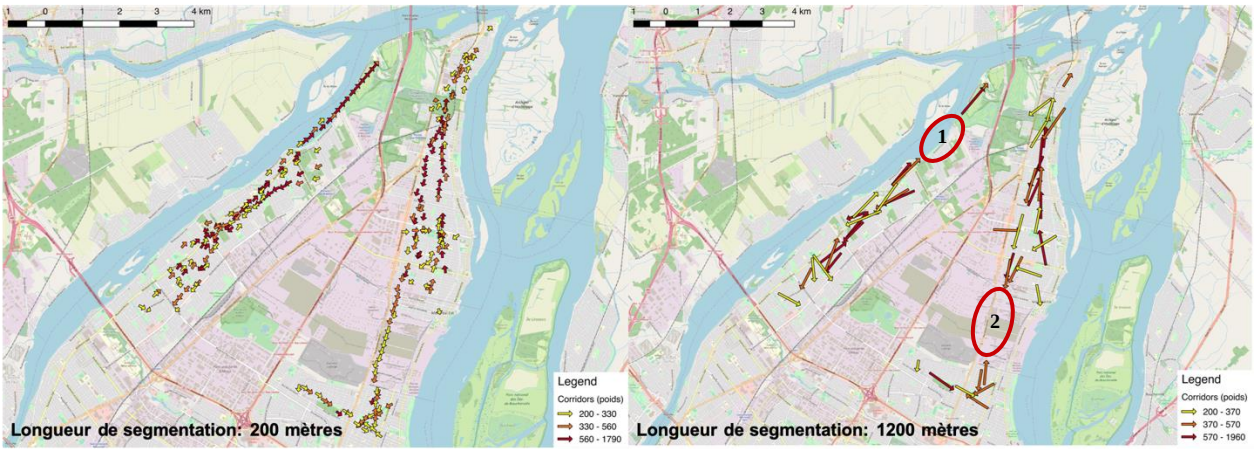


Figure 3-11: Comparaison de corridors créés en fonction de la longueur de segmentation (200 m vs 1200m). Autres paramètres: distance maximale de recherche 400 m, poids minimal 200 déplacements pondérés et angle maximal de déviation 15°.

En comparant les deux cartes à la Figure 3-11, il est possible de remarquer qu'il y a une perte d'information lorsque la longueur de segmentation est trop grande. Les deux cercles rouges retrouvés à la Figure 3-11 indiquent un exemple de zone où il y a une perte d'information. La raison de cette perte de détails est que lorsqu'un segment a une longueur très élevée, celui-ci risque d'être intercepté par un corridor éloigné (intercepté : segment se trouvant dans la zone de recherche initiale ou l'expansion de celle-ci). Pour mieux comprendre cette dernière explication, la Figure 3-12 présente un exemple qui se concentre sur la zone 1 de la Figure 3-11.

Figure 3-12: Segments (flèches vertes) assignés à un corridor (flèche rouge).

En analysant la Figure 3-12, il est possible de remarquer que la plupart des segments se trouvant dans la zone 1 de la Figure 3-11 sont assignés à un corridor (flèche rouge) assez reculé. Sachant qu'un segment ne peut être assigné qu'à un seul corridor, ce type de regroupement éloigné crée des trous d'information (ex. zone 1 et 2 de la Figure 3-11). Ainsi après plusieurs tests et vérifications, la longueur de segmentation à favoriser se situe dans la plage de 5% à 15% de la longueur moyenne pondérée des déplacements pour étude qui recherche à produire des corridors avec une bonne granularité.

Il est important de spécifier que plus la longueur de segmentation est petite, plus le temps de calcul est grand. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'un plus grand nombre de segments seront produits. L'algorithme de création de corridors aura ainsi un plus grand nombre d'entités à vérifier. Par exemple pour le même fichier de 991 lignes de désir (déplacements entre 7h00 AM et 8h30 AM dans la zone d'étude) qui a permis la création des cartes présentées à la Figure 3-11, une longueur de segmentation de 200 mètres produit 9 782 segments de déplacements, tandis qu'une longueur de segmentation de 100 mètres produit 19 065 segments de déplacements ce qui revient à effectuer une analyse sur 2 fois plus de segments de déplacements.

La Figure 3-13 présente l'effet que peut avoir le choix de la longueur de segmentation sur le temps de calcul.

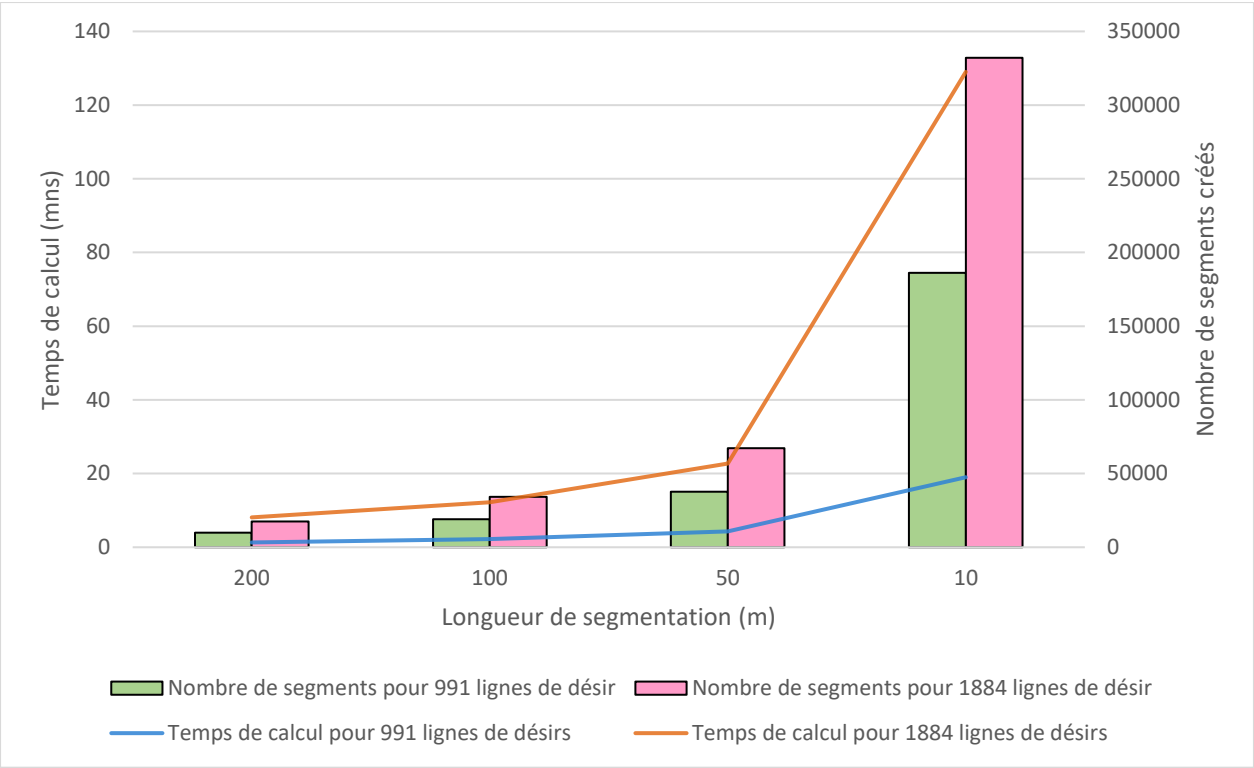


Figure 3-13: Effet de la longueur de segmentation sur le temps de calcul

Il est possible de remarquer que plus la longueur de segmentation est petite, plus le temps de calcul est élevé. Celui-ci augmente de manière exponentielle lorsque la quantité de lignes de désir augmente.

Distance maximale de recherche

La distance maximale de recherche est le paramètre le plus complexe à déterminer dû à l'expansion engendrée par l'algorithme DBSCAN-seg. Comme expliqué, ce paramètre représente le rayon de recherche autour des corridors potentiels et des segments où il y a expansion.

Dans le contexte d'une anlayse de réseau de transport en commun, il est pris comme hypothèse que tous les segments appartenant à un même corridor doivent être à une distance de marche les uns des autres. Celle-ci peut faire allusion à une distance de marche acceptable à un arrêt de bus.

Ainsi la première étape consiste à déterminer une distance de marche à vol d'oiseau acceptable.

Tout d'abord, il faut connaitre la vitesse de marche et le temps de marche acceptable. Dans la littérature, la vitesse de marche moyenne d'un être humain varie entre 4 km/h et 5 km/h (Wikipédia, 2019b). Cependant, cette vitesse de marche varie selon la classe de population étudiée (ex.

personne âgée) et doit être ainsi prise en considération lors des calculs (Montufar, Arango, Porter, & Nakagawa, 2007). Le temps de marche acceptable est à la discrétion de l'utilisateur. Il n'y a pas une valeur fixe et il varie encore une fois en fonction du type de population étudiée (ex. le temps de marche des personnes âgées est différent de celui des adolescents).

La prochaine étape consiste à déterminer la tortuosité du lieu d'étude. Pour avoir une idée de la tortuosité de la zone voulue, il est possible d'utiliser les déplacements recensés dans une enquête (ex. Enquête Origine-Destination). Après le calcul de la tortuosité de chaque trajet, on peut effectuer une distribution pondérée et choisir la valeur où la concentration est la plus élevée.

À l'aide de ces 3 informations, il est possible de déterminer, grâce aux formules suivantes, une distance de marche à vol d'oiseau acceptable qui équivaut à la distance acceptable entre les 2 segments les plus éloignés d'un même corridor :

$$Distance\ réseau\ acceptable = Temps\ de\ marche\ acceptable * Vitesse\ de\ marche$$

$$Distance\ \text{à}\ vol\ d'oiseau\ acceptable = \frac{Distance\ réseau\ acceptable}{Tortuosité}$$

Cette distance permet de juger à la fin de l'analyse si la distance de recherche choisie est adéquate ou non.

Il n'y a pas une valeur généralisée qui peut être utilisée au niveau de toutes les études. Ce paramètre est extrêmement volatile et varie en fonction du poids minimal de création et de la distribution des entités analysées. Ainsi pour choisir ce paramètre, il est incontournable de faire une analyse de sensibilité.

Pour déterminer si la distance de recherche choisie est adéquate, il y a trois paramètres à analyser : la longueur et la largeur du polygone convexe autour de chaque groupe de segment (segments d'un même corridor) et le pourcentage de segments pondérés non assignés à un corridor. Le polygone convexe de regroupement correspond au polygone à distance minimale créé autour des segments appartenant à un même corridor. Un exemple est présenté à la Figure 3-14.

Figure 3-14: Exemple d'un polygone convexe regroupant les segments appartenant à un même corridor

Un tel polygone peut être construit en utilisant la fonction « Convex hull » sur QGIS. De plus, il est possible de calculer à l'aide du champ de calcul (fonction de QGIS):

- La longueur des polygones (distance entre les points les plus éloignés du côté le plus long) : $bound\ height\ (\$geometry)$
- La largeur des polygones (distance entre les points les plus éloignés du côté le plus court; perpendiculaire à la longueur) : $bound\ width\ (\$geometry)$

Après avoir effectué de nombreux scénarios, la tendance de variation de la distance de recherche peut être présentée comme suit.

Une distance de recherche élevée combinée à un poids minimal de création faible engendre :

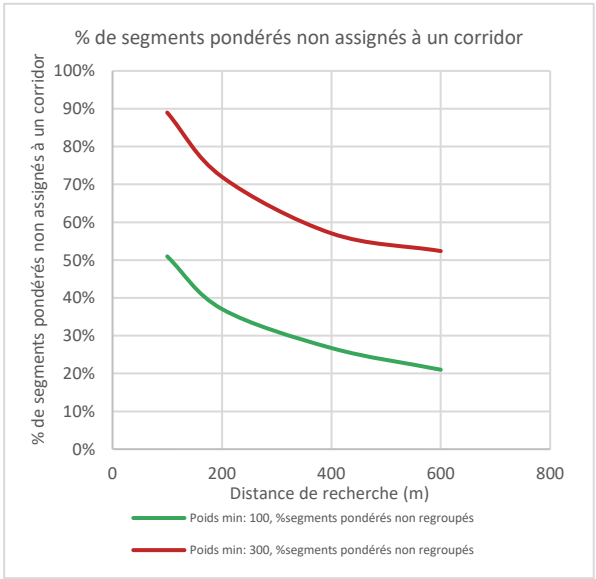
- Un plus faible pourcentage de segments pondérés non assignés à un corridor;
- Une longueur maximale des polygones convexes créés plus élevée;
- Une largeur maximale des polygones convexes créés plus élevée;
- Une longueur moyenne des polygones convexes plus faible;
- Une largeur moyenne des polygones convexes créés plus faible.

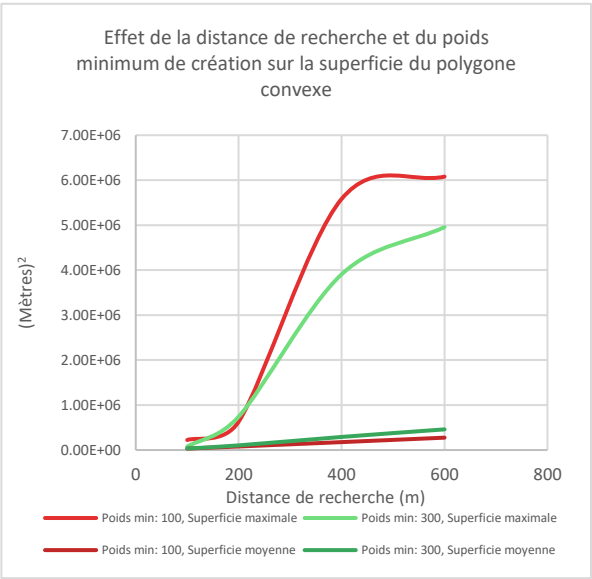
Cette opposition qui existe entre les distances (longueur et largeur) maximales élevées et les distances moyennes plus faibles se comprend en prenant en considération le fonctionnement de l'algorithme DBSCAN-seg (se référer à l'explication sur l'assignation des segments aux corridors potentiels au sous chapitre 3.2). En effet, lors de leur création, les corridors les plus lourds ont à leur disposition la plupart des segments ce qui leur permettent d'étendre leur zone de recherche au maximum. Cependant, avec un poids plus élevé (pour une même distance de recherche), ceux-ci arrêteront leur expansion avant à cause de la contrainte de poids minimal de création.

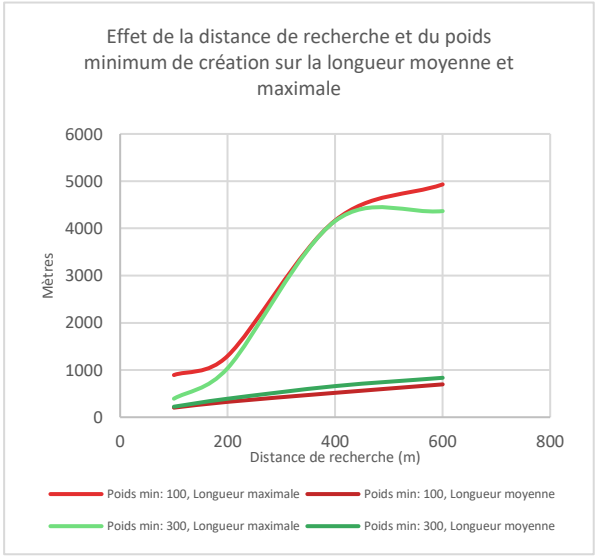
Ainsi, pour savoir si la distance de recherche choisie est adéquate, il faut effectuer la distribution de la longueur et de la largeur qui devront par la suite être comparées à la « distance à vol d'oiseau acceptable » présentée juste avant et calculer le pourcentage de segments pondérés non assignés à un corridor. Il est souhaitable d'avoir au moins 50% à 60% des segments assignés à un corridor si l'angle de déviation est au-dessus de 10°-12° (l'effet de l'angle de déviation est présenté juste après). Un pourcentage plus faible informe que le poids minimal de création est trop élevé ou que la distance de recherche est trop faible ou encore qu'il y ait très peu de possibilités de regroupement (segments éparpillés : dans ce cas il est très difficile d'effectuer du regroupement).

Afin de mieux comprendre le type d'analyse qu'il faut effectuer pour savoir si la distance de recherche choisie convient au type d'étude souhaité, le Tableau 3-1 présente pour la Figure 3-1 l'ensemble de graphiques à produire.

Tableau 3-1: Effet de la distance de recherche (% de regroupement, distribution des longueurs des zones convexes, distribution des largeurs des zones convexes, ...)







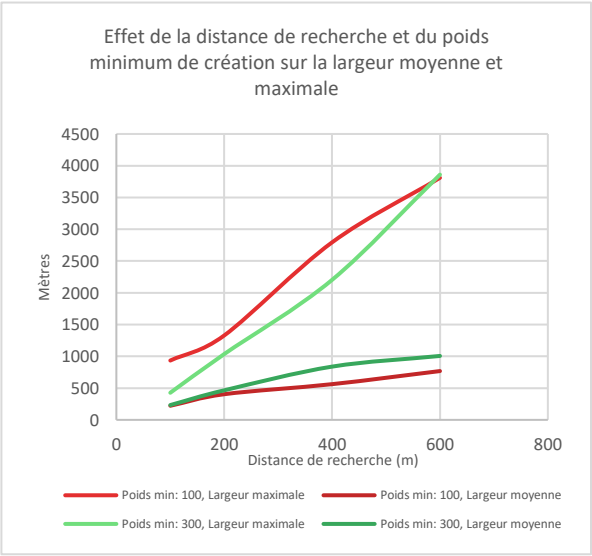
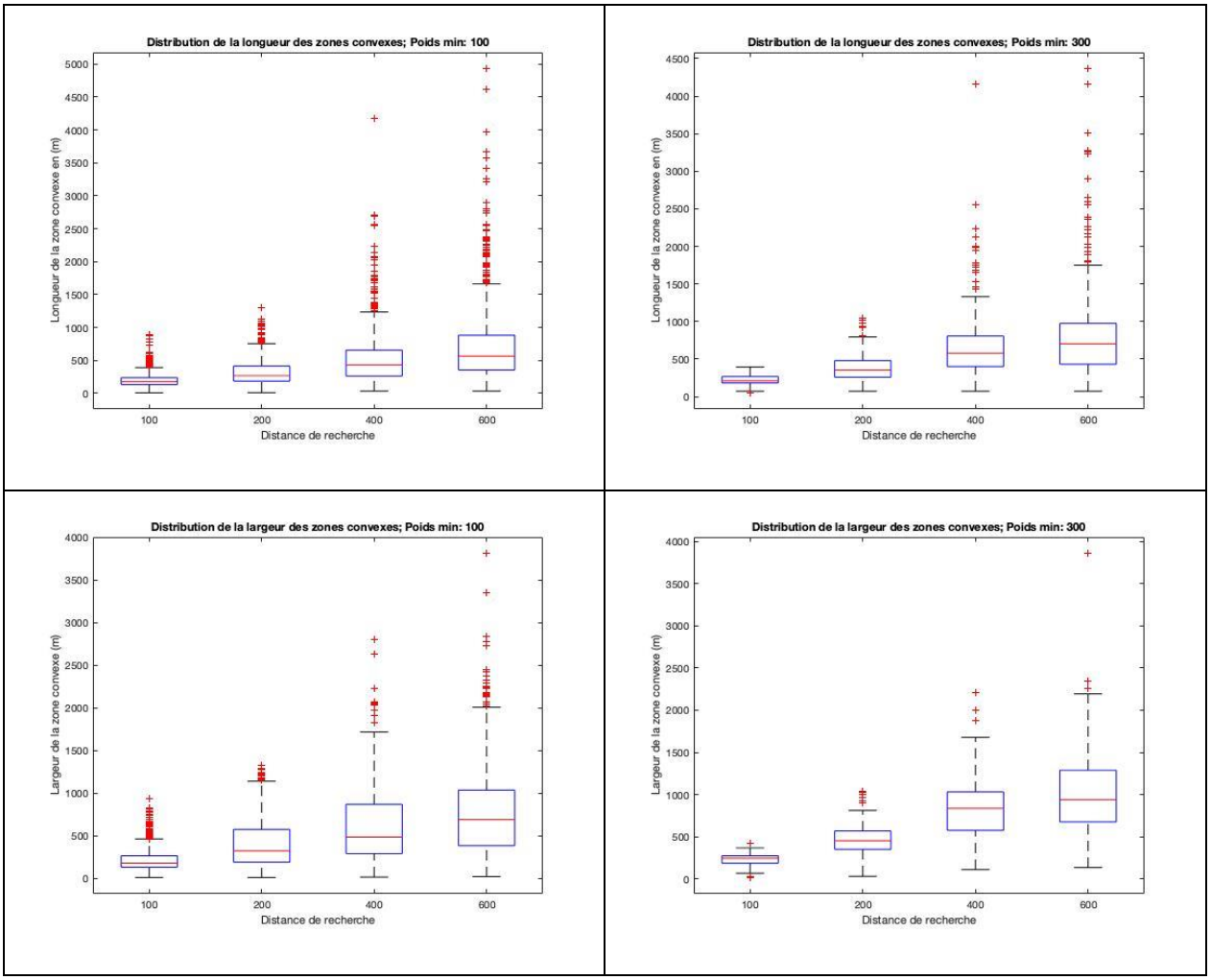


Tableau 3-1 : Effet de la distance de recherche (% de regroupement, distribution des longueurs des zones convexes, distribution des largeurs des zones convexes, ...)



Dans ce cas d'étude, une distance de 200 mètres avec un poids minimal de 100 permet d'avoir 63 % des segments de déplacements assignés à un corridor, une longueur des zones convexes variant principalement entre 200 et 400 mètres (quelques valeurs extrêmes) et une largeur principalement entre 200 et 500 mètres.

Il est important de noter quelques points :

- Si l'utilisateur n'a pas accès à un calculateur de chemin, il peut prendre comme hypothèse que, pour l'île de Montréal, la tortuosité tourne autour de 2 (Godin, 2012).

- Le plus souvent, il y aura des valeurs extrêmes dans les distributions de la longueur et de la largeur des zones convexes. Il faut se concentrer sur le lieu où il y a une forte concentration des observations (utilisation d'un histogramme de fréquence).
- Il faut être capable d'effectuer un compromis entre le pourcentage de segments assignés à un corridor et la distribution de la longueur et de la largeur des zones convexes.
- Le poids minimal de création affecte énormément l'effet que la distance de recherche a (pourcentage de segments assignés à un corridor et la distribution de la longueur et de la largeur des zones convexes). Il faut prendre cela en considération lors du choix de ce poids et effectuer une analyse de sensibilité sur son effet.

Poids minimal de création d'un corridor

En expliquant le paramètre précédent, il est possible de remarquer l'importance que peut avoir le poids minimal de création. Le nombre de déplacements pondérés nécessaire (poids minimal) pour la création d'un corridor est déterminé en fonction de la réponse à la question suivante: quel est le nombre minimal de lignes de désir qu'il faut avoir pour qu'un corridor soit créé?

Si le facteur de pondération est le même pour tous les déplacements, le raisonnement est assez simple. Le poids minimal est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$Poids\ minimal\ de\ création = Facteur\ de\ pondération * Nombre\ de\ segments\ de\ déplacements\ souhaités$$

L'exemple qui suit est utilisé pour avoir une meilleure compréhension :

- Supposons une base de données où tous les déplacements ont une pondération égale à 2 et que l'utilisateur souhaite qu'un corridor soit créé lorsqu'il y a au minimum un regroupement de 5 lignes de désir. Alors, le poids minimal à spécifier dans Traclus_DL est de 10 (nombre de déplacements souhaités : 5, facteur de pondération : 2).

Cependant, si les facteurs de pondération diffèrent, on peut alors produire la distribution de ceux-ci (histogramme de fréquence) et par la suite sélectionner la borne supérieure de la plage où il y a le plus de déplacements comme facteur de pondération dans l'équation présentée.

Les déplacements effectués dans l'enquête Origine-Destination entre 7h00 et 8h30 dans la zone présentée à la Figure 3-1 sont utilisés à titre d'exemple :

- Dans l'enquête Origine-Destination, les facteurs de pondérations diffèrent. Puisque l'équation présentée juste avant ne peut pas être tout simplement utilisée, la distribution de ces facteurs est produite et est présentée à la Figure 3-15.

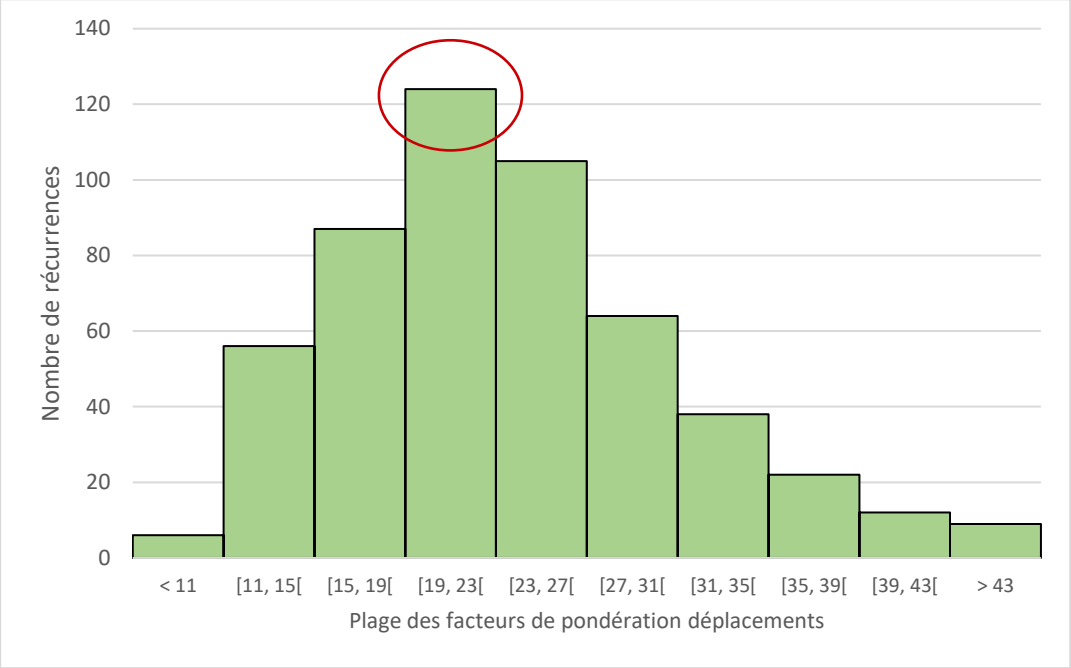


Figure 3-15: Distribution des facteurs de pondération déplacement entre 7h00 et 8h30 de la zone étudiée

Grâce à cette distribution, il est possible de voir qu'il y a le plus grand nombre de fréquences entre 19 et 23. Ainsi, si l'utilisateur souhaite qu'en grande majorité un corridor soit créé à partir de 5 segments de lignes de désir, il faut alors utiliser un poids minimal de création égal à 115 (nombre de lignes de désir souhaitées : 5, facteur de pondération : 23).

Cependant, avec des déplacements ayant des facteurs de pondération différents, il est impossible que tous les corridors soient créés d'exactement x nombres de segments de déplacements, surtout pour les corridors les plus lourds qui ont eu à leur disposition l'ensemble des segments de déplacements. La méthode de calcul du poids minimal présentée permet de se rapprocher de ce nombre de segments de déplacements pour plusieurs corridors.

Il faut se rappeler qu'il faut effectuer une analyse de sensibilité au niveau de l'effet de ce paramètre sur la distance maximale de recherche.

Angle maximal de déviation

Plus l'angle maximal de déviation est petit, plus les segments de déplacements assemblés dans un même corridor ont une direction similaire. Dans Traclus_DL, un choix peut être effectué entre 2.5° et 22.5°, avec 2.5° étant des segments de lignes de désir pratiquement parallèles dans un même corridor. Il n'y a pas de bons ou de mauvais choix lors de la sélection de cet angle. Encore une fois, cela dépend de ce que l'utilisateur souhaite produire comme analyse.

Pour voir l'effet que le choix de cet angle peut avoir, de multiples simulations ont été effectuées sur un ensemble de 2479 déplacements (fichier des déplacements internes de la zone à l'étude excluant le retour au domicile; Figure 3-1). La Figure 3-16 présente les résultats provenant de ces simulations.

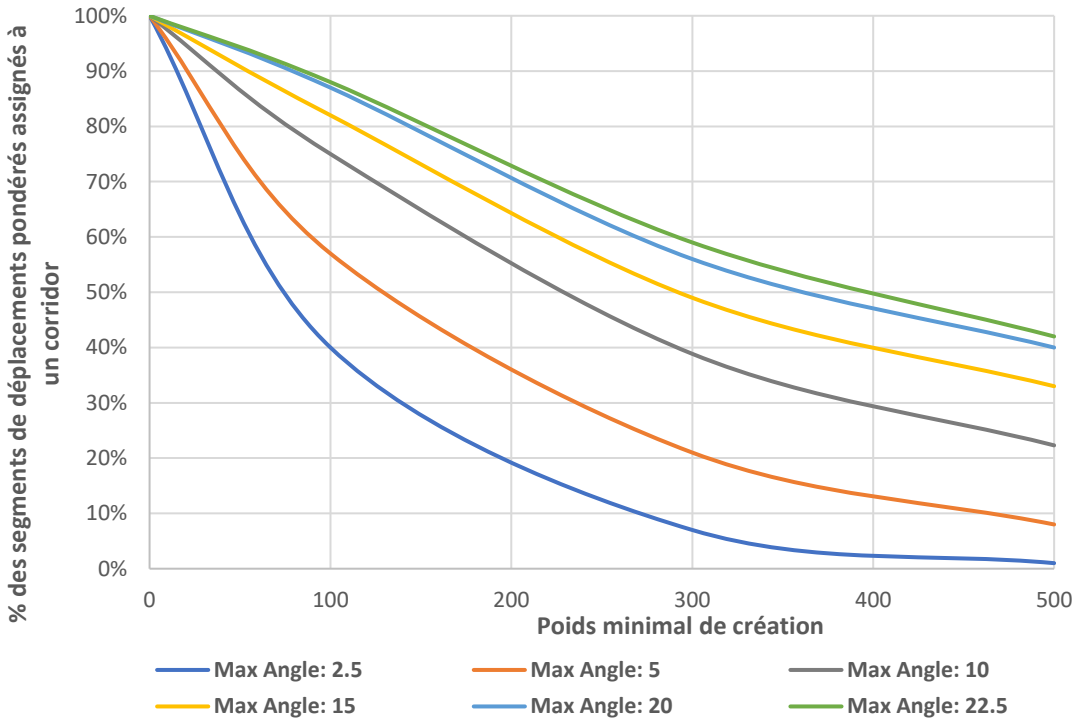


Figure 3-16: % des segments des déplacements internes de la zone à l'étude (excluant retour au domicile, distance maximale de recherche: 200 m, longueur de segmentation : 100 m) assignés à un corridor

Dans la Figure 3-16, il est important de remarquer que dans l'axe des ordonnées, le terme « pondéré » est utilisé. En effet, afin d'effectuer le calcul du pourcentage des segments de déplacements assignés à un corridor, le facteur de pondération du déplacement initial doit être pris en considération pour chaque segment. Comme attendu, plus l'angle de déviation maximal est petit, plus le pourcentage de segments assignés à un corridor est faible puisqu'un angle de déviation de petite valeur recherche des segments de déplacements quasi similaires (au niveau de la direction). Un autre point important à soulever et qui n'est pas présenté dans la Figure 3-16 est le temps de calcul. Si l'utilisateur a une contrainte de temps de roulement et une base de données comportant un très grand nombre de déplacements, mieux vaut favoriser un angle en dessous ou égal à 15°. Pour l'ensemble des simulations qui ont été produites pour la création de la Figure 3-16, le temps de calcul a été enregistré. Afin de mieux comprendre le point amené juste avant concernant la contrainte de temps, la Figure 3-17 présente ces temps de calcul.

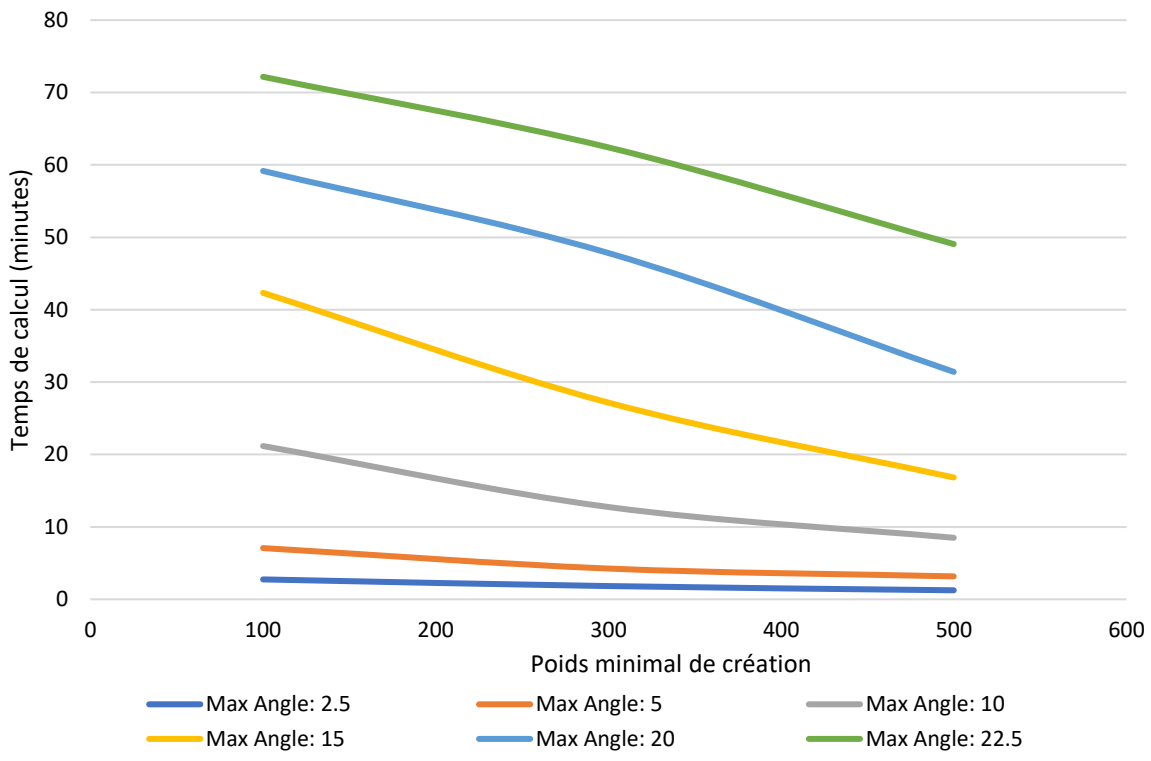


Figure 3-17: Temps d'exécution de Traclus_DL en fonction de l'angle de déviation et du poids minimal de création

En visionnant la Figure 3-17, il est possible de remarquer qu'une augmentation de l'angle de déviation et qu'une diminution du poids minimal de création engendre une augmentation du temps

de calcul. Pour voir l'effet en chiffre le Tableau 3-2 résume la variation en pourcentage du temps de calcul qu'un changement d'angle engendre pour un poids minimal de création similaire.

Tableau 3-2: % de variation du temps de calcul en fonction de l'angle maximal de déviation pour un même poids minimal de création (référence angle maximal de déviation de 2.5)

Angle maximal de déviation	Poids minimal de création: 100	Poids minimal de création: 500
2.5	0%	0%
5	158%	153%
10	670%	580%
15	1439%	1247%
20	2052%	2413%
22.5	2524%	3825%

Dans le Tableau 3-2, il est important de spécifier que l'angle de référence de base pour chaque poids minimal de création est l'angle de 2.5^{o}. En analysant les résultats obtenus au niveau du Tableau 3-2, on constate que l'augmentation du temps de calcul n'est pas négligeable. Il faut rappeler que le fichier de déplacements utilisé ne comporte que 2479 lignes de désir et nécessite quand même un temps de calcul assez élevé. La Figure 3-18 présente l'effet que peut avoir la quantité de lignes de désir analysées sur le temps de calcul.

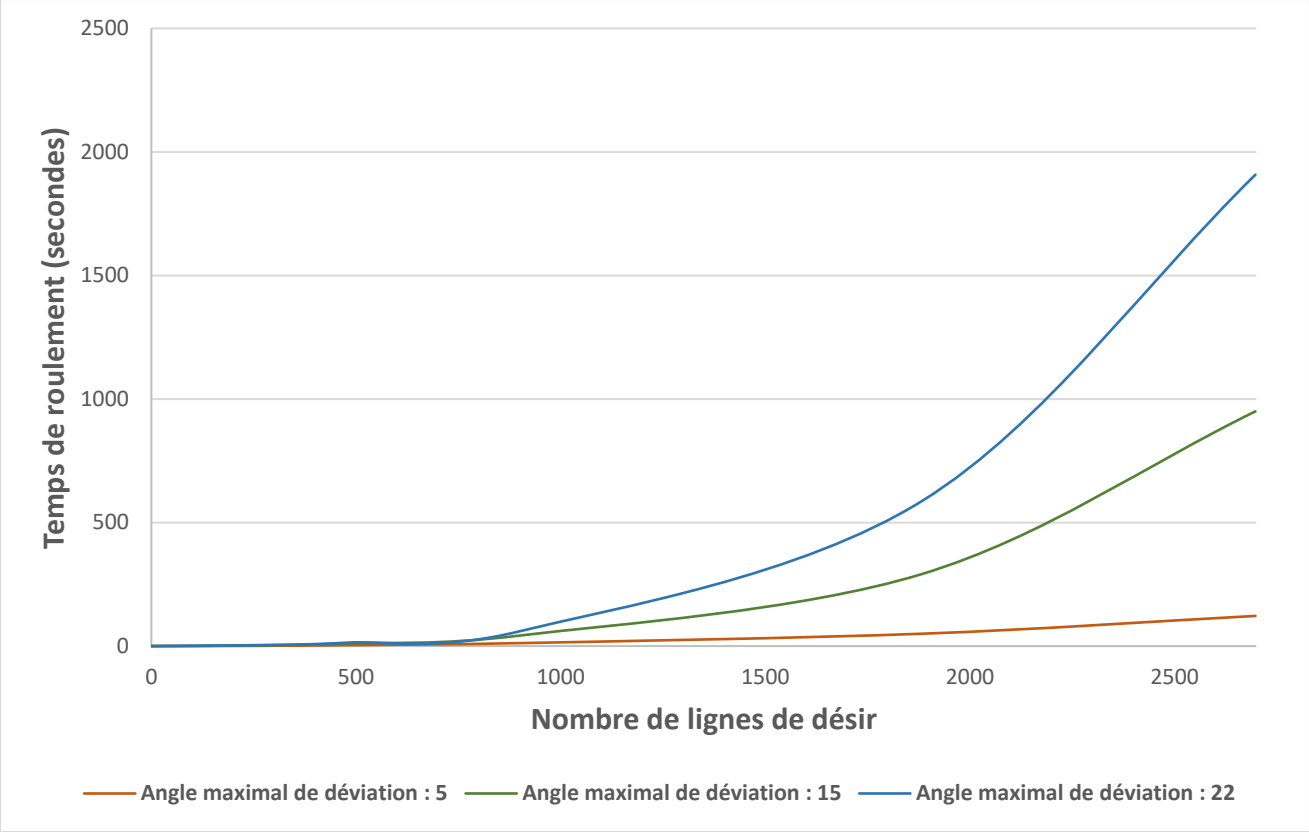


Figure 3-18: Effet de la quantité de lignes de désir analysées sur le temps de calcul pour un angle maximal de déviation fixe (déplacements internes de la zone présentée dans la Figure 3.1)

Il est possible de remarquer que plus le nombre de lignes de désir analysées est grand, plus le temps de calcul est élevé. Celui-ci augmente de façon exponentielle surtout lorsque l'angle de déviation maximal est élevé.

Il faut rappeler qu'il n'y a pas de bon ou mauvais choix pour l'angle maximal de déviation, mais qu'il faut prendre en considération l'objectif de l'étude réalisée (ex. recherche des grands corridors de déplacement, recherche de déplacements à trajet quasi similaire, …) et le temps de calcul considéré acceptable pour l'utilisateur.

<u>Ordre de choix des paramètres – Résumé</u>

Il est conseillé de choisir les 4 paramètres selon l'ordre suivant :

1. La longueur de segmentation

   Ce paramètre est le plus facile à choisir. Comme expliqué précédemment, il faut favoriser une longueur de segmentation équivalente à 5% à 15% de la longueur à vol d'oiseau

moyenne pondérée des déplacements pour éviter une perte d'information. De plus, il est préférable d'utiliser une longueur de segmentation plus petite ou égale à la distance maximale de recherche.

2. L'angle maximal de déviation

   Ce paramètre représente le critère de similarité. Il est choisi en fonction du type de regroupement souhaité (type d'étude). Plus l'angle maximal de déviation est faible, plus les segments de déplacements regroupés seront parallèles entre eux. Il peut prendre comme valeur maximale un angle égal à 22,5°.

3. Le poids minimal de création

   Ce paramètre fixe le poids minimal qu'un corridor doit avoir pour qu'il soit créé. Il y a trois cas de figure possibles, pas de facteur de pondération, facteurs de pondération similaires ou non. S'il n'y a pas de facteur de pondération, le poids minimal de création correspond au nombre de segments de lignes de désir souhaités. Si les facteurs de pondération sont similaires, il prend le nombre minimal de segments de lignes de désir souhaités par l'utilisateur multiplié par ce facteur de pondération comme valeur. Sinon, on peut effectuer la distribution des facteurs de pondération et faire le même calcul avec le facteur de pondération à plus forte fréquence.

4. La distance maximale de recherche

   Ce paramètre est le plus complexe à choisir. Il y a trois facteurs à analyser pour déterminer sa justesse ou non : le nombre de segments assignés à un corridor, la distribution (boite à moustache) de la longueur de la zone convexe autour de chaque groupe de segments ainsi que la distribution de la largeur de la zone convexe autour de chaque groupe de segments. Ces deux dernières doivent être comparées à la distance de marche acceptable (à vol d'oiseau) déterminée en fonction du type d'étude effectuée. Le poids minimal de création a un grand effet sur ce paramètre et il est préférable de commencer avec une valeur faible. Il est possible de devoir effectuer quelques itérations et analyser la sensibilité des résultats entre les étapes 3 et 4.

3.4 Méthode de lissage (Grille_CR)

Cette section présente en détail l'outil de lissage mis en place pour faciliter la visualisation des résultats obtenus par Traclus_DL.

3.4.1 Fonctionnement de Grille_CR

Grille_CR peut être divisé et expliqué en cinq grandes parties :

1. **Mise en forme du fichier segment pour l'ensemble des calculs**

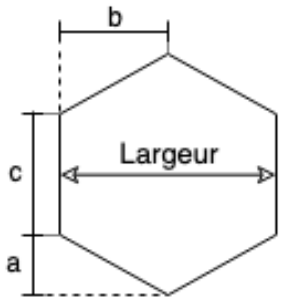
   Le premier paramètre à fournir à Grille_CR est le fichier « segment.csv » qui provient de Traclus_DL.

   Cette première partie consiste tout simplement à attribuer, entre autres, à chaque champ les types de données qu'il représente (integer, text, geometry, …) et à extraire individuellement chaque coordonnée (x_orig, y_orig, x_dest et y_dest) du champ de géométrie pour permettre d'effectuer certains calculs qui sont expliqués aux étapes qui suivent.

2. **Création d'une grille de base**

   Cette deuxième étape consiste à créer une grille de base d'analyse. Il y a trois paramètres à fournir :

- La largeur des mailles



$$b = Largeur * 0.5$$

$$a = \tan\big(radian(30)\big) * b$$

$$c = 2 * a$$

Figure 3-19: Dimensions d'une maille.

Comme règle de base, il faut que la largeur des mailles tourne autour de la longueur de segmentation. Une hypothèse de continuité est utilisée au niveau de la distribution des

corridors dans les mailles. Cette hypothèse stipule qu'un corridor est attribué à toutes les mailles qu'il traverse.

- Les coordonnées des extrémités du quadrilatère représentant la zone de création

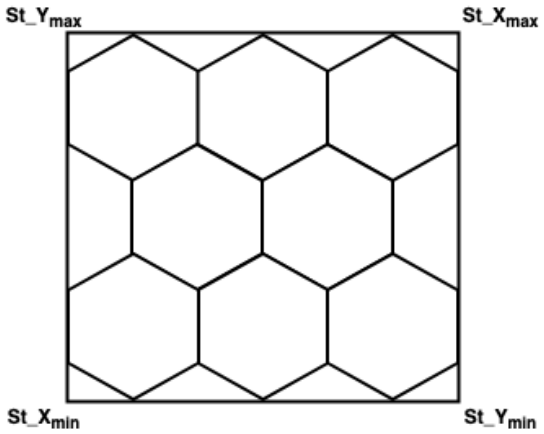


Figure 3-20: Coordonnées extrêmes de la zone de création.

- Le système de coordonnées de référence (ex. NAD83 \ MTM Zone 8 ESGP :32 188)

Cette partie de code est inspirée d'un script trouvé sur GitHub (Poe, 2019). Quelques modifications ont été apportées afin qu'il fonctionne avec Grille_CR.

3. Création d'un nouveau fichier corridor

Comme il a été expliqué dans la section « longueur de segmentation », les corridors créés prennent comme mesure la longueur de segmentation (longueur pondérée après modification du code pour les problèmes de prolongement des segments de déplacements). Cette partie du code s'assure que la position du corridor soit centrée par rapport aux segments lui appartenant. De plus, Grille_CR prolonge le corridor créé jusqu'à ce que sa longueur soit égale à la longueur pondérée du polygone à distance minimale autour des segments appartenant au corridor en question. Le corridor représente ainsi l'ampleur réelle qu'il doit avoir. Les figures qui suivent présentent pour un même groupe de segments le corridor créé avec le code de Traclus_DL (Figure 3-21), le polygone à distance minimal (Figure 3-22) et le nouveau corridor centré et prolongé créé avec le code de création de grilles.

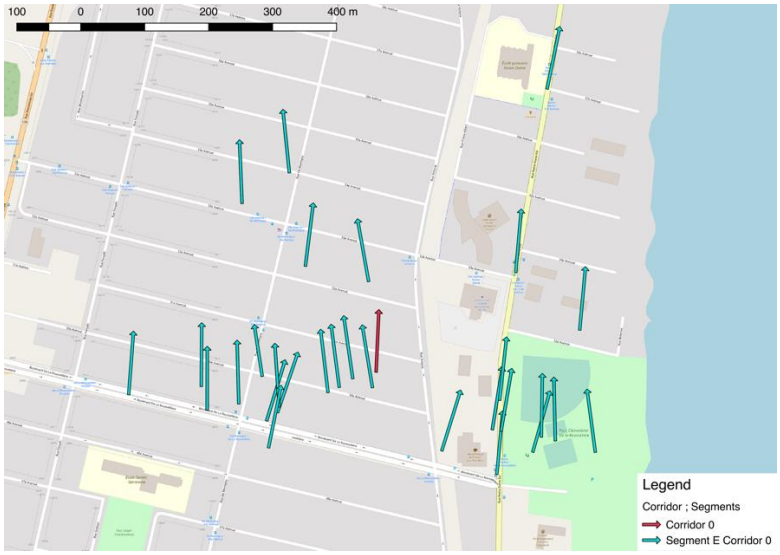


Figure 3-21: Exemple d'un corridor (0) créé à partir de segments avec Traclus_DL

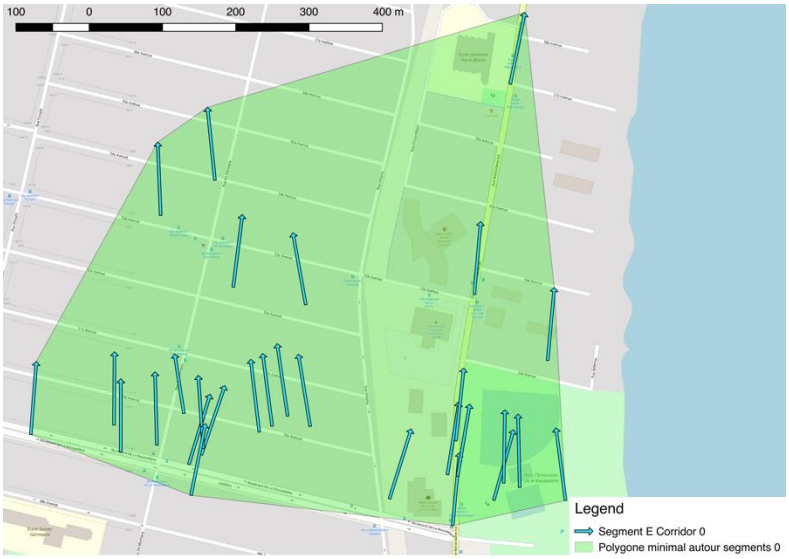


Figure 3-22: Polygone à distance minimale tracé autour du corridor de la Figure 3-21

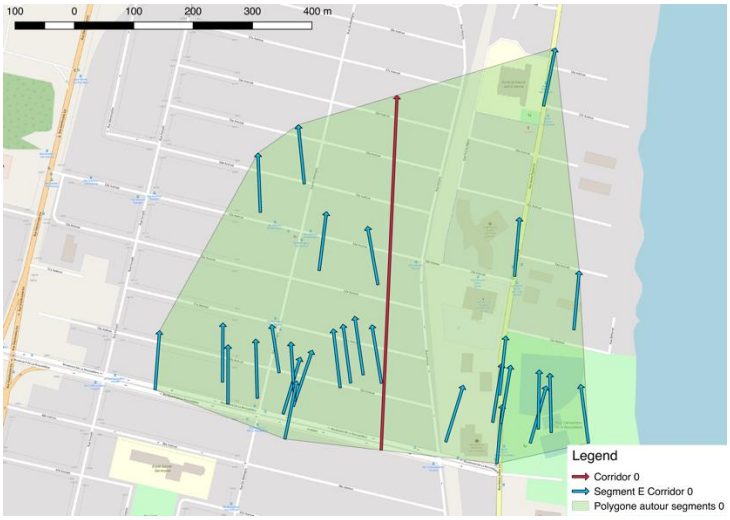


Figure 3-23: Création d'un nouveau corridor (0) centré pondéré et prolongé

4. Calcul de l'azimut pour chaque corridor

L'azimut est défini comme étant l'angle dans un plan horizontal entre la direction d'un objet et une direction de référence (Wikipédia, 2018). La direction de référence choisie dans le code SQL écrit est le nord géographique (le nord équivaut à un azimut de 0°). L'azimut est calculé à partir de la formule suivante :

$$Azimut = 2 * \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2} + x'} \tag{2}$$

Avec

$$x = \cos(lat_1) * \sin(lat_2) - \sin(lat_1) * \cos(lat_2) * \cos\,(long_2 - long_1)$$

et

$$y = \sin(long_2 - long_1) * \cos\,(lat_2)$$

<u>Description</u> *: lat pour latitude; long pour longitude; 1 pour le premier point ; 2 pour le deuxième point*

Cette formule est automatisée dans PostgreSQL sous la fonction « ST_Azimuth ».

5. Sélection d'un scénario et création des grilles.

Cinq grilles (zones 1 à 4 et zone vide) sont créées à l'issue de ce code, mais avant que cela ne soit fait, il faut qu'un scénario soit choisi. Une des limites de la séparation des

azimuts en zones est au niveau des limites entre chaque zone. Pour mieux comprendre, l'exemple de la séparation de base entre les points cardinaux est utilisé :

Les quatre zones pour ce système peuvent être définies ainsi :

- Zone 1 : Nord à l'Est (0° à 90°)
- Zone 2 : Est au Sud (90° à 180°)
- Zone 3 : Sud à l'Ouest (180° à 270°)
- Zone 4 : Ouest au Nord (270° à 360°)

La limite de ce zonage est que par exemple un angle de 359° ressemble énormément à un angle de 2° (limite entre zone 4 et 1) ou encore un angle de 181° ressemble à un angle de 179° (limite entre zone 2 et 3).

Pour y remédier ou atténuer cette problématique, un concept de scénario a été mis sur place. Ce concept propose trois scénarios qui sont présentés à la Figure 3-24.

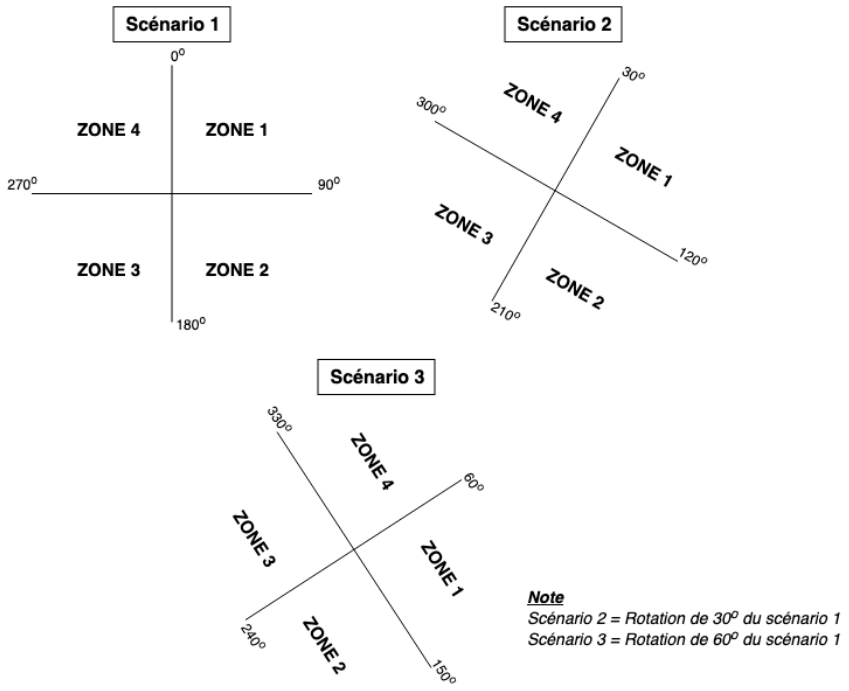


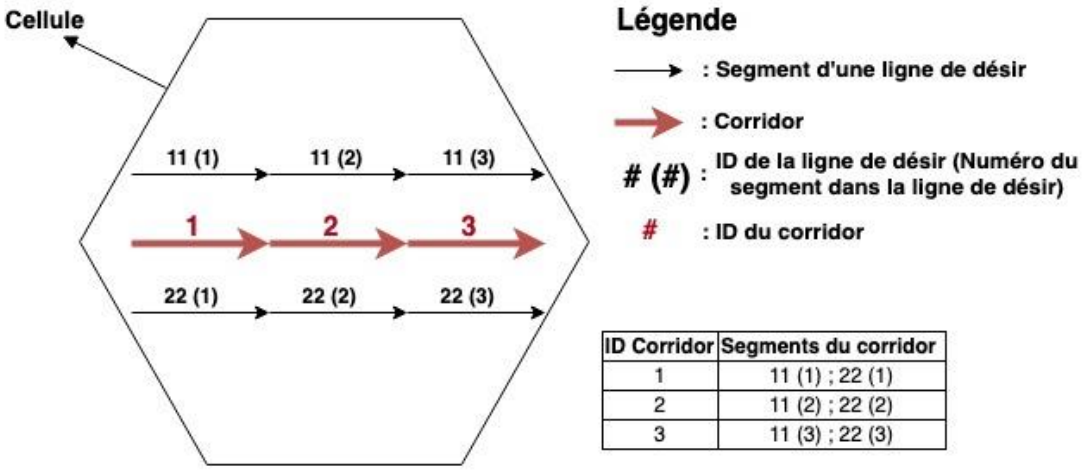
Figure 3-24: Scénarios possibles lors de la création de grilles de désir

Le premier scénario représente le zonage des quatre points cardinaux comme présenté dans l'exemple précédent. Le scénario 2 est une rotation de 30° du scénario 1 tandis que le scénario 3 est une rotation de 60 ^{o} dégrés du scénario 1. Pour chaque scénario, un intervalle limite est créé pour chaque barrière (ex. pour scénario 1 : 355° à 5°, 85° à 95°, 175° à 185° et 265 ^{o} à 275 ^{o}) et le nombre de corridors s'y trouvant est calculé. Le scénario avec le moins d'angles dans les intervalles limites est choisi pour produire les grilles de désir.

L'autre aspect qui peut être problématique est l'angle de début et de fin de deux zones qui se suivent (problématique de double comptage). Pour y remédier, l'angle de fin de chaque zone est diminué de 1° et la zone qui la suit garde son angle de début (ex. zone 1 : 0° à 89°, zone 2 : 90° à 179°, …).

Il est important de mentionner que Grille_CR s'assure qu'il n'y a pas de double comptage d'une même ligne de désir. Ce double comptage s'explique de la manière suivante :

Un corridor contient différents segments tandis qu'une cellule contient différents corridors (ex. Figure 3-25).



ID Corridor	Segments du corridor
1	11 (1) ; 22 (1)
2	11 (2) ; 22 (2)
3	11 (3) ; 22 (3)

Figure 3-25: Exemple de la composition d'une cellule si le double comptage n'est pas évité

En analysant l'exemple présenté à la Figure 3-25, il est possible qu'il y ait un double comptage ou plus au niveau de cette cellule puisqu'elle contient des corridors qui possèdent des segments à

caractéristiques similaires (segments provenant d'une même ligne de désir). Pour y remédier, Grille_CR efface la présence de tout doublon au sein d'une même cellule.

Un exemple est présenté à la Figure 3-26 pour illustrer le processus de nettoyage :

Poids segment: 4, 25, 32	Poids segment: 11, 30, 31, 40	Poids segment: 27, 33
50	25	20

ID corridor	Poids du corridor	Segments y appartenant (no segment dans la ligne de désir)
1	200	4 (1), 11 (1), 25, 30, 32
2	145	4 (2), 11 (3), 27, 31 (2), 40
3	70	11 (2), 31 (1), 33

ID cellule	Poids de la cellule	Corridor y appartenant	Segment y appartenant
1	270	1 , 3	4, 11, 25, 30, 32, ~~11~~, 31, 33
2	215	2 , 3	4, 11, 27, 31, 40, ~~11~~, ~~31~~, 33
3	70	3	11, 31, 33

ID cellule	Poids final de la cellule	Segments y appartenant
1	245	4, 11, 25, 30, 32, 31, 33
2	165	4, 11, 27, 31, 40, 33
3	70	11, 31, 33

Figure 3-26: Exemple du processus de nettoyage des doublons présents au sein d'une même cellule

Il est possible de remarquer dans la Figure 3-26 qu'aucune cellule ne comporte des doublons.

Le code SQL de création est disponible sur GitHub[1].

Les résultats sont visualisables sur tout logiciel GIS possédant une connexion PostGIS comme QGIS ( ).

La Figure 3-27 présente un exemple visuel avec comme données les lignes de désir entre 7h00 et 8H30 lors d'une journée de semaine pour une zone d'étude.

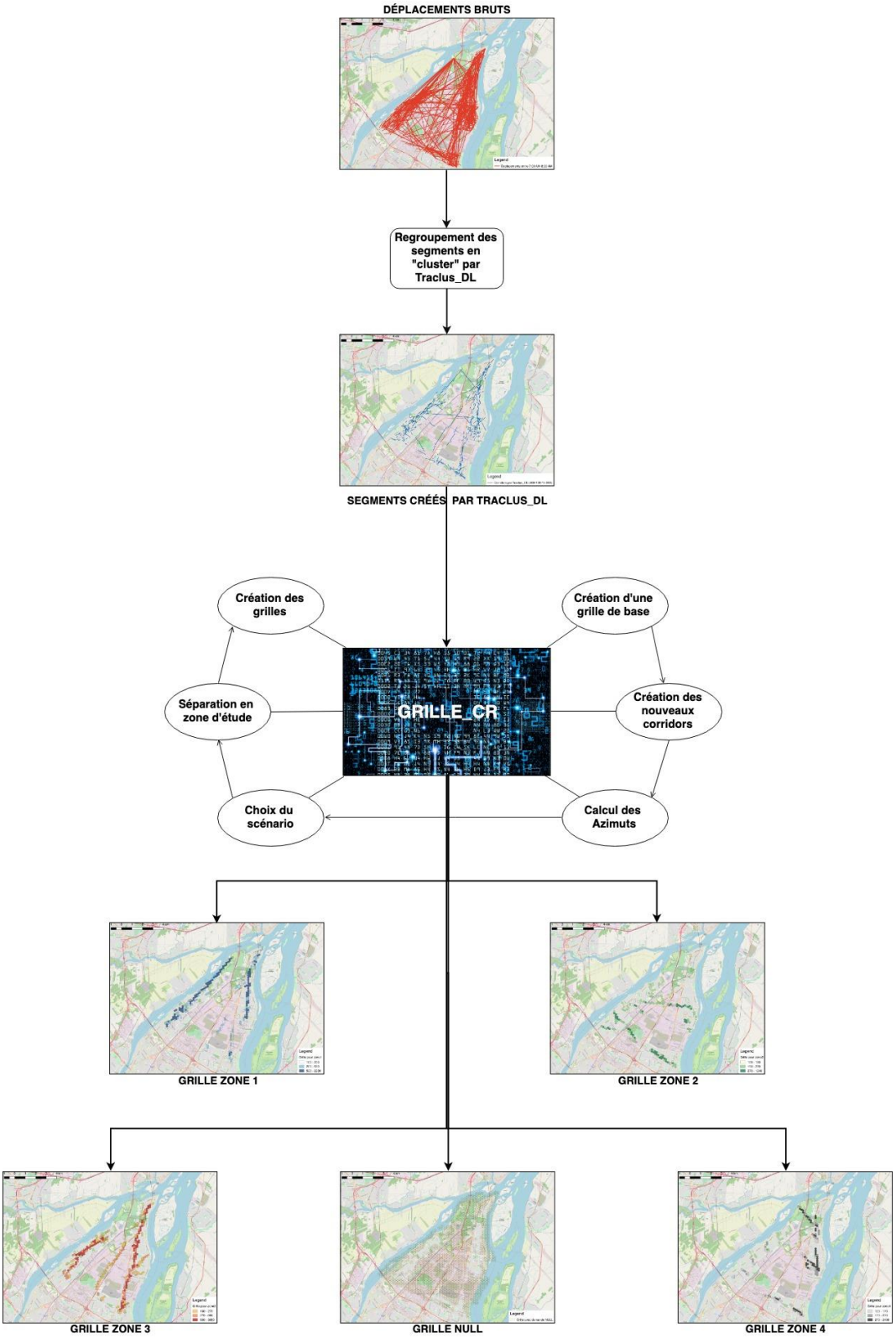


Figure 3-27: Exemple d'une transformation de déplacements bruts entre 7H00 AM et 8H30 AM de la zone à l'étude

3.4.2 Caractérisation des grilles

Grille_CR permet de pousser l'étude un peu plus loin. Il est possible de caractériser les 4 grilles créées. Une caractérisation des grilles permet d'obtenir des informations supplémentaires sur chacune d'entre elles comme leur composition en motif de déplacement ou en mode de déplacement ou encore heure de déplacements. Toutes caractéristiques disponibles dans la base de données initiale (ex. enquête OD) peuvent être utilisées pour définir les grilles.

Il est possible d'extraire dans un fichier Excel les quatre bases de données créées par Grille_CR qui regroupent les corridors de chaque zone (cor_zone1, cor_zone2, cor_zone3 et cor_zone4). En les combinant avec le fichier de segments produits par Traclus_DL et la base de données initiale (ex. enquête OD), il est possible d'effectuer cette caractérisation. La caractérisation des grilles se fait facilement à l'aide d'un tableau croisé dynamique.

3.5 Particularités de l'application à l'offre de transport en commun

Cette section se concentre sur une méthodologie permettant l'application de Traclus_DL et Grille_CR pour l'analyse de l'offre de service.

L'application à l'offre de transport en commun implique une méthodologie similaire à celle expliquée juste avant. Cependant, il y a quelques spécificités qu'il faut prendre en considération lors de la création de corridors d'offre.

L'information nécessaire pour produire des « grilles d'offres » peut être recueillie dans le « General Transit Feed Specification » (GTFS) du lieu d'étude ou dans tout autre fichier contenant des informations similaires.

Un GTFS est un format de données qui a été développé en 2005 dans le cadre d'une collaboration entre Google et l'agence de transport de Portland afin de faciliter le partage et l'accès à l'information sur les services de transport en commun par les utilisateurs (Wikipédia, 2013). Ceux-ci ont proposé une norme de publication des données opérationnelles des agences de transport en commun (McHugh, 2013). La Figure 3-28 présente l'ensemble des tables requises ainsi que les clés qui les relient entre elles.

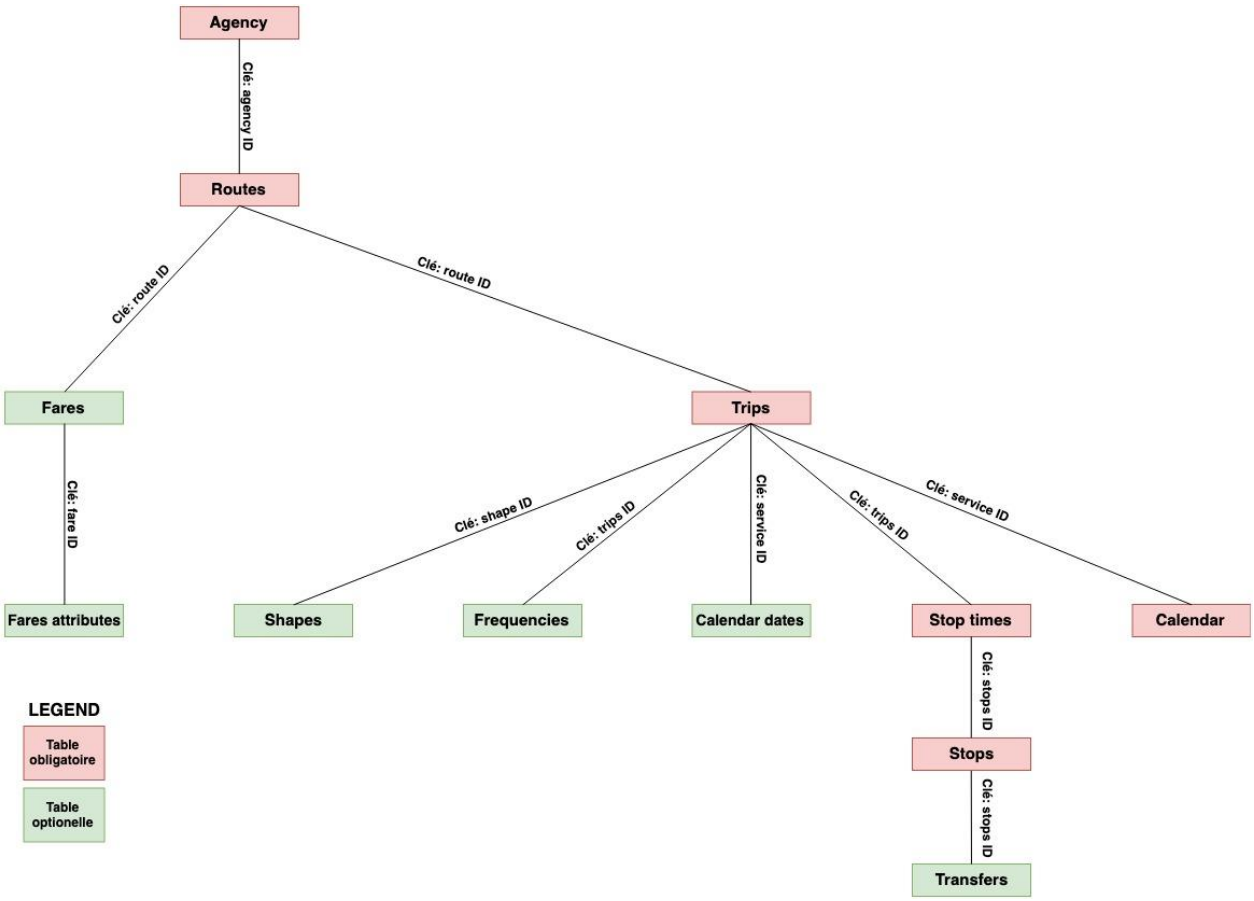


Figure 3-28: Ensemble de données GTFS (Wikipédia, 2019a)

Google Transit APIs décrit en détail la structure de chacun de ces fichiers(Google_Transit_APIs, 2019).

Les ensembles de données GTFS sont générés par les compagnies de transport en commun (ex. STM, STL, …) et sont disponibles sur le web en données ouvertes. Pour s'assurer de la justesse des bases de données fournies, Google a mis en place un outil de vérification, FeedValidator (APIs, 2019). Il s'assure entre autres de la présence de tous les fichiers, de la présence de doublons ou non au niveau des arrêts ou encore de la validation des dates de service (Google, 2014).

Ainsi, en combinant les tables « trips », « stop times », « frequencies », « calendar » et « stops », il est possible d'obtenir ce qu'on appelle les séquences de trajets (arrêt à arrêt) d'une ligne de bus. Un segment de trajet direct est défini comme étant le trajet entre deux arrêts consécutifs.

La Figure 3-29 présente un exemple trajet de bus qui permet de faciliter la compréhension de cette notion.

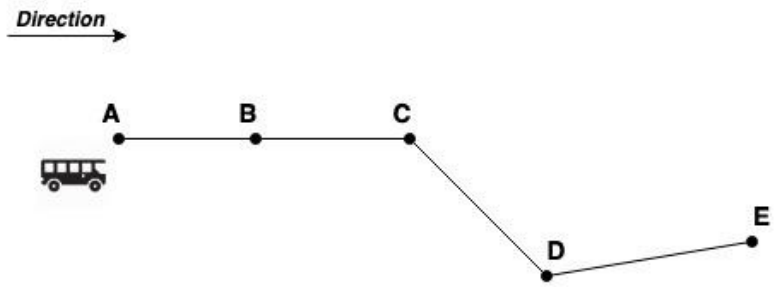


Figure 3-29: Exemple d'un trajet de bus

Les segments de trajet direct de cet exemple (Figure 3-29) sont : AB, BC, CD, DE.

La Figure 3-30 présente un exemple de segments de trajet direct pour différentes lignes de bus.

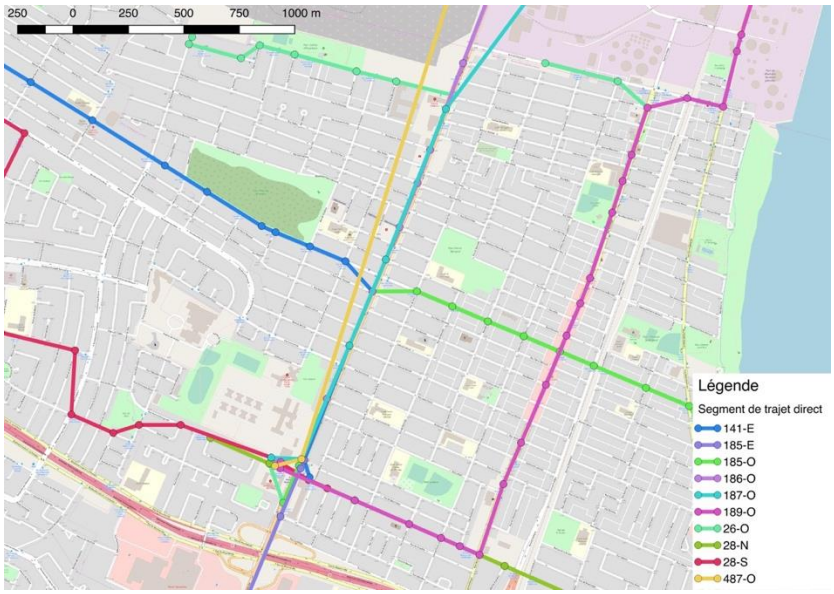


Figure 3-30: Exemple de segments de trajet direct pour différentes lignes de bus

En comparaison à la Figure 3-1 où la demande brute est cartographiée, il est beaucoup plus facile de comprendre la spatialisation de l'offre brute. Chaque coloration distincte représente des segments de trajet direct pour une ligne de bus dans laFigure 3-30. Par contre, tout comme la demande brute, il est difficile de voir l'impact du poids de l'offre (nombre de voyages sur chaque segment de trajet direct) et aussi de dissocier le service offert selon sa direction, d'où l'utilité de créer des grilles d'offre.

La méthodologie de création est pratiquement la même que celle expliquée précédemment. Cependant, il y a une étape supplémentaire qui est le choix du niveau d'étude de l'offre. Celle-ci a été séparée en deux niveaux.

Niveau 1 de l'offre

Le niveau 1 revient à étudier l'offre directe entre des arrêts consécutifs. Pour mieux comprendre, le trajet présenté à la Figure 3-29 peut être pris comme exemple. L'offre de niveau 1 est le service offert entre les segments AB, BC, CD et DE. Ce type d'offre fait ressortir la forme du trajet.

Un niveau 1 d'étude permet d'avoir une idée rapide du service donné, mais ne représente pas l'ensemble des liens desservis et l'offre réelle.

Niveau 2 de l'offre

Un niveau 2 d'étude représente beaucoup mieux la réalité. Elle est cependant plus complexe à mettre en place. En comparaison au niveau 1 de l'offre qui étudie des segments de trajet direct, ce niveau d'étude se concentre sur les segments de trajet complet. Un segment de trajet complet est défini comme étant un lien atteignable par un usager à partir d'une station pour un même voyage. Le même exemple utilisé pour le niveau 1 peut être utilisé pour une étude de niveau 2. Cette fois-ci, les segments de trajet complet sont: AB, AC, AD, AE, BC, BD, BE, CD, CE et DE. Bref, une étude de type 2 présente toutes les stations atteignables par un usager à partir d'un arrêt.

Afin de produire toutes les combinaisons possibles, un code Matlab (Level2Services) a été mis en place. La Figure 3-31 présente le cheminement de ce code. L'ensemble du code est disponible sur GitHub[2].

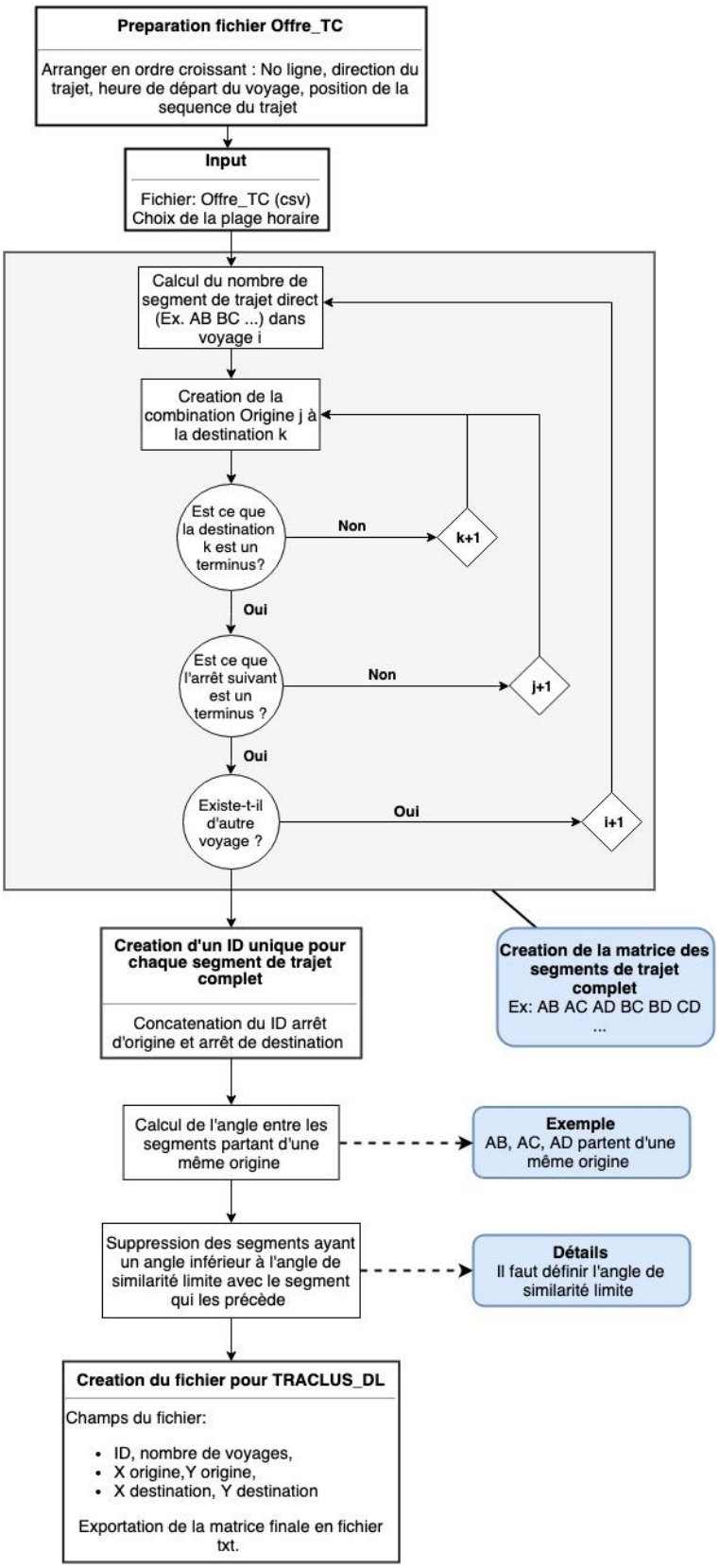


Figure 3-31: Processus de création d'une offre de niveau 2 (Level2Services)

L'ensemble du processus de création du niveau 2 de service (Figure 3-31) est expliqué en détail.

Level2Services nécessite un fichier contenant l'ensemble des séquences arrêts et celui-ci doit être classé selon le numéro de la ligne de bus, la direction du trajet, l'heure de départ et la position de la séquence dans le trajet (possible sur Matlab ou SQL). La Figure 3-32 présente un exemple de chacun des champs nécessaires.

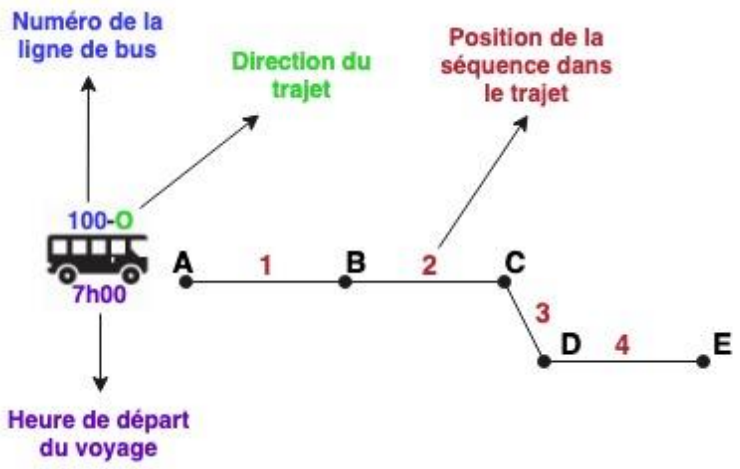


Figure 3-32: Exemple des champs nécessaires

Il est possible de spécifier la plage horaire d'étude souhaitée dans le code Matlab. Après un ensemble d'itérations et de calculs, un fichier « .txt » formaté pour Traclus_DL est créé et est exporté.

Il est nécessaire d'avoir une assez grande puissance de calcul, puisque plus il y a un grand nombre de segments, de lignes de bus et de voyages, plus le nombre de combinaisons possible augmente.

Cependant, il est important de noter qu'il y a une possibilité de doubles comptages ou plus au niveau du service pour une même ligne de bus. Il faut rappeler que l'étude est faite en ligne d'offre (étude à vol d'oiseau). En reprenant encore une fois l'exemple du trajet à la Figure 3-29, il y aurait un double comptage au niveau des arrêts A, B et C. En effet, en appliquant la définition du niveau 2 de service, les segments entre ces 3 arrêts sont : AB, BC et AC. Le problème est que le service entre AB combiné au service entre BC forme la ligne d'offre AC.

Ainsi, pour y remédier, une contrainte d'angle doit être ajoutée pour le trajet de chaque ligne de bus. La Figure 3-33 présente les segments de voyages à considérer pour l'exemple de la Figure 3-29.

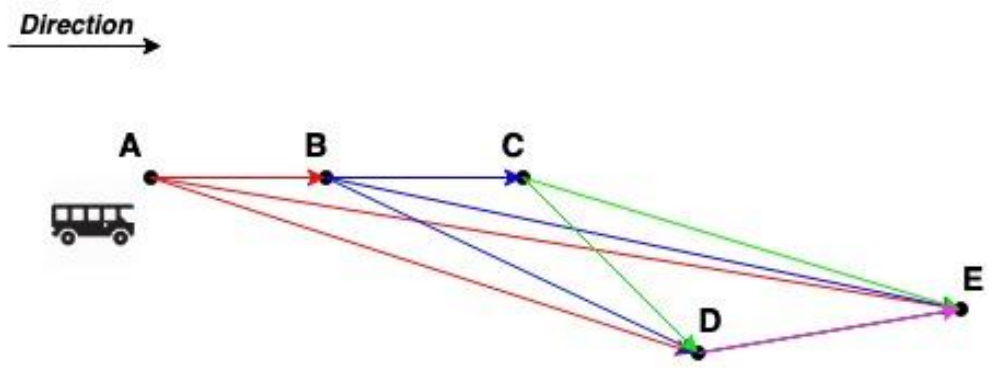


Figure 3-33: Exemple de lignes d'offre de niveau 2 à considérer pour le trajet de la Figure 3-29

Alors, les segments à considérer pour ce trajet sont: AB, AD, AE, BC, BD, BE, CD, CE et DE.

La méthode consiste à calculer l'angle existant pour toutes les combinaisons de trois arrêts possibles dans la même direction. Si cet angle est plus petit que l'angle de similarité limite qui est déterminé selon la tolérance de l'utilisateur, la séquence entre les 2 stations extrêmes ne doit pas être considérée. L'angle de similarité limite est défini comme étant l'angle minimal qui doit exister entre trois arrêts pour qu'ils soient considérés comme des segments de voyage qui ne se superposent pas. Pour mieux comprendre les segments de voyage partant de la station A de la Figure 3-33 sont utilisés à titre d'exemple dans le Tableau 3-3.

Tableau 3-3: Exemple de nettoyage pour un niveau 2 d'offre

Angle de similarité limite	5º	Status et conclusion
Angle entre BAC	0º	Angle ABC < 5º Segment AB à conserver ; Segment AC à écarter de l'étude
Angle entre BAD	45º	Angle ABD > 5º Segment AD à conserver

Tableau 3-3 : Exemple de nettoyage pour un niveau 2 d'offre

Angle entre BAE	20º	Angle ABE > 5º et ADE > 5º
Angle entre DAE	25º	Segment AE à conserver

Par la suite, les combinaisons gardées peuvent être utilisées dans Traclus_DL.

De cette analyse, il est possible de tirer un indicateur qui caractérise la structure spatiale des lignes de bus : le taux de détour (calculer par Level2Services). Celui-ci permet de déterminer à quel point le trajet de bus est direct ou non. Cet indicateur se calcule de la manière suivante :

$$Taux\ de\ détour = \frac{Nombre\ de\ segments\ conservés}{Nombre\ de\ segments\ totaux}$$

Un taux de détour se rapprochant de 1 représente une ligne de bus avec beaucoup de détours, tandis qu'un taux de détour qui se rapproche de 0 caractérise une ligne de bus directe (service sur une ligne droite). La Figure 3-34 présente la différence qui existe entre deux structures de trajet, une sans aucun détour et une autre avec un nombre important de détours.

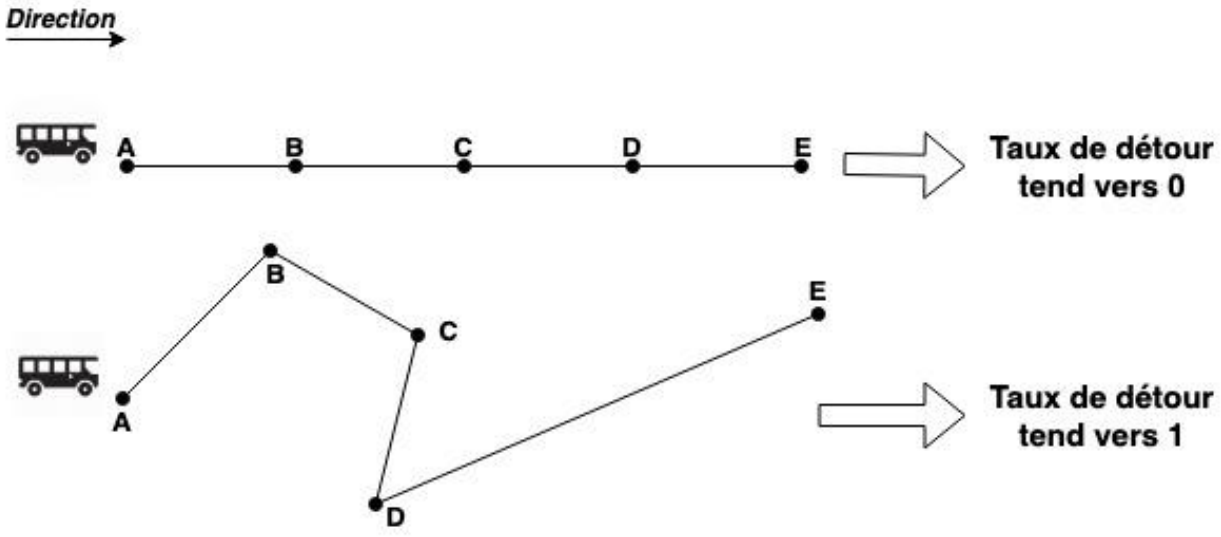


Figure 3-34: Différence de structure de trajet entre un taux de détour qui tend vers 0 et un taux de détour qui tend vers 1

L'autre particularité est au niveau du poids minimal de création. Ce paramètre est déterminé en fonction du nombre d'heures étudié ainsi que du nombre de voyages par heure souhaité pour qu'un corridor soit créé.

Par exemple, si l'étude s'effectue sur une journée au complet (24 heures) et que le nombre de voyages souhaité par heure pour qu'un corridor soit créé est de 2 alors le poids à utiliser est :

$$Poids\ minimal\ de\ création = 24 * 2 = 48$$

En dernier lieu, il est important de mentionner que Level2Services s'assure au préalable qu'un corridor ne comportera pas des segments de trajet (direct ou complet) provenant d'une même ligne de bus. La Figure 3-25 présente un exemple de trajet pour mieux comprendre pourquoi un corridor pourrait être confronté à cette situation.

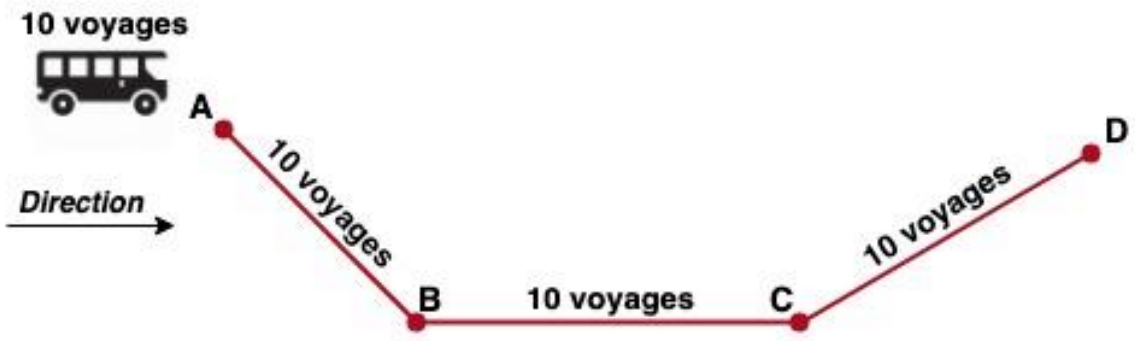


Figure 3-35: Exemple d'un trajet

AB, AC, AD, BC, BD et CD sont des segments de trajet complet et sont perçus par Traclus_DL comme des lignes de désir ou d'offre indépendantes. Ainsi une distance de recherche assez grande pourrait potentiellement regrouper tous ces segments dans un même corridor. Pour y remédier, Level2Services prend en considération le mode de fonctionnement de Traclus_DL. Il assigne à ces segments de trajet un ID similaire, ce qui obligera Traclus_DL à les considérer comme des lignes de désir semblables. Ainsi, il est impossible pourTraclus_DL de regrouper ces segments de trajet dans un même corridor.

Une situation un peu plus complexe peut se présenter. Un segment de trajet peut être emprunté par différentes lignes de bus (ex.Figure 3-36).

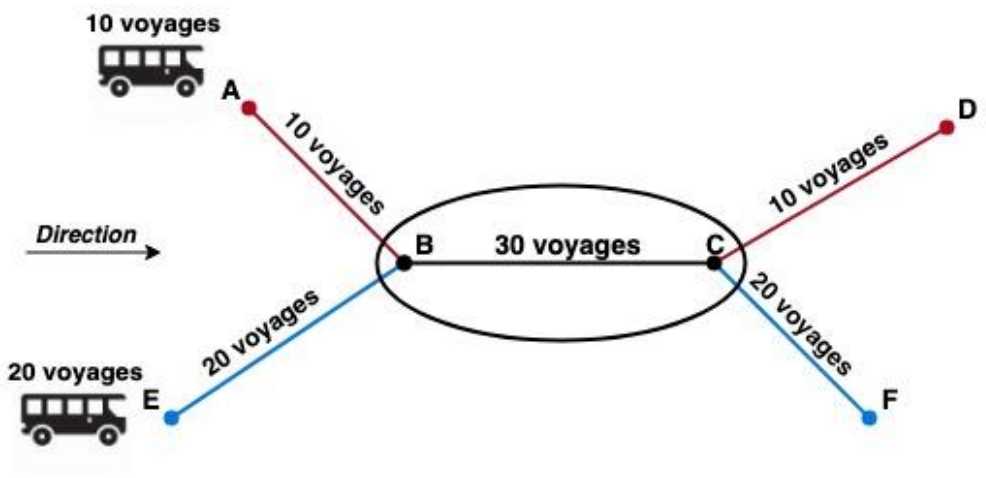


Figure 3-36: Exemple d'un segment de trajet emprunter par deux lignes de bus

Pour remédier à ce problème, Level2Services duplique les segments concernés. Il leur assigne la quantité de voyages qui leur correspond ainsi qu'un ID égal à celui du trajet mère. La Figure 3-37 présente un exemple de ce processus.

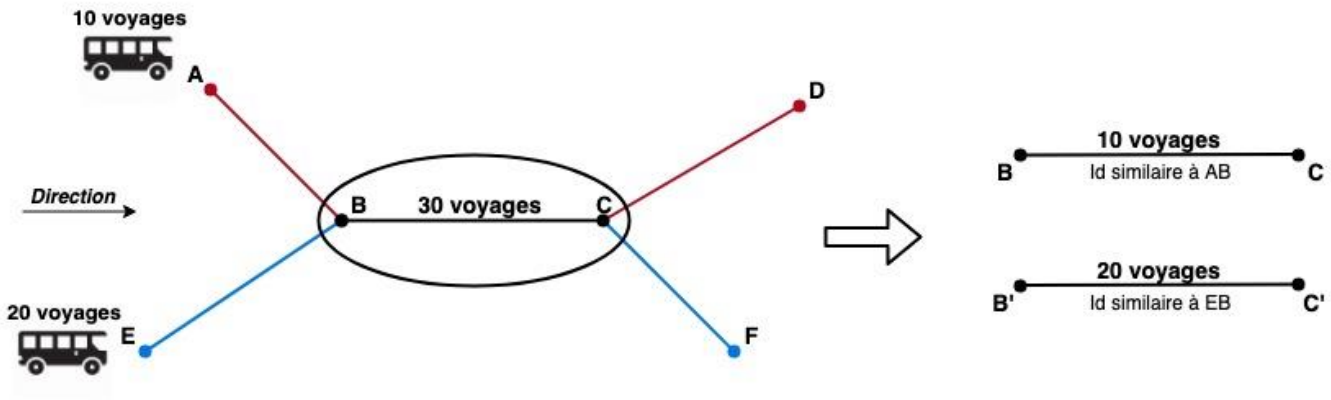


Figure 3-37: Exemple de la méthode de duplication

Cette duplication n'affecte pas le calcul du taux de détour puisqu'il est calculé par Level2Services avant la duplication. De plus, cette duplication sera fusionnée à nouveau par Traclus_DL puisque ces segments sont superposés (même géométrie) et ont un ID différent.

3.6 Comparaison de l'offre et de la demande

Comme expliqué dans la revue de littérature, un des grands avantages de l'utilisation d'une grille comme outil de lissage est la possibilité de comparer des cellules à différents niveaux.

Le principe utilisé consiste à comparer le poids de la demande (nombre de déplacements par cellule) au poids de l'offre (nombre de voyages par cellule * capacité du bus ou du métro).

La STM fournit les caractéristiques techniques de leurs bus ainsi que de leurs métros (STM, 2013) :

Bus standard	**Bus articulé**	**Métro**
Figure 3-38: Bus standard (STM, 2013)	Figure 3-39: Bus articulé (STM, 2013)	Figure 3-40: Metro AZUR (STM, 2013)
Capacité places assises : 30	**Capacité places assises** : 54	**Capacité places assises** : 306
Capacité maximale : 75	**Capacité maximale** : 105	**Capacité maximale** : 1200

Le processus consiste à tout simplement superposer les grilles d'offre à ceux de la demande (selon la zone) et en soustrayant le poids de l'offre au poids de la demande.

3.7 Distribution temporelle

Pour complémenter les analyses effectuées par Traclus_DL et Grille_CR ou pour guider celles-ci, un indicateur intéressant à étudier est la distribution de la demande ou de l'offre.

- **<u>Distribution temporelle de la demande</u>**

  La distribution temporelle de la demande revient à calculer le nombre de déplacements effectués sur une certaine plage horaire. Cette information peut être tirée de l'enquête Origine-Destination où les répondants déclarent l'heure (de départ) à laquelle ils se sont

déplacés pour chaque déplacement. La Figure 3-41 présente un exemple de distribution temporelle pour la zone présentée à la Figure 3-1.

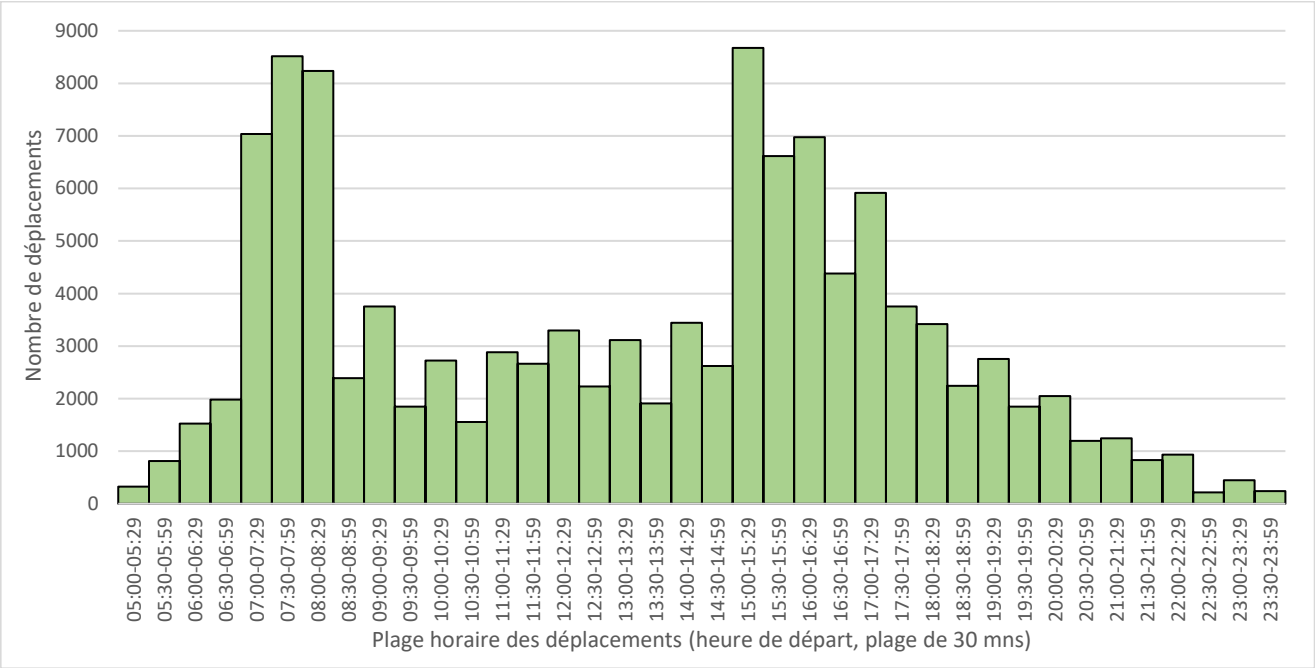


Figure 3-41: Exemple d'une distribution temporelle (déplacements internes de la zone se trouvant à la Figure 3-1)

Les heures se trouvant entre minuit et 5h00 sont omises de ce graphique parce qu'il y a peu de déplacements à ces heures.

- **<u>Distribution temporelle de l'offre</u>**

La distribution temporelle de l'offre peut être vue sous deux angles différents. Il est possible de calculer le nombre de passages-arrêts par plage horaire ou de calculer le nombre de voyages par plage horaire. Pour mieux comprendre la nuance entre les deux, la Figure 3-42 présente un cas simple.

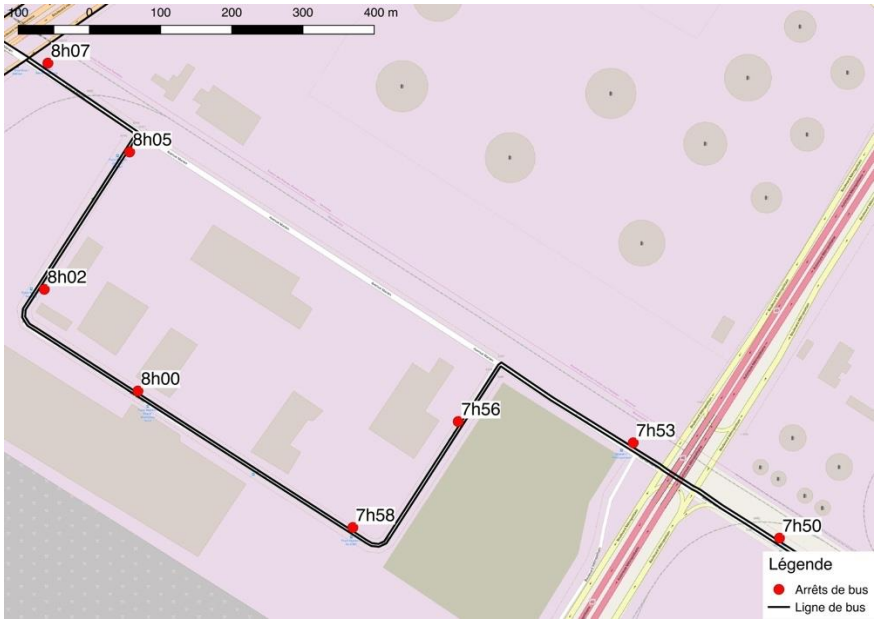


Figure 3-42: Exemple pour expliquer la différence entre passage-arrêts et voyages

La Figure 3-42 présente une ligne de bus s'arrêtant à plusieurs arrêts (un arrêt à une station = un passage-arrêt) dans une zone étudiée (rectangle orange). Ainsi, dans cet exemple, il y a dans la zone étudiée :

- Un voyage (Heure : 7h56)
- 5 passages-arrêts (Heure : 7h56, 7h58, 8h00, 8h02 et 8h05)

L'heure d'un voyage correspond à l'heure du premier arrêt de celui-ci dans la zone d'étude. Les données GTFS fournissent les informations nécessaires pour produire ce type d'indicateur.

CHAPITRE 4 PROFIL DE L'EST DE L'ÎLE DE MONTRÉAL

Afin de mieux comprendre l'ensemble de la méthodologie présentée et de voir, à l'aide de quelques exemples, l'utilité des outils Traclus_DL et Grille_CR, deux études de cas sont effectuées.

La première étude de cas analyse les déplacements faits à vélo sur l'Île de Montréal. Par la suite, une étude plus spécifique est effectuée du côté de deux établissements scolaires, Université de Montréal (incluant : HEC et Polytechnique) et Brébeuf, afin de savoir s'il y aurait un potentiel de changement modal vers le vélo.

La deuxième étude de cas se concentre sur l'offre de service (bus STM) vers la station de métro Honoré Beaugrand. De plus, une analyse est faite sur les usagers en automobile à comportement similaire à ceux utilisant cette offre.

4.1 Étude de cas 1 - Déplacements à vélo sur l'île de Montréal

La première étude de cas consiste à étudier les lignes de désir des déplacements à vélo effectués sur l'île de Montréal par ses résidents. Les données proviennent de l'enquête OD 2013 qui présente une journée type d'automne. Il y a un total de 113 490 déplacements effectués à vélo (valeur pondérée). La Figure 4-1 présente ces lignes de désir.

Figure 4-1: Lignes de désir des déplacements à vélo sur l'île de Montréal (enquête OD 2013).

À première vue, la seule information qui peut être extraite de cette carte est que la plupart des déplacements effectués se situent au centre de l'Île. Autrement, il est difficile de déterminer ce qu'il se passe (direction des lignes de désir, importance, …).

4.1.1 Profil des utilisateurs et de leurs déplacements

Avant d'effectuer une analyse par grille, il est intéressant de produire le profil des utilisateurs et de leurs déplacements :

<u>Âge des utilisateurs</u>

La première caractéristique à analyser est le type d'utilisateur. La Figure 4-2 et la Figure 4-3 présentent la répartition des utilisateurs selon leur âge et leur occupation principale.

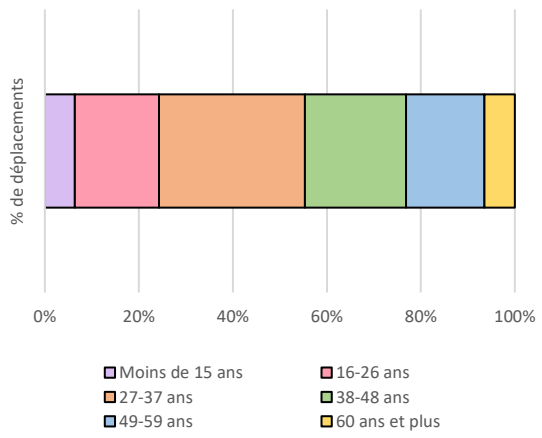


Figure 4-2: Pourcentage des déplacements selon le groupe d'âge

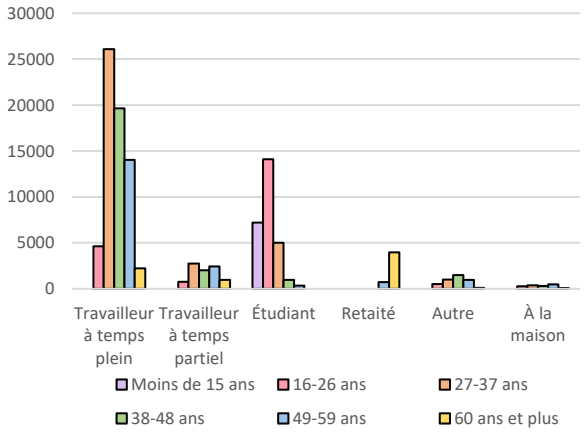


Figure 4-3: Nombre de déplacements selon l'occupation et le groupe d'âge

Selon les Figure 4-2 et Figure 4-3, un grand nombre des déplacements sont faits par de jeunes professionnels (31%), suivis par des personnes âgées entre 38 et 48 ans (22%) ainsi qu'une population étudiante (18%). Cette information sera utile lors du calcul de la distance maximale de recherche.

<u>Distribution temporelle des déplacements</u>

La distribution temporelle des déplacements permet de déterminer le moment où il y a une forte concentration de déplacements à vélo. La Figure 4-4 fait ressortir le profil temporel des déplacements à vélo.

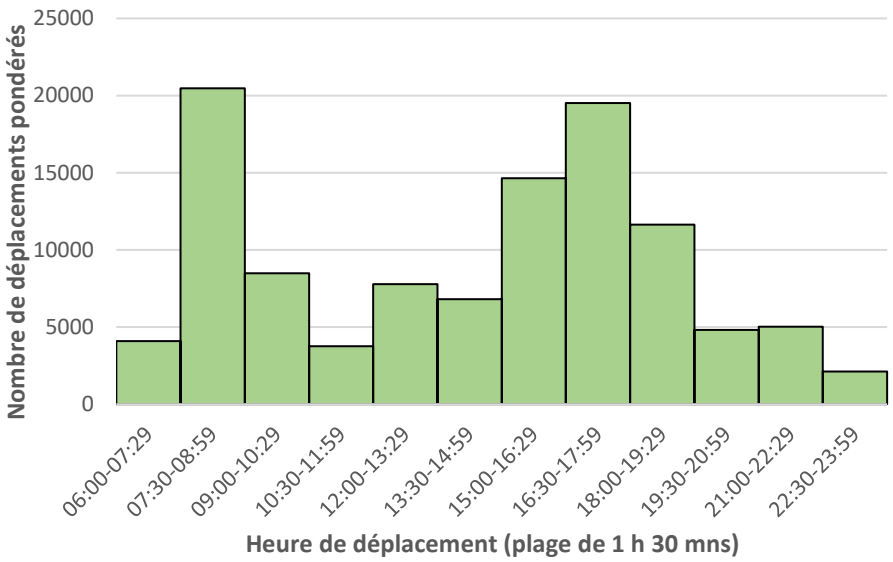


Figure 4-4: Distribution temporelle des déplacements à vélo (jour moyen de semaine, O-D 2013)

Les déplacements entre minuit et 5h59 sont omis de la Figure 4-4 à cause du faible nombre d'observations.

Le profil temporel habituel des déplacements d'une zone urbaine ressort clairement dans la Figure 4-4 avec des pics de concentrations aux heures de pointe, soit entre 7h30 et 8h59 et entre 16h00 et 17h59.

Pour l'analyse en grille, l'étude se concentre sur les déplacements effectués en heure de pointe du matin (7h30 à 9h00) ayant pour motif le travail ou l'école (20% des déplacements à vélo de toute la journée, 88% des déplacements en heure de pointe à vélo). Étudier les déplacements en heure de pointe de l'après-midi serait en grande partie une étude redondante sachant que près de 60% des déplacements sont des déplacements symétriques (matin : maison → travail ou école ; après-midi : travail ou école → maison). Cela revient à analyser un total de 759 lignes de désir.

4.1.2 Détermination des paramètres pour Traclus_DL et Grille_CR

Avant de pouvoir effectuer une analyse par grille, il faut déterminer les paramètres à utiliser pour les deux programmes.

Traclus_DL

- **Longueur de segmentation**

Le premier paramètre à déterminer est la longueur de segmentation pour les lignes de désir. La première étape consiste à faire la distribution de la distance à vol d'oiseau des déplacements à l'étude. Une distribution des distances à vol d'oiseau est produite à la Figure 4-5.

Médiane : 2898 m

Moyenne : 3265 m

75ième percentile : 4438 m

Maximum : 21384 m

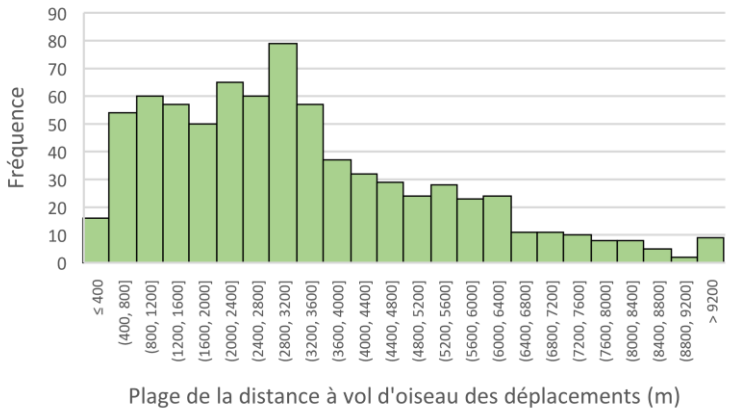


Figure 4-5: Distribution de la distance à vol d'oiseau des déplacements

Selon ces résultats et selon la méthodologie expliquée dans la section 3.3 (Comment choisir les paramètres de Traclus_DL?), une longueur de segmentation tournant autour 200 mètres devrait convenir pour cette étude.

Cette valeur s'explique de la manière suivante :

$$Distance \text{ à } vol\ d'oiseau\ moyenne = 3265\ mètres\ ;$$

$$Longueur\ de\ segmentation = 3265 * 0.05 \approx 150\ mètre$$

Le 0.05 représente le 5% de longueur moyenne des lignes de désirs étudiées (3265 mètres) qui s'assure de ne pas avoir une perte d'information lors de la création des corridors.

- **<u>Angle maximal de déviation</u>**

Pour cette étude, un angle de 12° est utilisé. Cet angle permet d'avoir une certaine déviation d'angle, mais limite la différence d'angles entre deux segments à 24°. De plus, on s'assure

d'avoir un plus grand nombre de segments assignés à un corridor (angle <10º très restreints, recherche de segments quasiment similaires au niveau de la direction).

- **<u>Poids minimal de création</u>**

Puisqu'il y a des facteurs de pondération à prendre en compte, il faut utiliser la deuxième méthode expliquée dans la méthodologie pour faire le choix du poids minimal de création des corridors. La Figure 4-6 présente la distribution de ceux-ci.

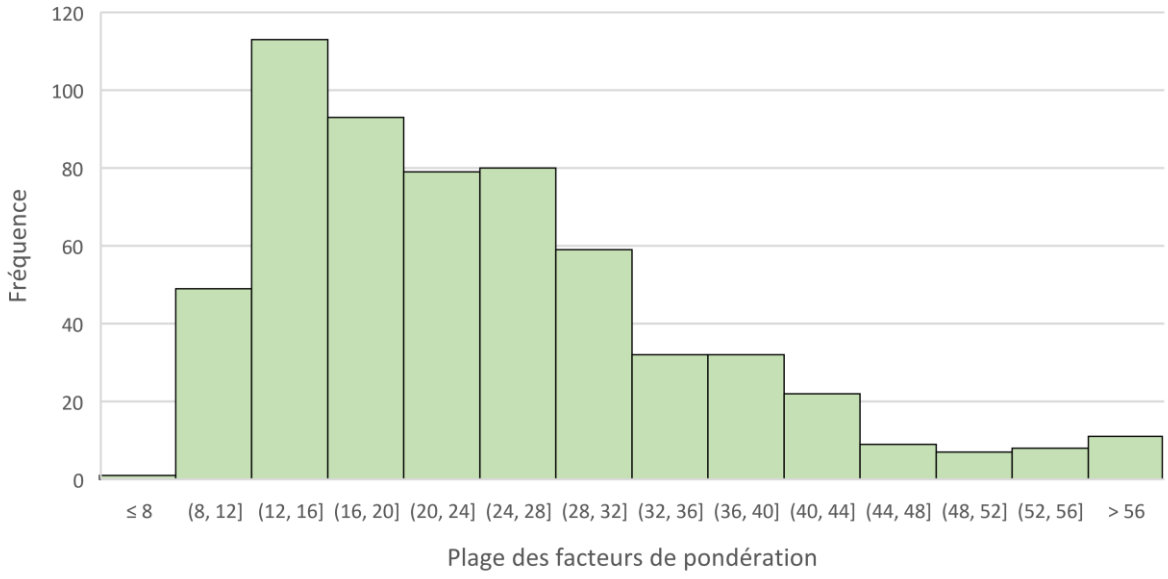


Figure 4-6: Distribution des facteurs de pondération

La classe dominante est celle se situant entre 12 et 16. Une valeur de plus ou moins 5 segments de déplacements serait souhaitable à avoir dans un corridor. Alors le poids minimal de création est de :

$$Poids\ minimal\ de\ création = 16 * 5 = 80$$

Il est possible que cette valeur varie en fonction des résultats obtenus lors du choix de la distance maximale de recherche.

- **<u>Distance maximale de recherche</u>**

On rappelle qu'il a été pris comme hypothèse que deux segments se trouvant dans un même corridor doivent se trouver à une distance de marche acceptable (distance de marche vers un arrêt de bus). Il est mentionné dans les normes de services de la STM, qu'elle fixe une distance de marche maximale à 500 mètres (STM, 2011).

Comme il est mentionné dans la méthodologie, une tortuosité de 2 est choisie. Ces deux valeurs permettent d'établir la distance approximative qui devrait exister entre les 2 segments les plus éloignés d'un même corridor:

$$Distance\ entre\ deux\ 2\ segments = 500/2 = 250\ mètres$$

Après quelques itérations, la combinaison de paramètres la plus satisfaisante pour cette étude est :

- Longueur de segmentation : 150 mètres
- Angle maximal de déviation : 12°
- Poids minimal de création des corridors : 70

Comme spécifié dans la méthodologie, le poids minimal de création des corridors est le paramètre qui a le plus de chance de varier. Une valeur égale à 70 dans cette étude permet d'avoir 50% des segments de déplacements assignés à un corridor. De plus, il permet de respecter plus ou moins le ratio segments par corridor. La Figure 4-7 montre la distribution de celui-ci.

Médiane : 5 segments

Moyenne : 8 segments

75ième percentile : 8 segments

Maximum : 68 segments

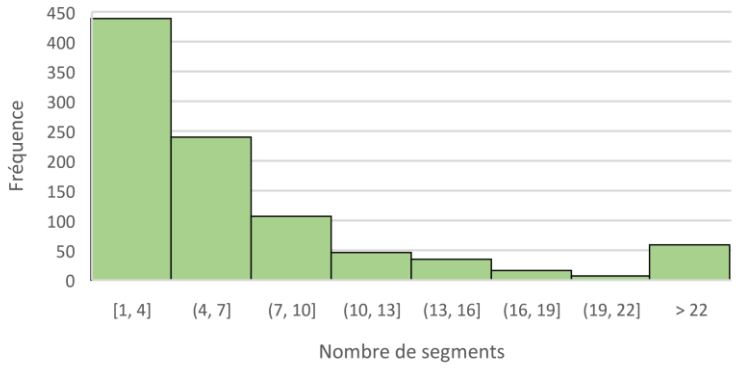


Figure 4-7: Distribution du nombre de segments par corridor

Outre quelques valeurs extrêmes (résultat inévitable dû au fonctionnement de DBSCAN-seg), le ratio se situe principalement entre 3 et 8 segments par corridor avec une médiane égale à 5.

- Distance maximale de recherche : 150 mètres

Dans cette étude, une distance de recherche maximale de 150 mètres accompagnée d'un poids minimal de création de 70 permet des respecter les critères de création (au moins 50% des segments de déplacements assignés à un corridor et des longueurs de polygones convexes tournant autour de la distance calculée). La Figure 4-8 résume la distribution de ces longueurs.

Médiane : 257 m

Moyenne : 357 m

75ième percentile : 406 m

Maximum : 1887 m

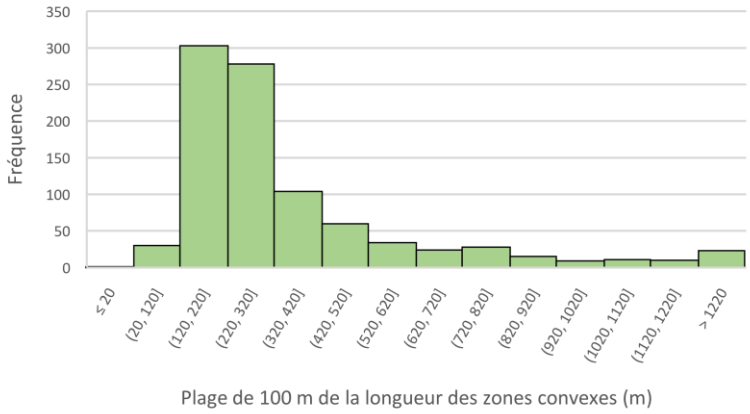


Figure 4-8: Distribution de la longueur de la zone convexe des segments d'un même corridor

La plus haute concentration des longueurs des zones convexes se situe entre 200 et 320 mètres (66%) avec une médiane égale à 257 mètres. Les valeurs extrêmes sont encore inévitables en raison du fonctionnement de l'algorithme de DBSCAN-seg, cependant elles sont limitées.

Grille_CR

Il y a 3 paramètres à définir :

- **Système de Coordonnées de Référence (SCR)**

  Le système de coordonnées utilisé est celui de la zone « NAD 83 / MTM zone 8, ESPG : 32188 ». Ce système est utilisable pour la province du Québec et permet d'utiliser les points de géolocalisation de l'enquête Origine-Destination de type « X » et « Y ».

- **Coordonnées des extrémités de la grille de base**

  Les coordonnés de la grille de base sont :

  - ST_X_{min} : (259889 ; 5021675)
  - ST_X_{max} : (316483 ; 5071200)
  - ST_Y_{min} : (316483 ; 5027841)
  - ST_Y_{max} : (267323 ; 5070200)

  La grille de base recouvre l'ensemble de l'île de Montréal. Celle-ci est présentée à la Figure 4-9.

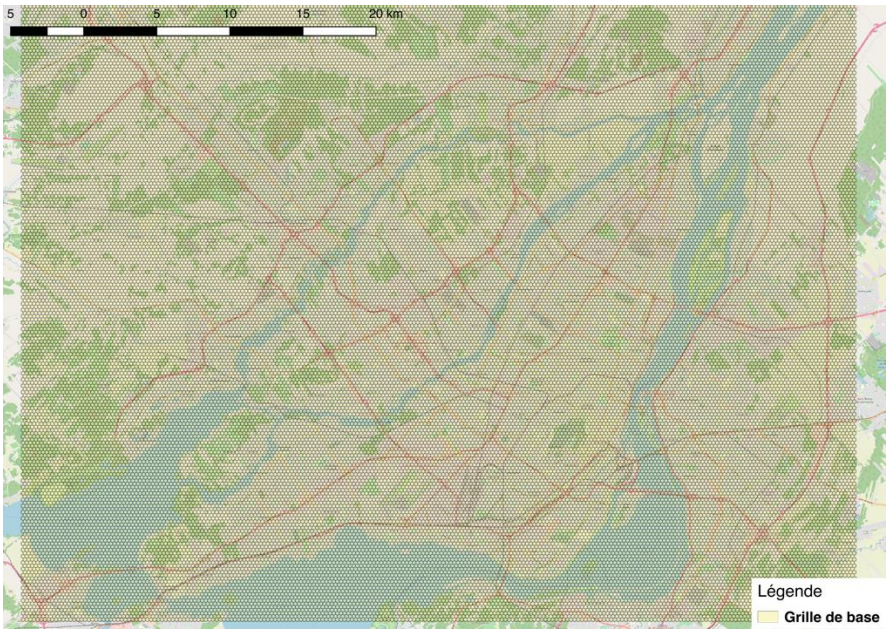


Figure 4-9: Grille de base

Mieux vaut avoir une grille de base qui recouvre un peu plus que la zone d'étude qu'une grille trop petite puisque Grille_CR ne garde que les cellules nécessaires lors de la création des cartes finales.

- **Taille des mailles**

  Après plusieurs tentatives, la largeur optimale des mailles pour permettre une bonne visualisation des résultats tout en gardant une bonne précision de ceux-ci est égale à 250 mètres. Cette largeur de maille est juste un peu plus grande que la longueur moyenne des corridors créés qui est de 230 mètres.

4.1.3 Analyse par grille

En appliquant les paramètres choisis, il est possible d'effectuer une analyse par grille.

Grille_CR sépare les grands corridors en 4 zones d'étude selon les critères de création expliqués dans la méthodologie :

- Zone 1 : 60° à 149°
- Zone 2 : 150° à 239°
- Zone 3 : 240° à 329°
- Zone 4 : 330° à 360° et 0° à 59°

Les 4 cartes qui suivent (Figure 4-10, Figure 4-11, Figure 4-12, Figure 4-13) présentent la situation actuelle des déplacements effectués à vélo en heure de pointe du matin.

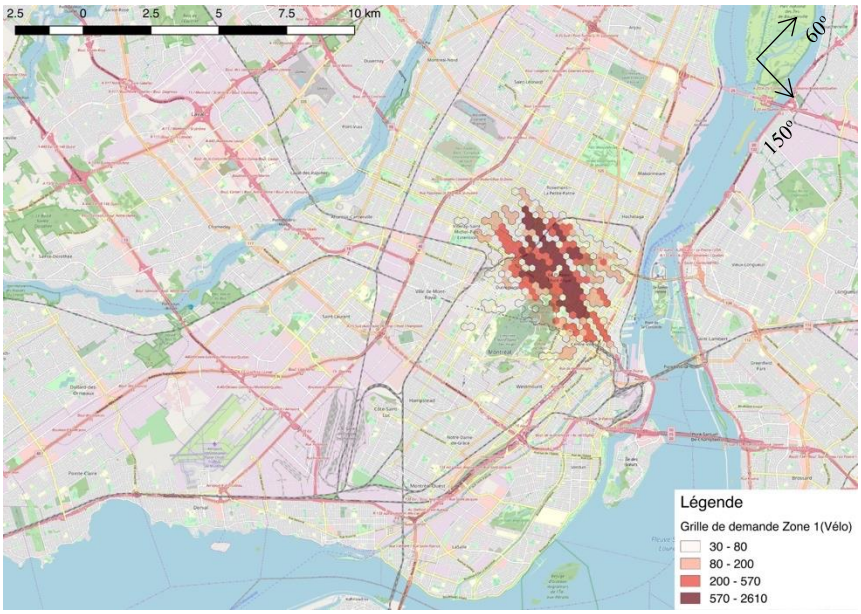


Figure 4-10: Grille des déplacements à vélo (zone 1)

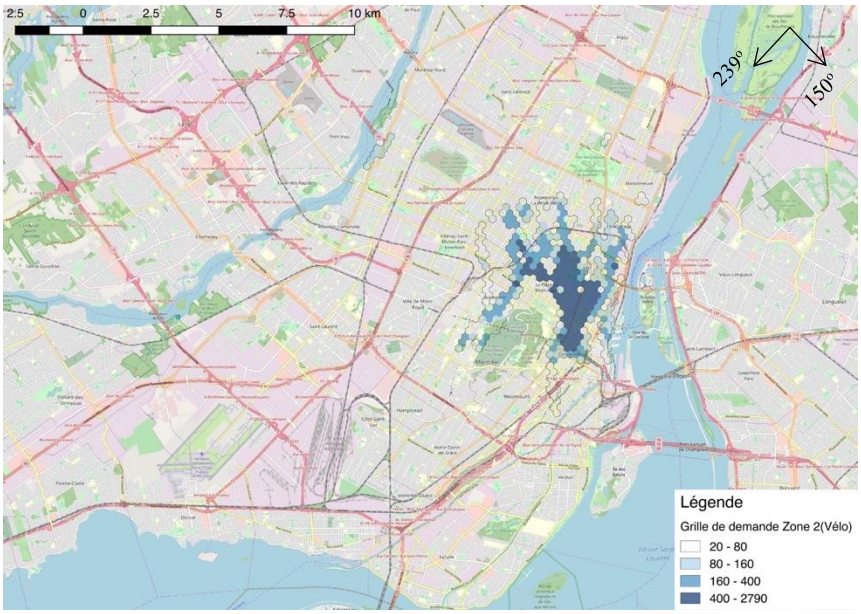


Figure 4-11: Grille des déplacements à vélo (zone 2)

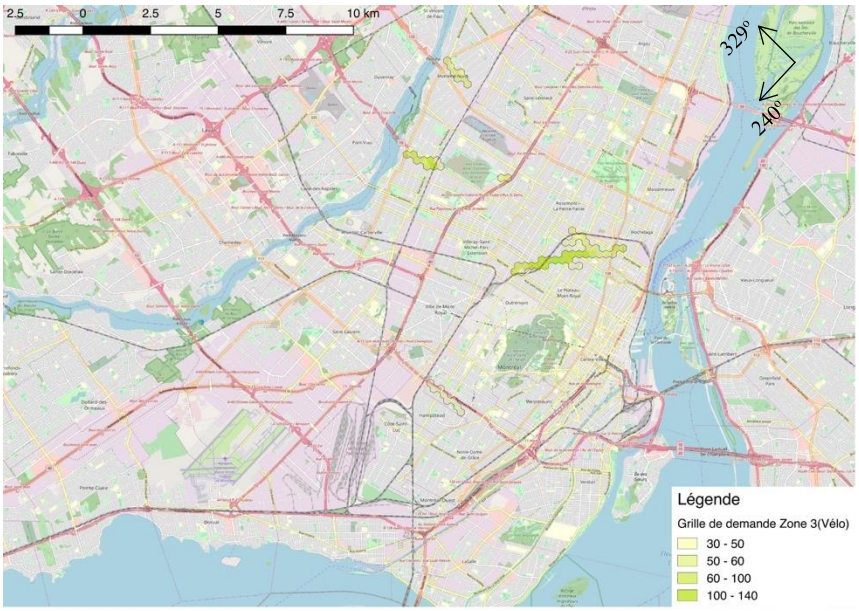


Figure 4-12: Grille des déplacements à vélo (zone 3)

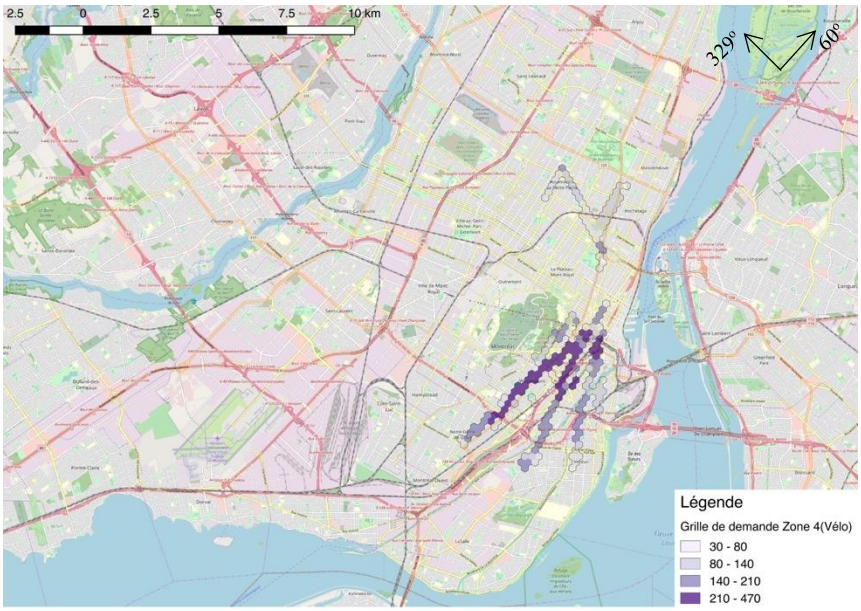


Figure 4-13: Grille des déplacements à vélo (zone 4)

Selon ces cartes, les déplacements à vélo se font principalement du côté du Plateau Mont-Royal et du centre-ville. Connaissant la situation actuelle, il est intéressant de tenter de comprendre pourquoi

le vélo est si peu utilisé (part modale de 2.5% sur l'île de Montréal (Montréal, 2015) – à cet effet, il ne faut pas oublier que l'enquête est faite l'automne et que la part du vélo diminue à travers les quatre mois d'enquête) et de voir s'il y aurait un potentiel de transfert modal à certains endroits.

4.1.4 Piste cyclable sur l'île de Montréal

La première question à poser est de savoir s'il y a présence de pistes cyclables et de quel type elles sont.

À Montréal, il existe six grands types de pistes cyclables selon le portail des données ouvertes :

1. Chaussée désignée

   Ce type de piste cyclable ne comporte pas de voies réservées pour les cyclistes. La signalisation et le marquage indiquent que la chaussée est partagée entre les véhicules et les cyclistes.

Figure 4-14: Exemple de chaussée désignée (SAAQ, 2018)

2. Bande cyclable

   Ce type de piste cyclable comporte une voie réservée. Celle-ci est indiquée par un marquage au sol et par la signalisation. Il n'existe aucune barrière physique.

Figure 4-15: Exemple d’une bande cyclable (SAAQ, 2018)

3. Piste cyclable sur rue

Ce type de piste cyclable ressemble énormément à une bande cyclable, mais la différence majeure est la présence d’une séparation physique (bollard).

Figure 4-16: Exemple d’une piste cyclable sur rue (Arrondissement_Outremont, 2018)

4. Sentier polyvalent

   Ce type de voie est partagée par tous les usagers qui pratiquent un mode de déplacements de type actifs (marche, vélo, patin à roulettes, …). Il est souvent retrouvé dans des parcs.

Figure 4-17: Exemple d’un sentier polyvalent (Québec, 2017b)

5. Piste cyclable au niveau du trottoir

   Ce type de piste cyclable est une voie réservée exclusivement aux cyclistes au même niveau que le trottoir.

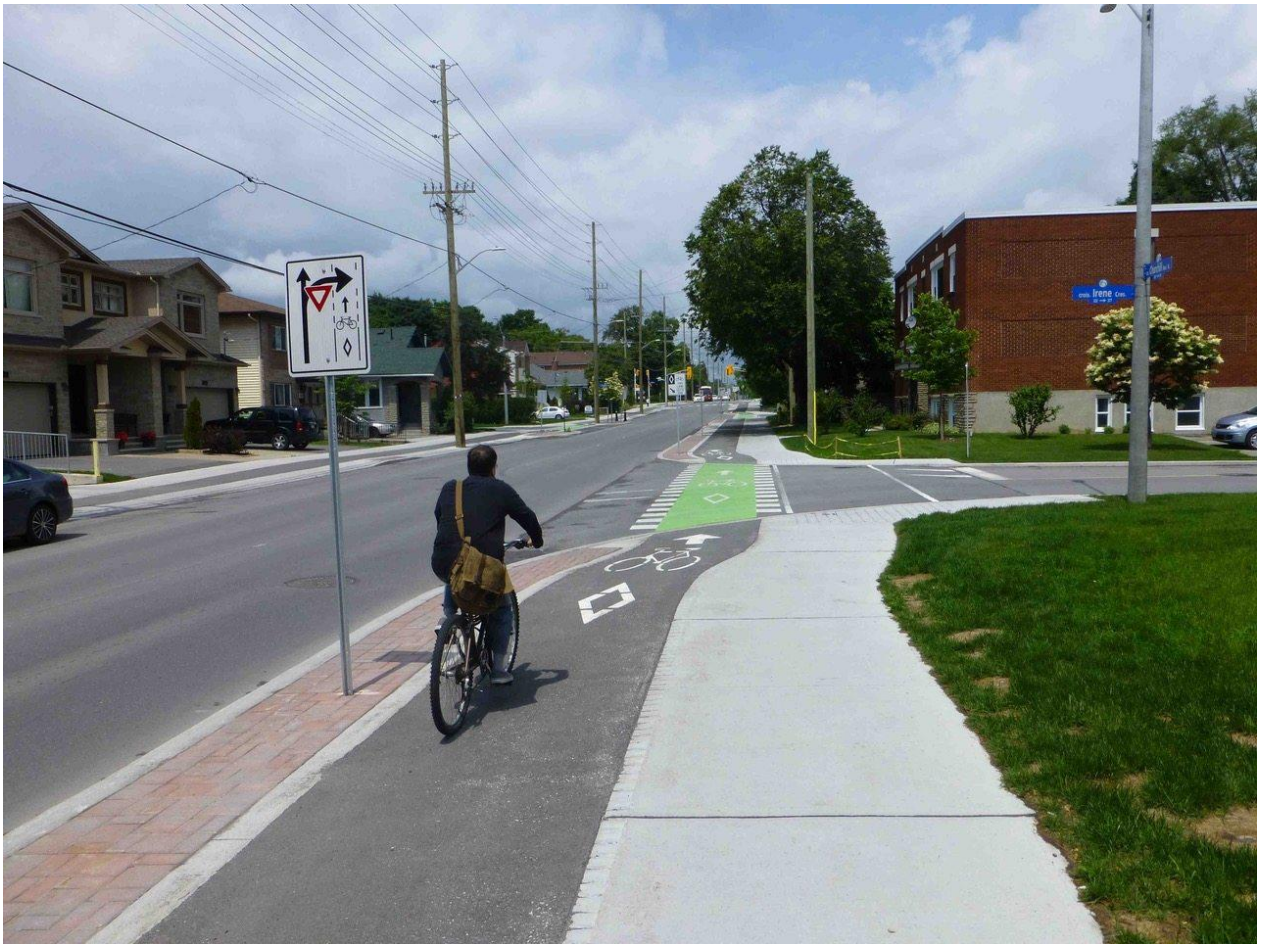


Figure 4-18: Exemple d’une piste cyclable au niveau du trottoir (Québec, 2017a)

6. Piste cyclable en site propre

Ce type de piste cyclable est située à l’écart de toute circulation, est exclusivement pour les déplacements à vélo et est en ite propre.

Figure 4-19: Exemple d'une piste cyclable en site propre (SAAQ, 2018)

L'aménagement des pistes cyclables sécuritaires et confortables est essentiel à la popularité de l'utilisation du vélo comme mode de transport (Turcot & St-Jacques, 2015). Les Pays-Bas ont réussi à augmenter leur part modale du vélo à 27% en mettant en place des pistes cyclables utilitaires, efficaces et sécuritaires (Turcot & St-Jacques, 2015).

Selon le niveau de sécurité, une échelle de couleur est mise en place pour mieux visualiser la situation actuelle des pistes cyclables disponibles à Montréal:

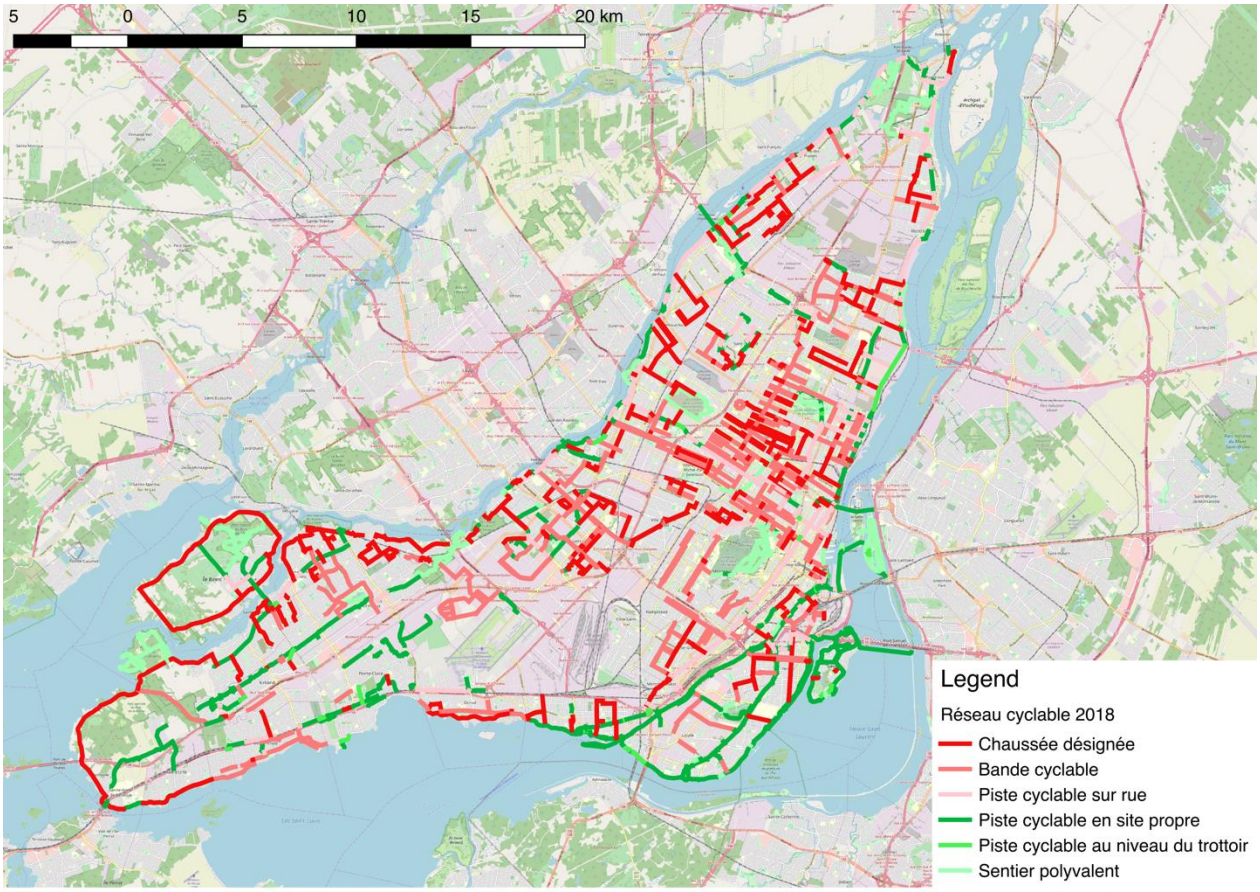


Figure 4-20: Pistes cyclables actuelles sur l'île de Montréal selon leur niveau de sécurité (figure créée grâce aux données ouvertes de Montréal)

Il existe énormément de pistes cyclables sur l'île de Montréal. Cependant, un grand nombre d'entre elles sont catégorisées comme étant une chaussée désignée ou une bande cyclable, soient les 2 types de pistes les moins sécuritaires. N'ayant aucune séparation physique avec les automobiles, les risques d'accident sont élevés (accrochage, collision avec la portière d'un véhicule, collision aux intersections …). Selon des chiffres de la SPVM, il y aurait eu 742 accidents à vélo en 2013 (Martellini, 2014).

De plus, il est important de soulever la non-connectivité des pistes entre elles à plusieurs endroits. Ceci contraint les utilisateurs de vélo à emprunter des voies de circulation non démarquées aux fins de cet usage, situation encore plus dangereuse.

Il est intéressant d'effectuer une analyse ciblée pour voir s'il y aurait des possibilités de transfert modal (ex. auto vers le vélo) pour les centres d'intérêt recevant un grand nombre de déplacements

(ex.: école, université …). Pour ce faire, une analyse spécifique est effectuée au niveau des déplacements effectués vers et en partance de l'Université de Montréal et du collège Brébeuf.

4.1.5 Analyse des déplacements vers Université de Montréal et le collège Brébeuf

L'Université de Montréal (incluant HEC, Polytechnique) et le collège Brébeuf se situent approximativement au centre de l'Île de Montréal. Ils sont responsables d'un très grand nombre de déplacements. Selon les chiffres de l'enquête Origine Destination 2013, 50 920 déplacements sont générés (partant et se dirigeant) par ces quatre établissements. La Figure 4-21 et la Figure 4-22 présentent le positionnement des établissements étudiés et les lignes de désir produites par ceux-ci.

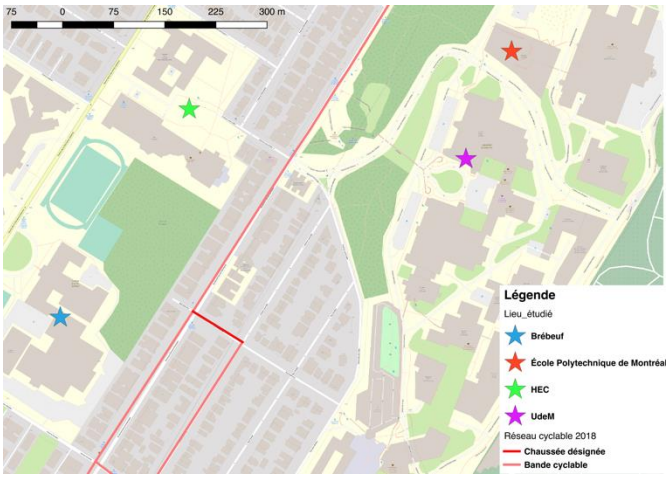


Figure 4-21: Localisation des quatre lieux étudiés

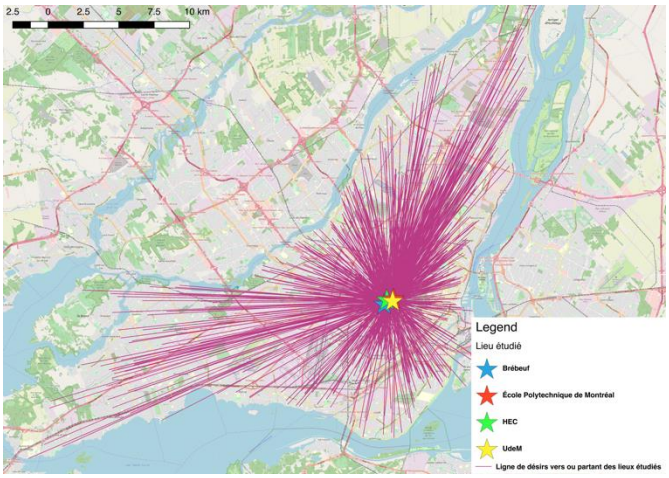


Figure 4-22: Lignes de désir produites par les quatre lieux étudiés

Les quatre établissements sont bordés par la rue Édouard-Montpetit. Cette rue possède une piste cyclable de type « bande cyclable ». La Figure 4-23 présente la distribution des modes de déplacements utilisés et ainsi permet de mieux comprendre comment les gens se déplacent vers ou de ces endroits.

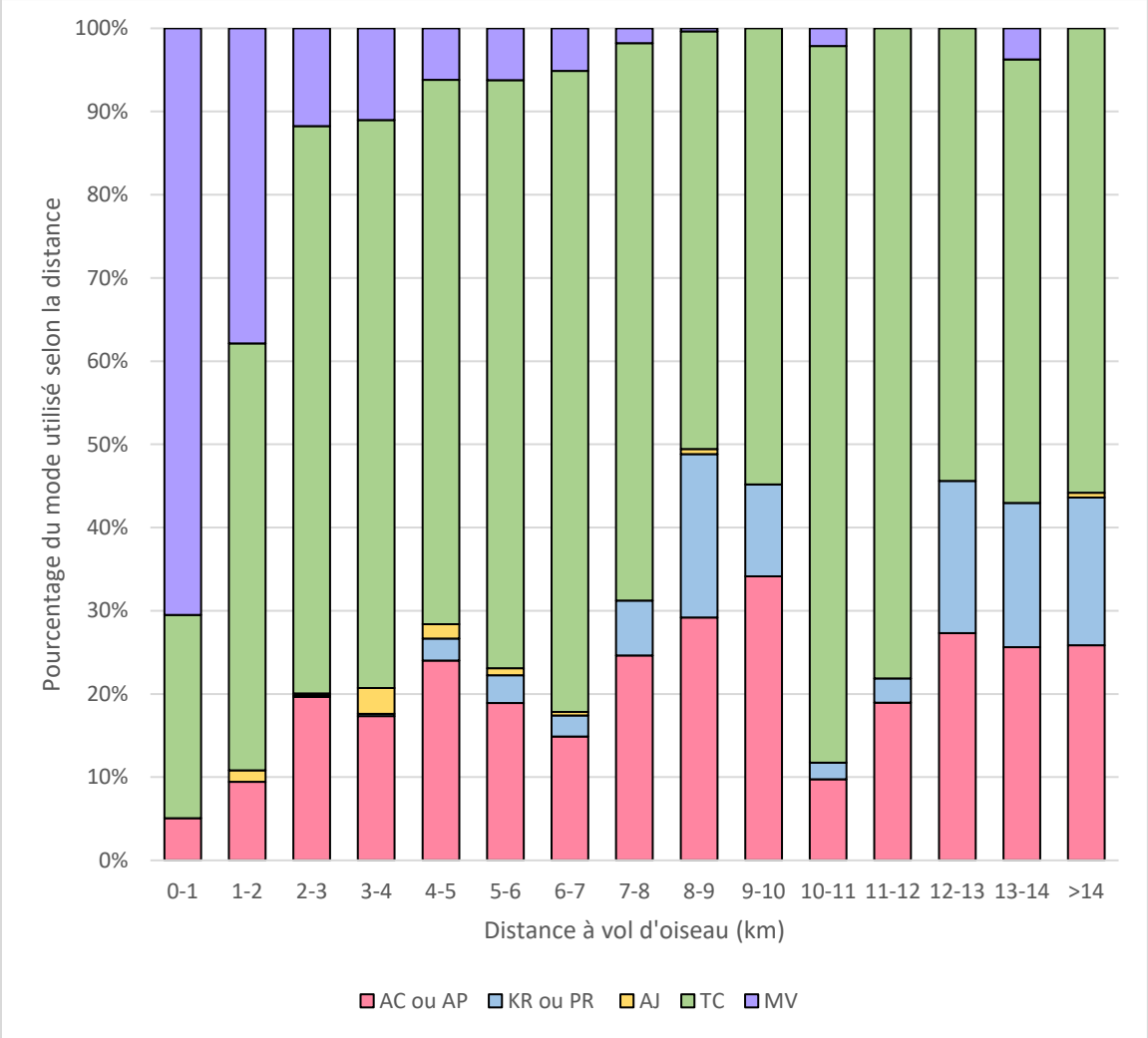


Figure 4-23: % du mode utilisé selon la distance à vol d'oiseau des déplacements effectués vers ou en partance des 4 établissements étudiés

Il faut tout d'abord comprendre la légende de ce graphique :

- AC→ Auto Conducteur
- TC → Transport en Commun
- PR→ AC + TC
- AP → Auto Passager
- MV→ Marche ou Vélo
- KR→ AP + TC

La majorité des déplacements sont effectués en transport en commun. Cependant, il y a un nombre non négligeable de ceux-ci qui sont effectués en partie (PR ou KR) ou en totalité (AC ou AP) en automobile.

Avec une vitesse moyenne de 15 km/h, un déplacement à vélo de 25 à 30 minutes représente une distance de déplacements approximative de 8 kilomètres, soit environ 4 km à vol d'oiseau. De plus, il est possible de trouver dans la littérature le concept de distance seuil. Cette distance correspond à la distance maximale de recherche pour laquelle un trajet peut éventuellement être transféré vers un autre mode (Morency, Verreault, & Frappier, 2019). La distance seuil estimée pour un transfert modal vers le vélo varie entre 4.2 km et 7 km pour un âge entre 13 et 64 ans. Ainsi pour cette étude, seuls les grands corridors de déplacements de moins de 5 km (valeur entre 4.2 km et 7 km) sont étudiés pour analyser le potentiel d'un transfert modal au vélo :

- 54 % des déplacements sont à moins de 5 km pour cette étude;
- 39 % des déplacements à moins de 5 km sont effectués à l'aide d'un mode autre que le vélo ou à pied.

Selon la même méthodologie, les cartes de grilles de désir des déplacements de moins de 5 km non effectués en vélo ou à la marche sont produites à l'aide de Traclus_DL et Grille_CR. Après vérification, les paramètres utilisés sont :

- Longueur de segmentation : 100 mètres;
- Angle maximal de déviation : 20°;
- Poids minimal de création : 60;
- Distance maximale de recherche : 100 mètres;
- Largeur des mailles : 150 mètres;
- Système de coordonnées de référence : NAD83 / MTM Zone 8 (ESPG : 32 188).

Les 4 cartes obtenues sont présentées à la Figure 4-24, à la Figure 4-25, à la Figure 4-26 et à laFigure 4-27.

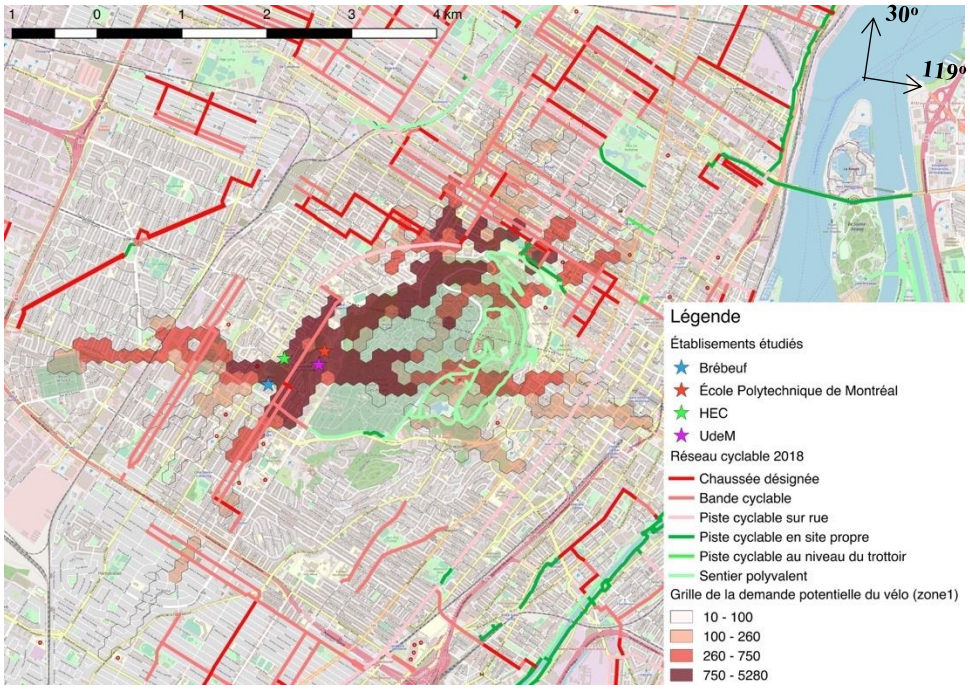


Figure 4-24: Grille de désir de la zone 1 (30° à 119°) des déplacements de moins de 5 km non effectués à vélo ou à la marche

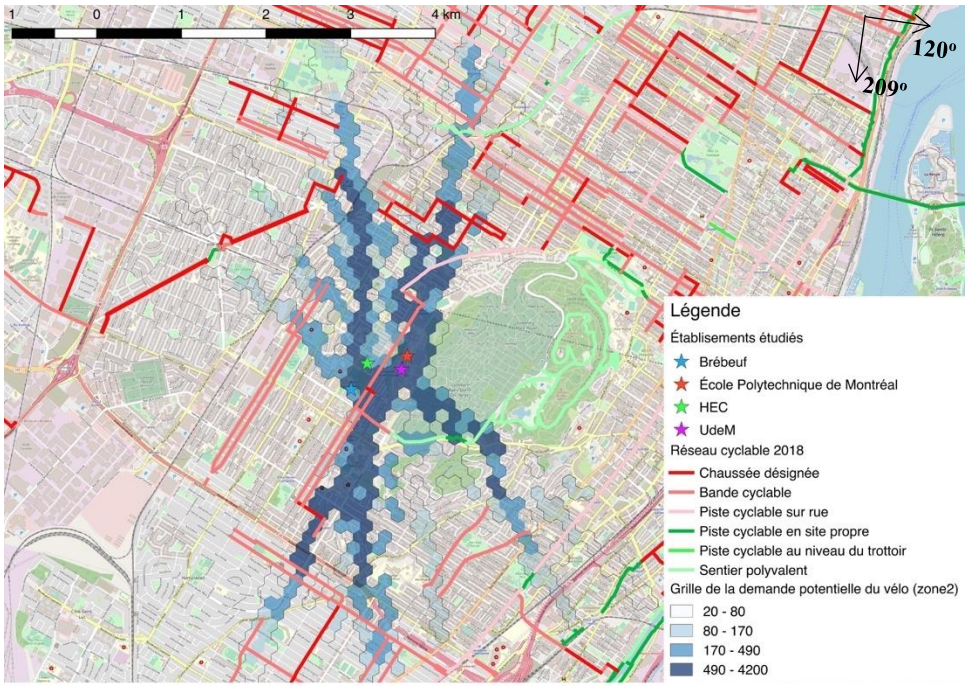


Figure 4-25: Grille de désir de la zone 2 (120° à 209°) des déplacements de moins de 5 km non effectués à vélo ou à la marche

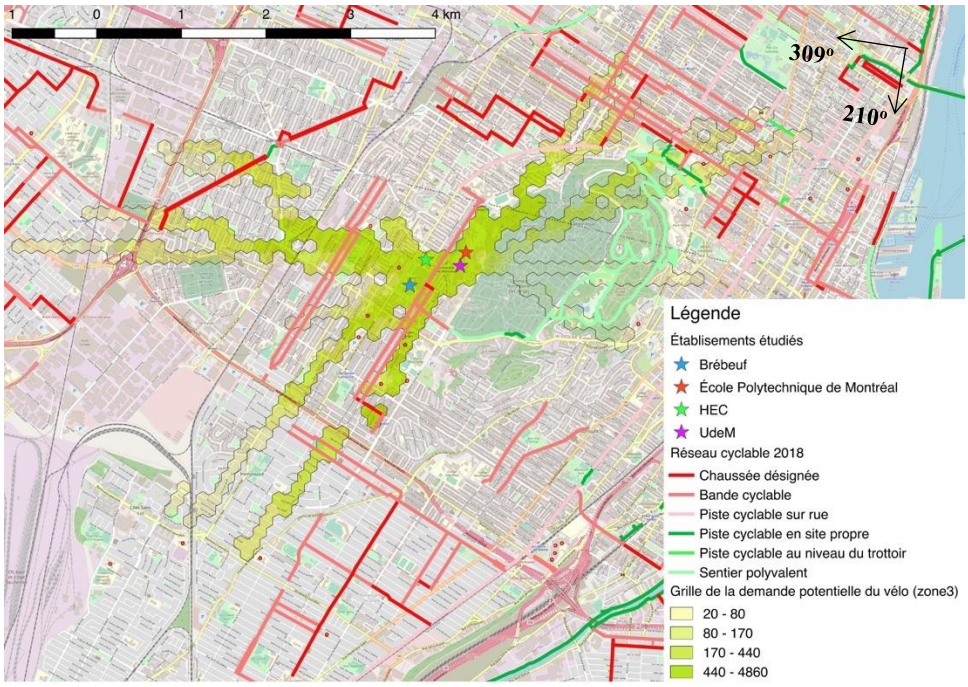


Figure 4-26: Grille de désir de la zone 3 (210o à 299o) des déplacements de moins de 5 km non effectués à vélo ou à la marche

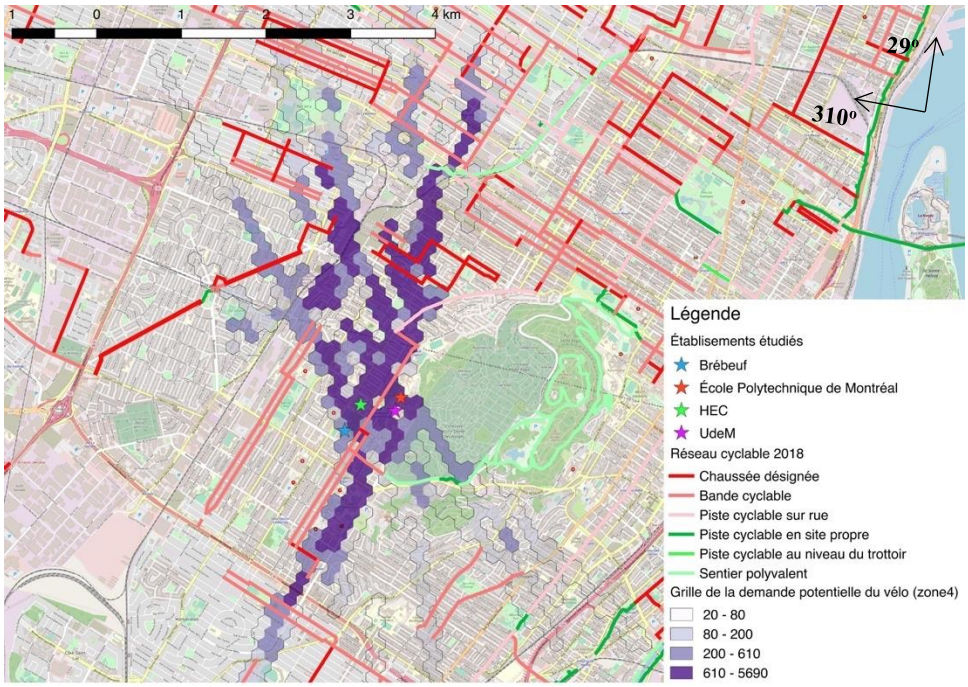


Figure 4-27 : Grille de désir de la zone 4 (300o à 29o) des déplacements de moins de 5 km non effectués à vélo ou à la marche

En analysant ces 4 dernières cartes, il est possible de remarquer le manque de connectivité à plusieurs endroits. En se fiant aux grilles de désir, il y a plusieurs grands boulevards à traverser comme la rue Côtes des Neiges, la rue Jean Talon Ouest ou encore l'avenue Van Horne. Aucune de ces rues ne possède de pistes cyclables.

Les grands corridors se dirigeant vers le Plateau Mont-Royal ou provenant de cette localité (Figure 4-24 et Figure 4-26) sont ceux qui sont les mieux desservis :

- Plusieurs bandes cyclables sur le Plateau Mont-Royal.
- Une piste cyclable sur rue sur la rue Côte-Sainte-Catherine qui donne un accès direct au côté est de l'Université de Montréal. De plus, elle est connectée aux bandes cyclables du Plateau Mont-Royal et est reliée à la bande cyclable de la rue Édouard Montpetit qui donne un accès à HEC, à Polytechnique et aux bâtiments centraux de l'Université de Montréal.
- Un sentier polyvalent au parc du Mont-Royal qui est aussi connecté aux bandes cyclables se trouvant au plateau du Mont-Royal et qui donne un accès direct au côté ouest de l'Université de Montréal et au Collège Brébeuf.

Ces 4 derniers points permettent de comprendre pourquoi la plupart des déplacements qui sont effectués à vélo sont du côté du Plateau Mont-Royal (Figure 4-10 et Figure 4-11).

Ainsi, il est possible de réaliser qu'il y a un très grand potentiel de transfert de mode vers le vélo. En connaissant l'apport au niveau de la santé et au niveau écologique (pas d'émission de particules fines et de CO^2) de l'utilisation du vélo, un ajout de barrières physiques aux bandes cyclables déjà existantes et un ajout de pistes sur rues aux endroits où il y a un manque de connectivité rajouteraient un sentiment de sécurité et encourageraient une plus grande utilisation de ce mode de déplacement.

Des études similaires peuvent être réalisées pour les déplacements effectués en automobile vers une station de métro ou de train (mode: PR ou KR). Il serait alors intéressant de voir s'il y a un transfert modal possible vers un mode actif (vélo ou marche) ou vers un service de transport en commun (bus) pour ces déplacements courts motorisés vers une station.

4.2 Étude de cas 2 – Étude de l'offre de bus vers la station de métro Honoré Beaugrand

4.2.1 Profil de la desserte vers le métro Honoré Beaugrand

La deuxième étude de cas consiste à étudier l'offre de service qui dessert la station Honoré Beaugrand, dernière station de la ligne verte, et à la comparer aux lignes de désir des utilisateurs qui ont un profil de déplacements similaires, mais qui utilisent l'automobile.

La première étape consiste à retrouver l'ensemble des lignes de bus qui se dirige vers cette station de métro. Une analyse est effectuée sur chacune d'entre elles. Seul le trajet entre le point de départ et la station de métro est gardé. Ce découpage permet d'avoir la station Honoré Beaugrand comme terminus puisque tout trajet supplémentaire (trajet après Honoré Beaugrand) n'apporte rien à cette étude.

Les données GTFS permettent d'effectuer ce type d'étude. Pour avoir une comparaison juste avec la demande, les données GTFS de 2013 sont utilisées puisque l'étude de la demande est effectuée à l'aide de l'enquête OD 2013. 9 lignes de bus ont comme terminus la station Honoré Beaugrand ou l'ont comme un de leurs arrêts. Au cours d'une journée typique d'automne (enquête OD 2013), approximativement 11 120 déplacements sont effectués en bus vers la station Honoré Beaugrand. Le Tableau 4-1 effectue un résumé du service offert ainsi que le nombre de déplacements en bus qui sont effectués selon la ligne de bus utilisée pour se rendre à la station.

Tableau 4-1: Résumé du service offert ainsi que la demande

	Offre de service			Demande
Ligne de bus	**Type de service**	**Terminus: Métro Honore Beaugrand**	**Nombre d'arrêts**	**Nombre de déplacements pondérés**
26-O	Régulier	NON	26	446
28-N	Régulier	NON	15	792
28-S	Régulier	NON	28	514
141-E	10 minutes max	OUI	47	1970
185-E	Régulier	NON	34	664
185-O	Régulier	NON	13	21 (1 seule obs.)
186-O	Régulier	OUI	41	1585
187-O	10 minutes max	OUI	40	2143
189-O	Régulier	OUI	63	2251
487-O	Express	OUI	35	735

Pour compléter le profil de cette offre en transport, la Figure 4-28 présente l'ensemble des lignes de bus ainsi que l'origine des déplacements selon la ligne de bus utilisée qui se dirigent vers la station Honoré Beaugrand. La Figure 4-29 présente le nombre de voyages ainsi que le nombre de passages-arrêts qui sont effectués en une journée typique de semaine.

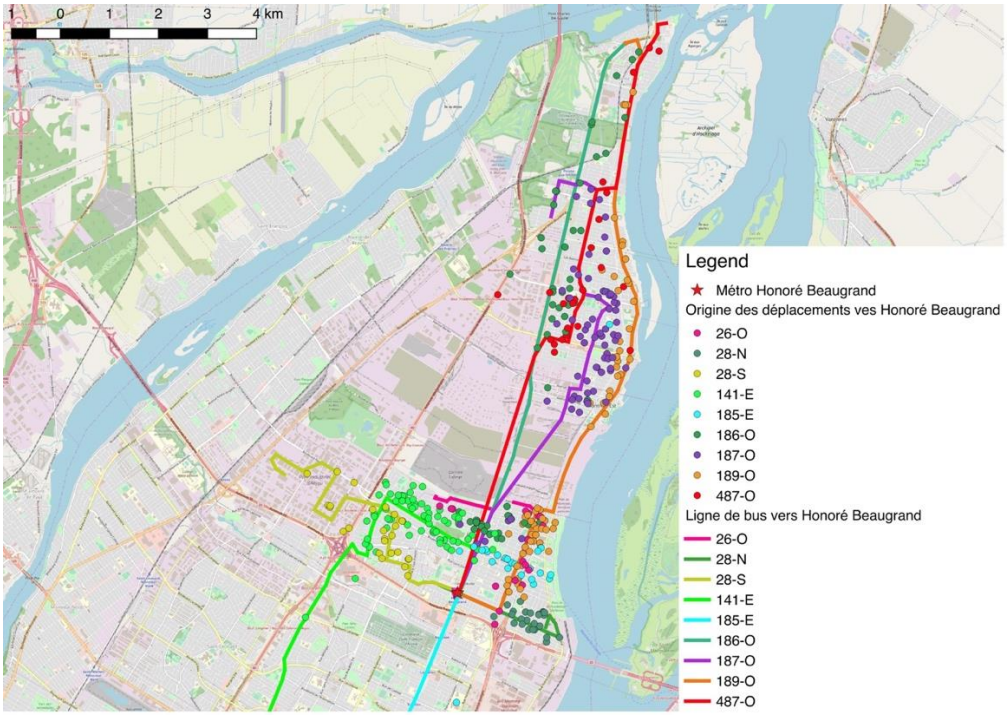


Figure 4-28: Offre de service de bus vers Honoré Beaugrand ; Origine des déplacements en bus vers Honoré Beaugrand

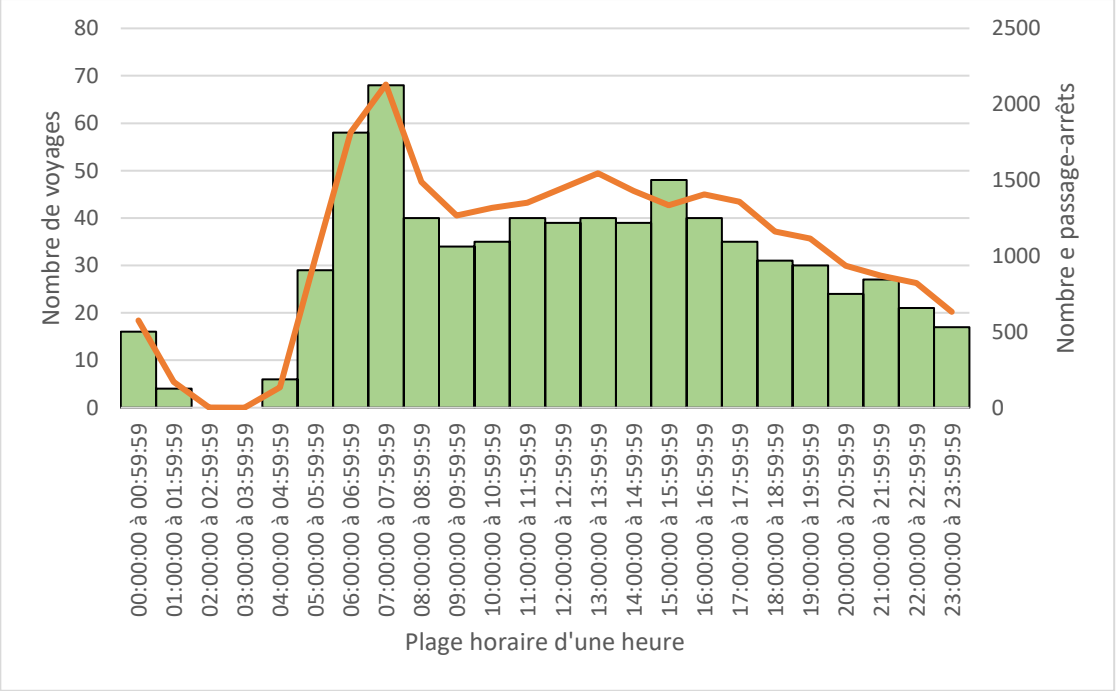


Figure 4-29: Nombre de passage-arrêts et nombre de voyages pour l'étude de cas en cours.

4.2.2 Profil des déplacements des utilisateurs en auto à comportement de déplacements similaires

Pour trouver des utilisateurs à comportements similaires, les secteurs de recensement sont utilisés. La méthode consiste à déterminer les secteurs d'origine et de destination des utilisateurs des lignes de bus présentées et de trouver les usagers en automobile qui proviennent et se dirigent vers ces mêmes secteurs.

Statistique Canada fournit un fichier contenant les limites géographiques des secteurs de recensement pour lesquels des données de recensement sont diffusées. Les secteurs de recensement sont de petites régions géographiques relativement stables qui comptent habituellement moins de 10 000 habitants selon les données du recensement précédent (Statistique_Canada, 2016).

La Figure 4-30 présente les secteurs de recensement d'origine ainsi que les principaux secteurs de de destination.

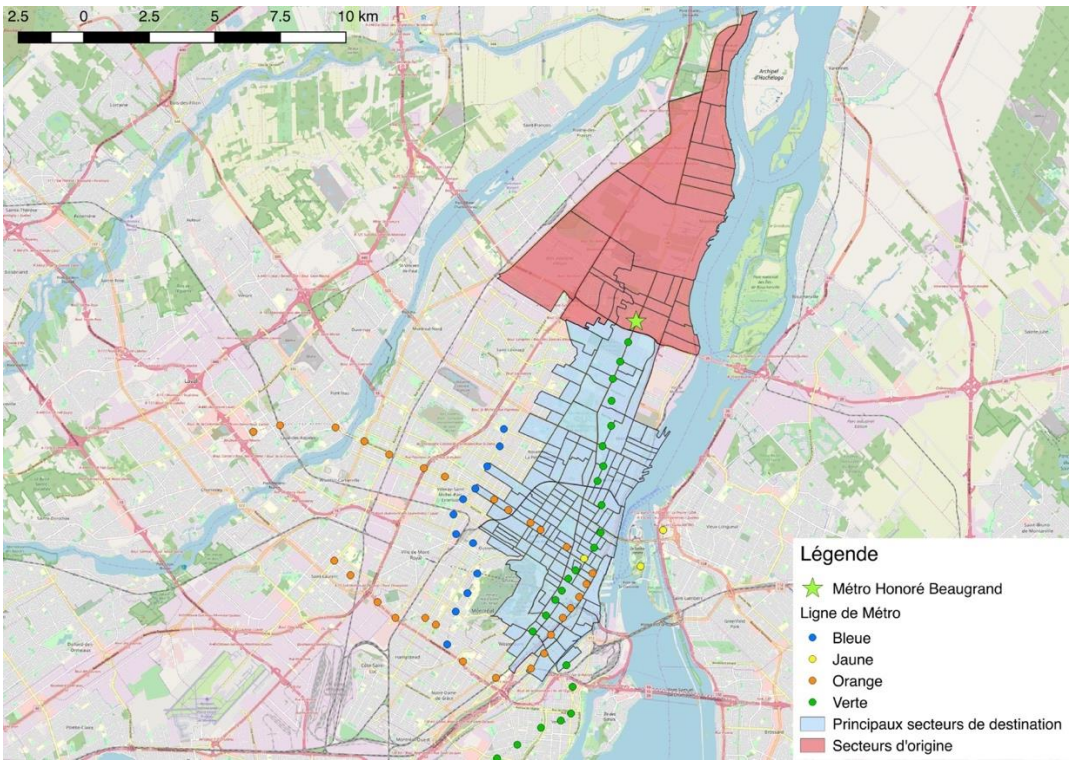


Figure 4-30: Secteurs d'origine et principaux secteurs de destination des utilisateurs des lignes de bus présentées

Ces secteurs de destination contiennent 80% (8 826 déplacements pondérés) des déplacements effectués en bus vers la station Honoré Beaugrand. Les 20 % restant sont des lieux de destination assez éparpillés. Il est préférable de se concentrer sur ces secteurs à forte densité de déplacements.

De plus, 99% des déplacements effectués sur l'Île de Montréal se dirigeant vers la station Honoré Beaugrand en bus de la STM proviennent de l'est de celle-ci. Ce dernier point est la raison pour laquelle seuls les secteurs à l'est de cette station de métro sont conservés comme potentiel d'origine.

En effectuant les intersections nécessaires entre les déplacements de l'enquête OD 2013 et les secteurs d'origine et de destination, il a été trouvé que 27 307 déplacements sont effectués en tant que conducteur (AC) ou en tant que passager (AP). Cela représente plus de 3 fois le nombre de déplacements effectués en autobus jusqu'à la station Honoré Beaugrand puis en métro entre les mêmes secteurs.

Afin d'avoir une comparaison complète entre les déplacements en automobile et le service de bus se dirigeant vers la station Honoré Beaugrand, il est intéressant de produire des grilles d'offre et de demande.

4.2.3 Comparaison spatiale de l'offre et de la demande (Traclus_DL + Grille_CR)

Traclus_DL accompagné de Grille_CR permet d'avoir une comparaison spatiale facile entre l'offre et la demande.

4.2.3.1 Offre

L'étude de l'offre est effectuée au niveau du nombre de voyages réalisés sur chaque combinaison de trajets possibles pour une journée typique de service en semaine. En appliquant le niveau 2 de service, 8769 combinaisons de service sont possibles. Cependant, en appliquant la méthode de nettoyage de niveau 2 (voir sous chapitre 3.5), 2465 des combinaisons sont conservées en appliquant un angle de similarité limite de 10° entre paires de services. De plus, le taux de détour est calculé pour chacune des lignes de bus à l'étude. Une ligne de bus avec énormément de détours peut décourager certains utilisateurs à considérer le bus comme mode de transport (perception

d'éloignement au lieu de destination). Le Tableau 4-2 présente le taux de détour pour chaque ligne de bus ainsi que la distribution des voyages au cours d'une journée de semaine. Afin de faciliter la visualisation du niveau de service, la dernière ligne de ce tableau présente une échelle de couleur qui est utilisée pour classifier la distribution de voyages.

Tableau 4-2: Taux de détour et niveau de service de chaque ligne bus se dirigeant vers le métro Honoré Beaugrand (suite)

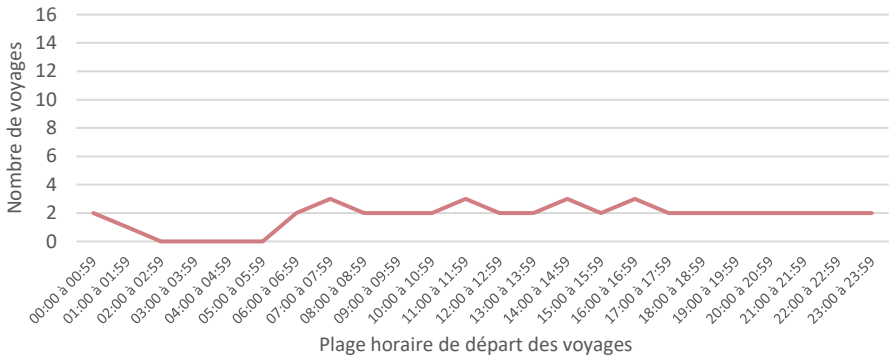
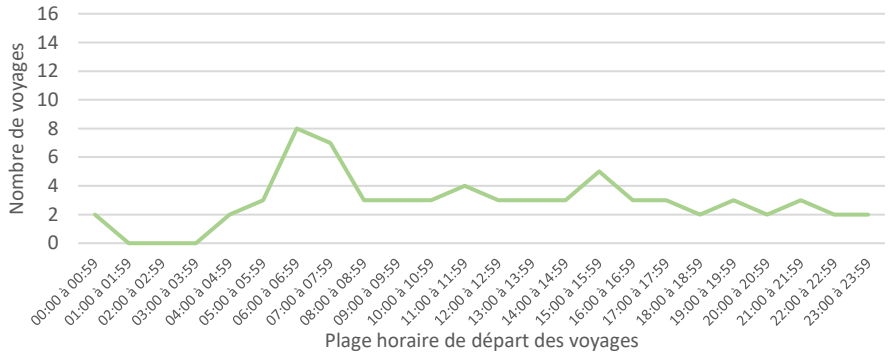
Ligne de bus	Taux de détour	Distribution des voyages
185-E	0.09	
186-O	0.08	

Tableau 4-2 : Taux de détour et niveau de service de chaque ligne bus se dirigeant vers le métro Honoré Beaugrand (suite)

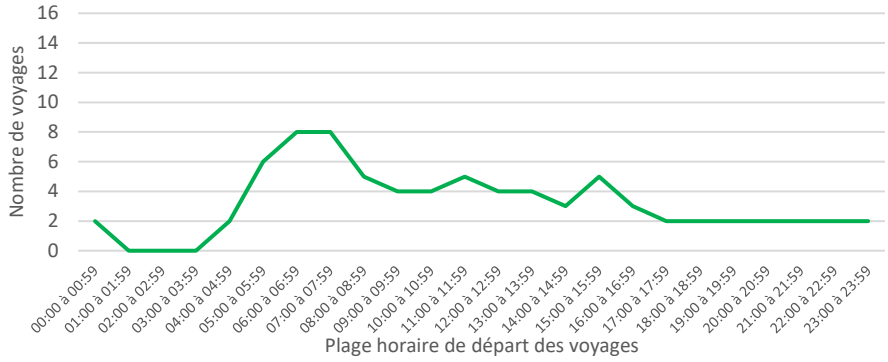
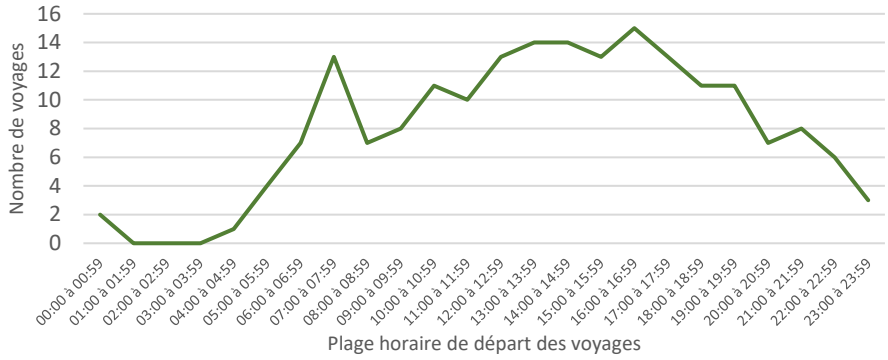
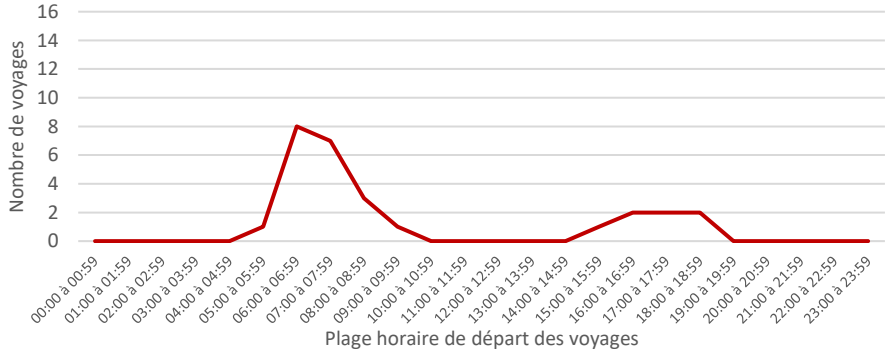
189-O	0.18	
141-E	0.29	
487-O	0.27	

Tableau 4-2 : Taux de détour et niveau de service de chaque ligne bus se dirigeant vers le métro Honoré Beaugrand (suite)

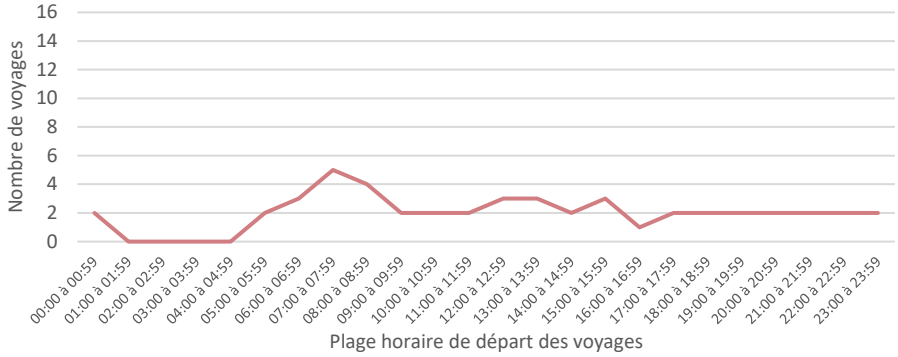
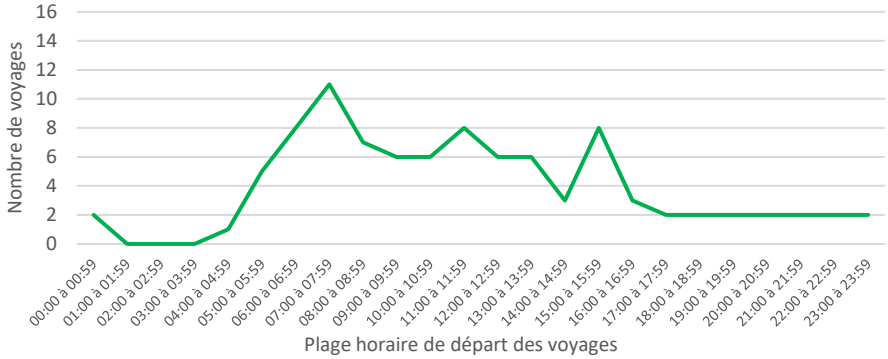
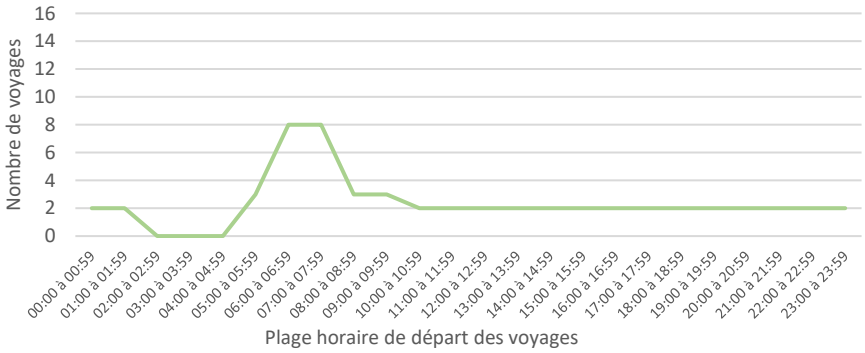
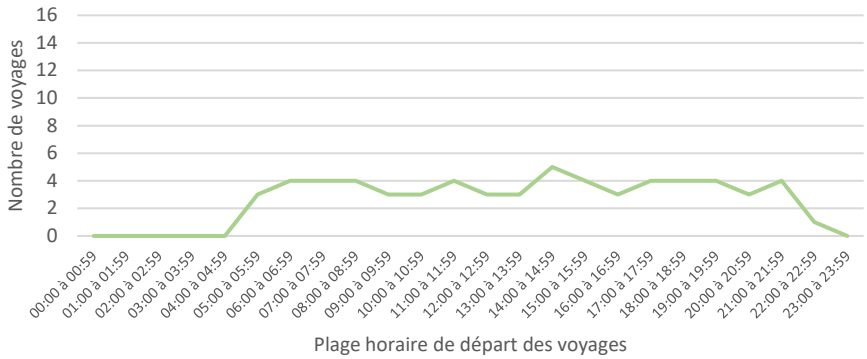
185-O	0.51	
187-O	0.39	
28-N	0.25	

Tableau 4-2 : Taux de détour et niveau de service de chaque ligne bus se dirigeant vers le métro Honoré Beaugrand (fin)

26-O	0.52	
28-S	0.61	
Note	Niveau de service	

Selon les résultats, 70% des lignes de bus ont en moyenne plus de 2.5 voyages par heure avec en général un service plus élevé en heure de pointe du matin. Il faut mentionner la ligne 141-E qui connecte la station Saint-Michel à la station Honoré Beaugrand avec près de 9 voyages par heure sur sa plage de service. De plus, 6 des 10 lignes de bus étudiés ont un taux de détour en dessous de 0.3 ce qui signifie que ce sont des lignes avec un service assez direct vers le métro. Pour compléter cette analyse, des grilles d'offre sont produites pour avoir une comparaison spatiale.

Selon la méthodologie de choix des paramètres, les valeurs suivantes sont utilisées pour produire les grilles d'offre :

Traclus_DL

- Longueur de segmentation : 100 mètres,

  Cette valeur représente approximativement 5% de la distance moyenne (2300 mètres) des combinaisons de trajets.

- Angle maximal de déviation : 15°,

- Poids minimal de création : 48,

  Cette valeur représente une contrainte de 2 voyages par heure en moyenne au minimum pour chaque corridor créé.

- Distance maximale de recherche : 100 mètres

  Cette valeur permet d'avoir une distance raisonnable de marche entre les segments d'un même corridor.

Grille_CR

- Largeur des mailles : 130 mètres,

- Système de coordonnées de référence : 32 188.

Les 4 cartes qui suivent présentent un résumé du service vers la station Honoré Beaugrand.

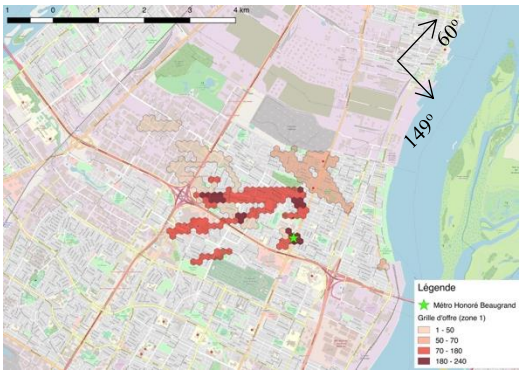


Figure 4-31: Grille d'offre vers la station Honoré Beaugrand ; zone 1: 60° à 149°.

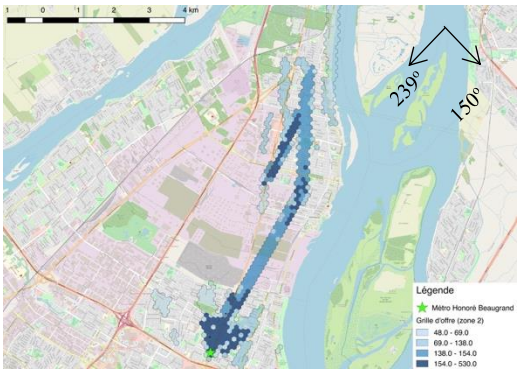


Figure 4-32: Grille d'offre vers la station Honoré Beaugrand ; zone 2: 150° à 239°.

Figure 4-33: Grille d'offre vers la station Honoré Beaugrand ; zone 3: 240° à 329°.

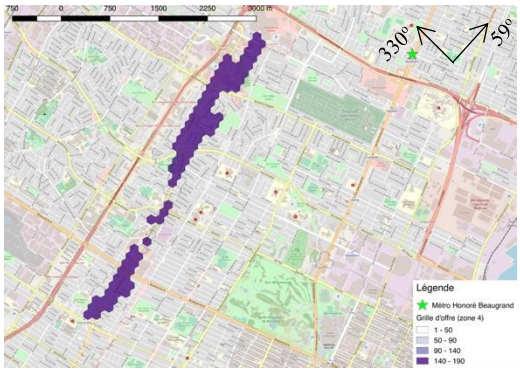


Figure 4-34: Grille d'offre vers la station Honoré Beaugrand ; zone 4: 330° à 59°.

Sachant que les secteurs d'origine se trouvent à l'est de la station Honoré Beaugrand et que les secteurs de destination se situent à l'ouest de celle-ci, seules les grilles d'offre de la zone 1 à 3 sont intéressantes pour les analyses subséquentes. La grille de zone 4 (Figure 4-34) est écartée puisqu'elle représente un service allant de l'ouest vers l'est tandis que les déplacements étudiés vont de l'est vers l'ouest.

Par la suite, les grilles de demande des déplacements similaires en automobile sont produites pour voir s'il a une possibilité de changement de mode.

4.2.3.2 Demande des déplacements similaires effectués en automobile

Comme mentionné, 27 307 déplacements faits en automobile ont une structure similaire à ceux utilisant les lignes de bus pour se diriger vers la station Honoré Beaugrand. Leur destination est fixée à la station Honoré Beaugrand et non à leur destination finale puisque l'étude se concentre

sur une analyse du service pour tenter de comprendre pourquoi ces utilisateurs préfèrent se déplacer en automobile.

À l'aide des grilles de demande de ces déplacements, de leur caractérisation ainsi que le portait de l'offre effectuée précédemment, il est possible d'effectuer une analyse complète.

Selon la méthodologie de choix des paramètres, les valeurs suivantes sont utilisées pour produire les grilles de demande:

Traclus_DL

- Longueur de segmentation : 100 mètres

  150 mètres représentent approximativement 5% de la distance moyenne (3210 mètres) des lignes de désir étudiées. Cependant, cette longueur a dû être légèrement diminuée pour être égale à la distance de recherche.

- Angle maximal de déviation : 15º

  Cette valeur est choisie pour avoir une même base de comparaison avec l'offre (grille d'offre créée avec un angle de 15º)

- Poids minimal de création : 500

  Cette valeur représente approximativement 25 segments de lignes de désir en prenant la borne supérieure de la plage à plus forte concentration (19.19). Les lignes de désir sont fortement concentrées au même endroit avec une direction similaire donc il faut porter une forte attention à l'effet qu'a DBSCAN-seg (expansion de la zone de recherche). Pour favoriser un meilleur regroupement, un poids plus élevé est nécessaire. Dans ce type d'étude à forte concentration, un poids minimum de création trop faible engendra des polygones de corridors très larges et très longs.

- Distance maximale de recherche : 100 mètres

  La distance acceptable recherchée entre deux segments est de 300 mètres, valeur calculée pour l'étude de cas 1. Comme il y a une forte concentration des lignes de désir, une distance de recherche assez faible est combinée à un poids minimal de création élevé (500) pour avoir des dimensions (longueur et largeur) de polygones tournant autour de la distance acceptable entre deux segments d'un même corridor.

81% des segments créés sont assignés à un corridor.

Grille_CR

- Largeur des mailles : 130 mètres;
- Système de coordonnées de référence : NAD83 / MTM Zone 8 (EPSG :32 188).

Les figures qui suivent présentent les cartes de grilles de demande potentielle (lignes de désir similaires en automobile) ainsi que leur caractérisation.

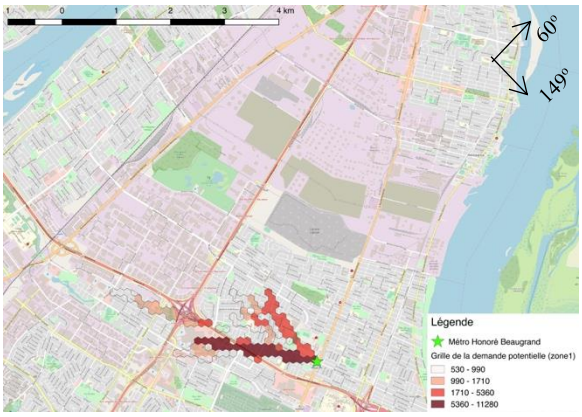


Figure 4-35: Grille de demande potentielle vers la station Honoré Beaugrand ; zone 1: 60º à 149º

Figure 4-36: Grille de demande potentielle vers la station Honoré Beaugrand ; zone 2: 150º à 239º

Figure 4-37: Grille de demande potentielle vers la station Honoré Beaugrand ; zone 3: 240º à 329º

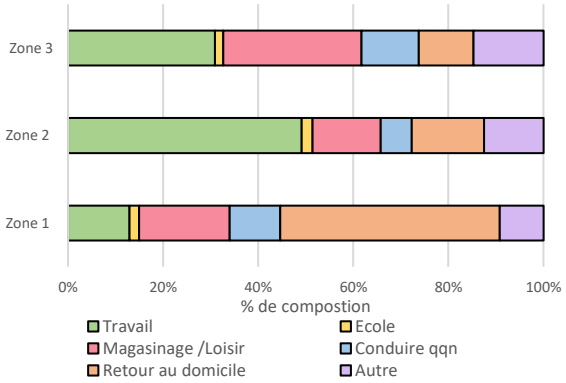


Figure 4-38: Caractérisation des grilles de demande potentielles (motif)

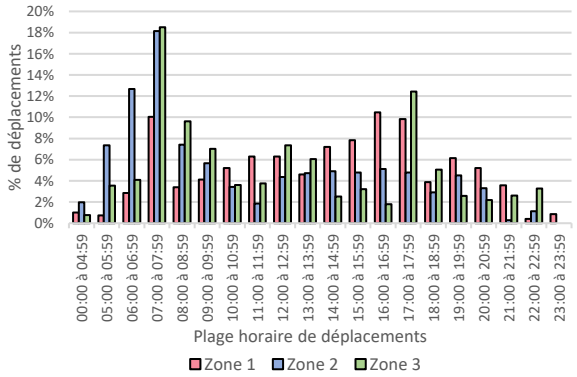


Figure 4-39: Caractérisation des grilles de demande potentielles (heure de déplacements)

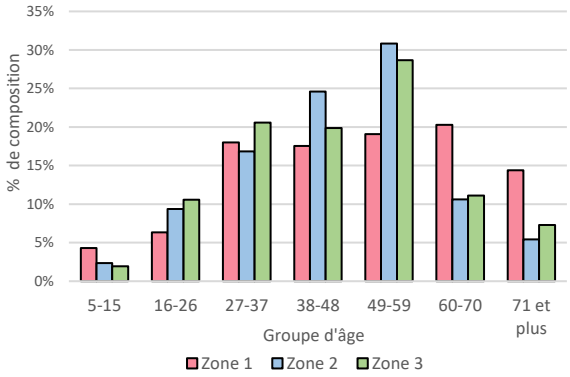


Figure 4-40: Caractérisation des grilles de demande potentielles (groupe d'âge)

Il n'y a aucun segment qui correspond aux critères de la zone 4 d'où la raison pour laquelle Grille_CR n'a produit aucune carte de zone. Les grilles de zone 1, de zone 2 et de zone 3 regroupent respectivement 31%, 63% et 6% des segments assignés à un corridor. La grille de zone 1(Figure 4-35) est en grande partie composée de lignes de désir effectuées par des personnes âgées de plus de 60 ans (35%). Cependant, les grilles de zone 2 et 3 (Figure 4-36 et Figure 4-37) sont composées de lignes de désir produites principalement par une population professionnelle (27-59 ans), soient 72 % et 69 % respectivement. 46% des lignes de désir de la grille de zone 1 ont pour motif le retour au domicile. Après avoir analysé avec un peu plus de détails ce dernier point, il a été réalisé qu'une grande partie de ces 46% sont engendrés par la Galerie d'Anjou. À l'inverse, 29% des lignes de désir de la grille de zone 3 ont pour motif le magasinage/loisir. Encore une fois, la Galerie d'Anjou est responsable d'une grande partie de celles-ci. Ainsi ce centre d'achat peut être caractérisé comme un fort pôle de déplacements dans cette étude.

Il est maintenant possible de présenter les faits saillants de cette étude.

4.2.3.3 Faits saillants de cette étude (comparaison demande potentielle vs offre)

Cette étude a permis de faire ressortir plusieurs faits saillants :

1. Spatialement, l'offre répond à la demande potentielle. La Figure 4-41 présente la couverture de l'offre sur la demande potentielle.

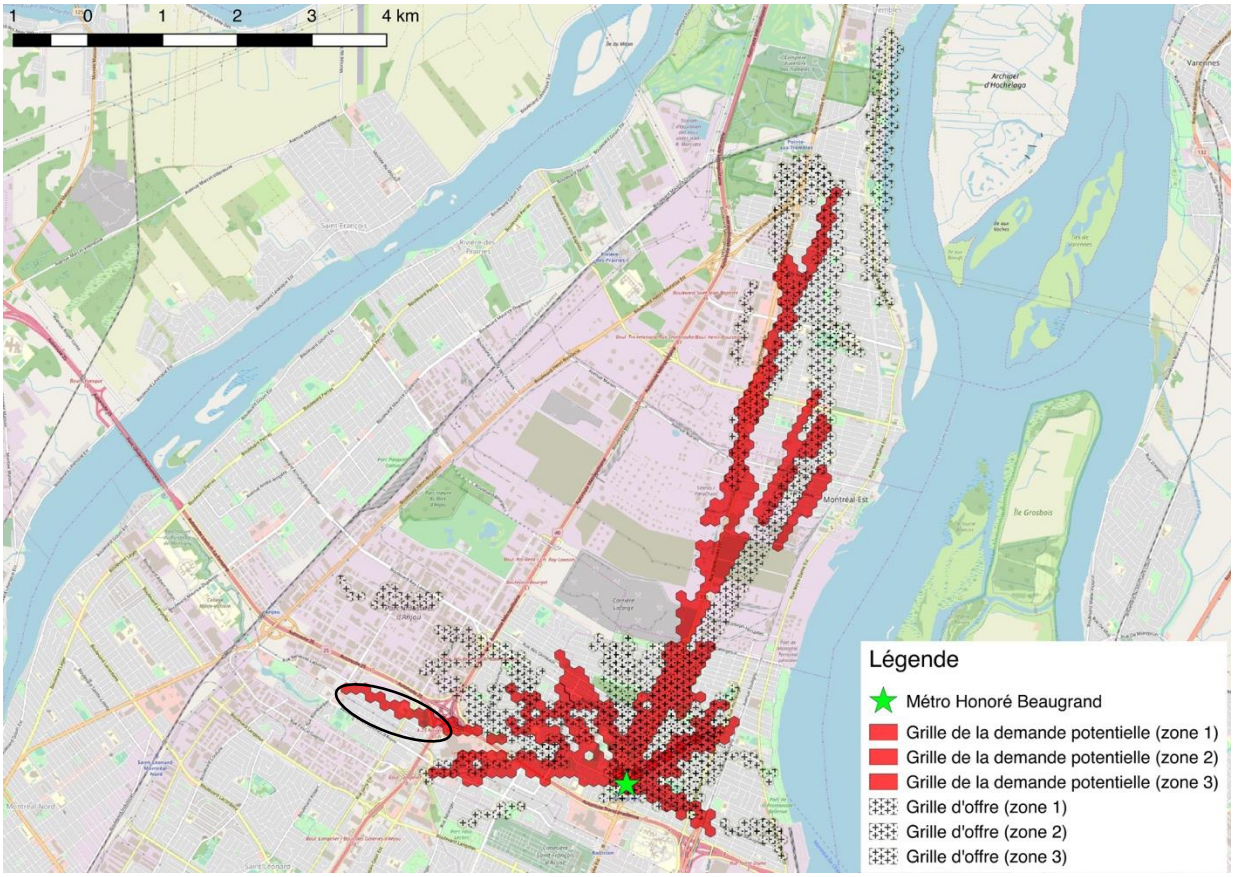


Figure 4-41: Couverture de l'offre de bus se dirigeant vers la station Honoré Beaugrand sur la demande potentielle

Selon cette carte, l'offre couvre l'ensemble de la demande potentielle. Le seul lieu à forte densité qui n'a aucune desserte vers la station Honoré Beaugrand se situe au nord de l'autoroute 40 et à l'ouest de l'autoroute 25 (zone encerclée sur la Figure 4-41).

2. Comme expliqué, la Galerie d'Anjou attire et produit de nombreux déplacements. Ce lieu est desservi par la ligne de bus (141-E) la plus performante de toutes celles présentées. Elle produit plus de 190 voyages en une journée de semaine avec en moyenne près de 11 voyages par heure entre 6h00 et 23h00. De plus, elle a un taux de détour faible (0.29) ce qui devrait améliorer la perception de performance par les utilisateurs. Cependant, un grand nombre des utilisateurs qui s'y rendent utilisent l'automobile comme mode de déplacement. Ce comportement pourrait s'expliquer par le fait que la raison principale de ce déplacement est pour magasiner. L'utilisateur préfère ainsi l'automobile puisqu'il aura moins de difficulté à transporter ses emplettes. De plus, la Galerie d'Anjou fournit un stationnement gratuit ce qui encourage

l'utilisation de ce mode. Ce comportement diffère des déplacements effectués vers les centres d'achat (ex. centre Eaton) se trouvant au centre-ville puisque les places de stationnement sont payantes (stationnement sur rue ou intérieur payant).

3. La plus haute demande potentielle provient des voyages de zone 2 (déplacement de l'est vers l'ouest). 38% des lignes de désirsde cette zone sont effectuées en heure de pointe du matin (6h00-9h00). Le reste des lignes de désir de cette zone sont réparties de manière plus ou moins égales (1% à 7% par plage horaire) le reste de la journée. Il a été montré au point 1 que spatialement, le service de bus répond à cette demande. Au niveau de la performance du service, la grille d'offre de zone 2 est principalement composée des lignes suivantes : 186-O, 187-O, 189-O et 487-O. En heure de pointe, approximativement 7 voyages à l'heure ont lieu en moyenne sur chacune de ces lignes. De plus, ces 4 lignes de bus utilisent principalement les grandes artères de circulation comme la rue Notre Dame est ou encore la rue Sherbrooke est (taux de détour moyen faible : 0.23). Ce dernier point provoque un avantage et un inconvénient. D'un côté, le service fourni est direct ce qui engendre une bonne perception par l'utilisateur (avantage). De l'autre côté, les utilisateurs ayant comme origine une zone résidentielle fortement tortueuse ont une grande distance de marche à parcourir avant d'atteindre un arrêt de bus, ce qui peut décourager l'utilisateur potentiel. Cependant, il faut mentionner que peu d'utilisateurs potentiels ont une si forte tortuosité. La plupart d'entre eux se situent à une distance raisonnable de marche (moins de 10 min). Ainsi, il est possible de dire que le service de bus dans la zone 2 est performant aux heures de forte demande.

4. Le dernier fait saillant de cette analyse provient d'une comparaison qui est faite entre les grilles de désir et celles de l'offre. Les grilles de désirs comprennent la demande potentielle ainsi que la demande actuelle (déplacement effectué en bus, Tableau 4-1). Pour l'offre, il est pris comme hypothèse que la desserte est faite par des bus standards (Figure 3-38) et qu'on souhaite qu'ils soient remplis à 80% pour permettre aux usagers d'avoir un certain niveau de confort.

Demande totale	**Offre totale**
=	=
Déplacements Potentiels	Nombre de voyages
+	*
Déplacements en bus	Capacité (75 * 0.8 = 60 passagers/voyage)

Cette comparaison permet de produire la Figure 4-42.

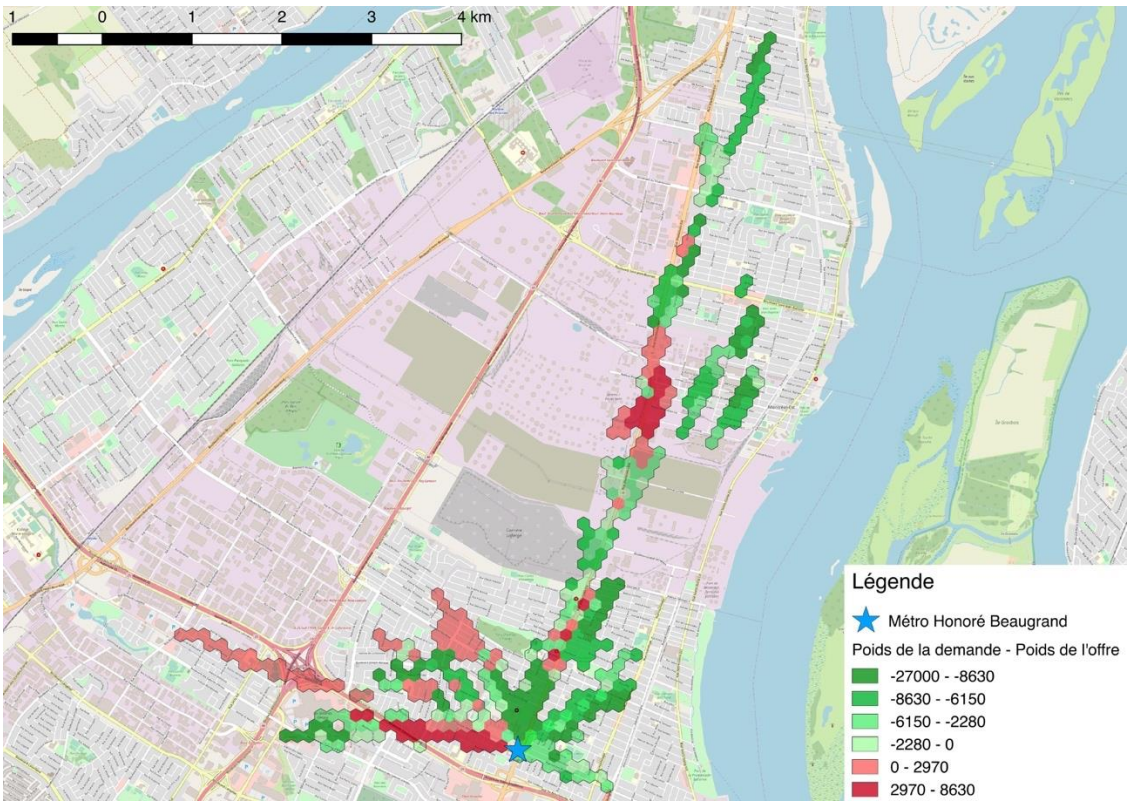


Figure 4-42: Analyse du service offert quantitativement

Avant d'analyser les résultats, il faut mentionner que lorsqu'une cellule de demande n'a pas une cellule d'offre qui la superpose, elle est comparée à la cellule d'offre adjacente. Une valeur négative signifie qu'il y a un surplus de sièges. Une valeur positive signifie qu'il y a un manque de sièges.

Ainsi, selon la Figure 4-42, l'offre semble répondre en grande partie à la demande. Il y a cependant un grand manque de service du côté nord du métro Honoré Beaugrand.

5. Pour conclure, l'offre semble être performante et bien distribuée spatialement. Un des facteurs qui pourrait décourager l'utilisation de l'autobus est le temps de parcours plus long qu'en automobile. La mise en place ou le prolongement de voies réservées (ex. prolongement de la voie réservée sur Notre Dame est) pourrait améliorer la situation. Cependant, il faut noter que pour plusieurs, l'utilisation de l'automobile est un mode de vie (le paraître, espace privé, confort …) (Boutros, 2019; Steg, 2005; Tyrinopoulos & Antoniou, 2008). Il faudrait énormément d'incitatifs pour qu'ils changent ce comportement.

CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif de ce projet de recherche était de mettre en place un outil d'aide au diagnostic et à la conception de réseaux de transport optimal. Ce dernier chapitre comporte 4 grandes sections :

1. Une synthèse des travaux effectués tout au long de ce mémoire,
2. Les contributions de ce projet de recherche,
3. Les limitations associées à la méthodologie présentée ainsi qu'à l'outil développé,
4. Les perspectives de recherche.

5.1 Synthèse des travaux

Ce mémoire est organisé en 3 chapitres principaux:

- Le chapitre 2 présente une revue de littérature sur les notions importantes de ce projet de recherche. Tout d'abord, celle-ci s'attarde sur le sujet de l'optimisation des systèmes de transport en commun afin de situer le sujet de ce mémoire et de mieux comprendre le cheminement à suivre pour obtenir cette optimisation. En deuxième partie, certaines méthodes de diagnostic de réseaux de transport en commun qui existent dans la littérature sont présentées. Par la suite, celle-ci se concentre sur la notion de corridors, concept important pour l'outil étudié. Pour terminer, une revue de littérature est effectuée sur un outil en particulier, Traclus_DL et sur une méthode de visualisation basée sur le concept de carroyage.
- Le chapitre 3 présente Traclus_DL, Grille_CR et Level2Services. Tout d'abord, le fonctionnement de Traclus_DL est expliqué de manière détaillée. Par la suite, les différentes améliorations apportées à Traclus_DL ainsi qu'un guide méthodologique pour le choix de paramètres adéquats sont mis de l'avant. Un outil de lissage automatisé pour compléter Traclus_DL est introduit. Une explication complète de la logique derrière cet outil est fournie ainsi qu'une explication de la méthode de fonctionnement. Pour terminer, les particularités d'application de ces deux outils pour modéliser l'offre ainsi que l'étude d'indicateurs temporels aidant à l'analyse sont discutées.

- Le quatrième chapitre de ce mémoire présente deux études de cas. Celles-ci aident à mieux comprendre comment l'utilisation combinée de ces deux outils peut contribuer à la production d'un diagnostic de l'offre. La première est une étude sur les déplacements effectués à vélo et sur le potentiel d'un changement modal vers le vélo pour deux établissements scolaires, Université de Montréal et Brébeuf. La deuxième étude de cas se concentre sur l'offre de services en bus vers la station de métro Honoré Beaugrand qui est par la suite comparée à la demande.

5.2 Contributions

Les contributions de ce mémoire peuvent être répertoriées en quatre niveaux :

1. Amélioration de l'outil de Traclus_DL

   Traclus_DL présentait quelques lacunes.

   La première était au niveau de la segmentation des lignes de désir. En effet, tout segment ayant une mesure inférieure à la longueur de segmentation (un des 4 paramètres) était prolongé. Pour y remédier, le code source a été modifié afin d'avoir des segments fidèles à la réalité.

   Par la suite, une amélioration est apportée au niveau de la taille des corridors. Auparavant, ceux-ci prenaient la longueur de segmentation comme mesure. Cette distance donne une mauvaise représentation de l'amplitude réelle que doivent avoir les corridors.

   Pour y remédier, le fichier corridor créé par Traclus_DL est mis de côté. Grille_CR utilise le fichier segment pour savoir à quel groupe appartient chaque segment et par la suite reconstruit l'ensemble des corridors de manière fiable (positionnement, amplitude, poids).

   En dernier lieu, des ajouts minimes ont été faits comme l'ajout d'une horloge interne pour permettre aux utilisateurs de connaitre l'avancement du programme lors de son exécution (pourcentage d'avancement).

2. Mise en place d'une méthodologie pour le choix de paramètres adéquats

   Une des plus grandes difficultés de Traclus_DL est le choix des paramètres. Ce mémoire présente de manière détaillée l'ensemble des étapes à suivre pour s'assurer d'effectuer un choix adéquat de paramètres selon le type d'étude.

3. Mise en place d'une méthodologie pour modéliser l'offre avec Traclus_DL

   Une autre des contributions de ce projet est l'adaptation d'une méthode pour l'utilisation de Traclus_DL pour modéliser l'offre en transport. Cette méthode permet par la suite d'effectuer, si voulu, une comparaison entre la demande et l'offre.

   Level2Services permet la création d'un niveau 2 de service. Ce code s'assure au préalable qu'aucun segment de trajet complet n'est compté plusieurs fois dans un corridor.

4. Création d'un outil de lissage automatisé

   Une des perspectives souhaitées par l'inventeur de Traclus_DL était l'élaboration d'un algorithme de lissage afin de faciliter l'exploitation des résultats (Bahbouh, 2017). Une des grandes contributions de ce projet de recherche est la création de cet outil de lissage, Grille_CR. Celui-ci utilise le concept de carroyage pour faciliter la visualisation des regroupements produits par Traclus_DL en produisant quatre cartes de différentes selon la direction des corridors créés.

5.3 Limitations

Bien que ce mémoire ait aidé à l'avancement des travaux en synthèse de la demande et de l'offre, quelques limitations sont à noter :

1. Temps de calcul

   Traclus_DL, Level2Services et Grille_CR peuvent nécessiter un temps de calcul très élevé. Le code mis en place fonctionne, mais n'est malheureusement pas écrit de façon optimale. Un tel facteur peut décourager certains planificateurs à l'utiliser surtout pour des analyses ou des projets à délais serrés.

2. Plusieurs étapes de validation

   Pour s'assurer d'avoir des paramètres adéquats, de nombreuses vérifications doivent être effectuées (ex. distance des segments aux extrémités de chaque corridor, % de segments assignés à un corridor, largeur de cellule adéquate …). Pour un utilisateur peu habitué à ces deux outils, il risque de mettre beaucoup de temps à trouver des combinaisons optimales surtout si les astuces présentées dans la méthodologie ne sont pas suivies.

3. Contrainte lors de la comparaison de la demande et de l'offre

   La comparaison entre la demande et de l'offre fonctionne très bien lorsque les grilles d'offre et de demande se superposent parfaitement. Cependant, lorsque la grille demande possède quelques cellules que la grille d'offre n'a pas, il devient alors difficile de les comparer. Des analyses supplémentaires sont nécessaires.

4. Limitation d'un système de 4 zones avec Grille_CR

   Grille_CR regroupe les corridors créés par Traclus_DL dans 4 zones distinctes selon leur direction. Il faut rappeler que les corridors créés par Traclus_DL regroupent des segments qui peuvent avoir au maximum une différence d'angle égale à deux fois l'angle maximal de déviation (Figure 5-1).

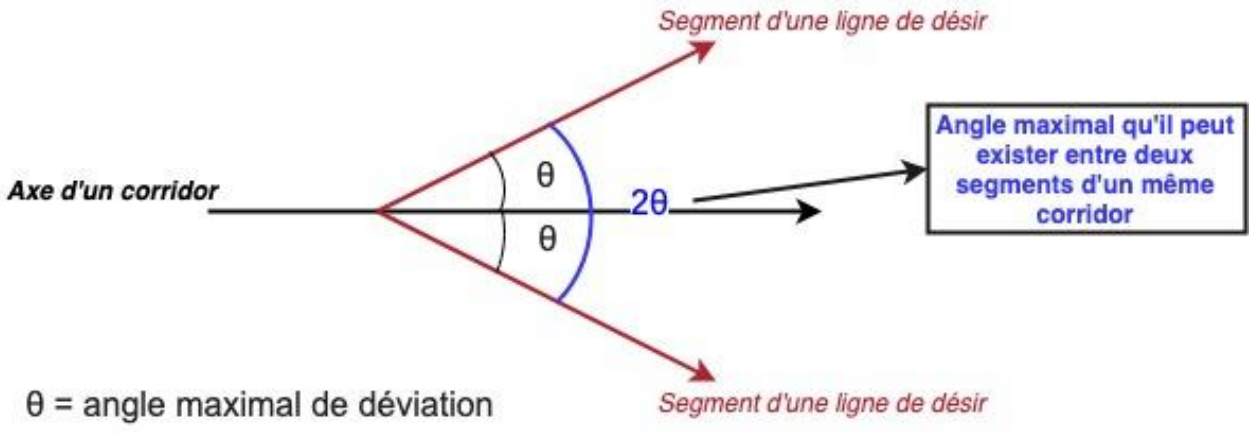


Figure 5-1: Angle maximal qui peut exister entre deux segments d'un même corridor.

Sachant que chacune des zones créées par Grille_CR couvre une plage d'angle de corridors égale à 90°, il est possible qu'une zone regroupe des segments ayant une différence de direction supérieure à 90°. Ce problème affecte principalement les corridors limites ainsi

que les études qui utilisent un angle maximal de déviation élevée. Le système de zonage limite le nombre de corridors limites, mais n'élimine pas au complet le problème. Une des pistes de solution serait l'utilisation de 8 zones d'études au lieu de 4.

5. L'utilisation de différents logiciels

   Traclus_DL, Grille_CR et Level2Services sont programmés sur trois langages différents, Python, PostgreSQL et Matlab respectivement. Cela nécessite la disponibilité de ces 3 langages sur le poste de travail et oblige le transfert des fichiers de résultat au prochain langage (Matlab → Python→PostgreSQL).

5.4 Perspectives

Sachant qu'une méthode peut être toujours améliorée, les perspectives de ce mémoire sont multiples pour les recherches à venir. Voici quelques pistes pour des travaux futurs :

- **Améliorer le choix des paramètres**

  Les démarches présentées pour effectuer le choix des paramètres sont des méthodes approximatives principalement pour la distance maximale de recherche et le poids minimal de création des corridors. Il serait intéressant d'utiliser une approche heuristique pour déterminer la meilleure combinaison de ces deux paramètres.

- **Création d'un programme pour la création du niveau 3 de l'offre**

  Un troisième niveau de service pourrait être exploré. Le niveau 3 de l'offre prendrait en considération toutes les correspondances possibles lors d'un trajet. La Figure 5-2 est utilisée à titre d'exemple.

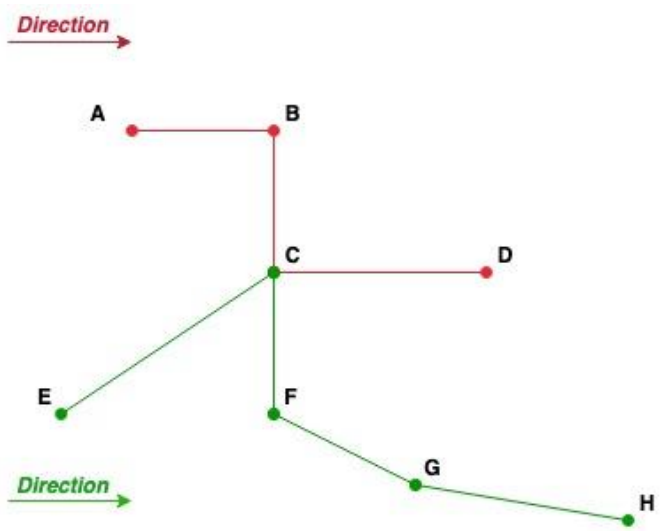


Figure 5-2: Exemple d'une offre de niveau 3.

Deux trajets de bus sont présentés à la Figure 5-2. Ceux-ci possèdent un arrêt en commun, l'arrêt C. L'ensemble des segments de ces deux lignes combinées sont : AB, AC, AD, AF, AG, AH, BC, BD, BG, BH, CD, CF, CG, CH, EC, ED, EF, EG et EH. Il n'est pas obligatoire que les trajets de bus possèdent un arrêt similaire. Il suffit juste qu'ils possèdent un arrêt à distance raisonnable pour considérer qu'une correspondance est possible.

Une telle représentation permettrait d'avoir une vue totale et réelle du service offert. Il serait fort intéressant d'être capable de produire des grilles d'offre à partir de ce type de données.

- **Combinaison des 3 programmes sous un même langage**

Comme il a été expliqué dans les limites de ce projet, Level2Services, Traclus_DL et Grille_CR sont écrits dans 3 langages différents. Il serait intéressant d'unir ses 3 codes sous une même interface. Cela faciliterait leur usage global et accélérerait le processus de traitement des données (perte de temps au niveau du transfert des fichiers résultats).

- **Développement d'indicateurs**

L'ensemble des outils présentés permettent de produire des résultats propices à la visualisation par cartes. Néanmoins, il serait intéressant de produire des indicateurs plus synthétiques qui:

- Permettront la vérification des résultats obtenus et de voir s'ils répondent aux critères initiaux (ex. % de segments assignés à un corridor);
- Aideront à caractériser, de façon globale, le diagnostic effectué.

- **Adaptation des outils pour la modélisation de l'offre des transports routiers**

Une des pistes intéressantes pour ces outils est leur adaptation pour la modélisation de l'offre de transports routiers. Connaitre l'offre de transport en termes de capacité routière par grands corridors (plutôt que par tronçon) permettrait de mieux évaluer la situation actuelle (ex. capacité globale et taux d'utilisation, bassin d'attraction, bénéficiaires des infrastructures) et par la suite permettre un aménagement adéquat (ex. voies réservées, tarification, etc.)

❖ **<u>Insertion d'une méthode de prédiction de la demande latente</u>**

« Build it and they will come » (Clifton & Moura, 2017) est une des meilleures phrases pour introduire cette perspective. La demande latente n'est malheureusement pas un volet qui est abordé en profondeur lors de la planification des systèmes de transports en commun. Pourtant celle-ci pourrait avoir un apport majeur dans le domaine des transports.

La demande latente a été brièvement explorée, mais n'a pas pu être analysée en profondeur due à une question de temps (les principaux enseignements *sont présentés plus bas*). Traclus_DL utilise la demande actuelle pour déterminer les grands corridors de déplacements. Il serait intéressant d'avoir une méthode de prévision de cette demande future. Ce modèle permettrait de produire les grands corridors de déplacements futurs et aider à une planification optimale des transports en commun.

Dans la littérature, la demande latente possède plusieurs définitions. Elle est expliquée comme étant :

- Un désir pour un service qu'un utilisateur ne peut pas satisfaire parce qu'il n'a pas les moyens, parce que le service n'est pas disponible ou encore, car il ne sait pas que ce service est disponible (Cambridge-Dictionary, 2016).
- Un flux de déplacement additionnel qui souhaite utiliser un certain type de service, mais qui est découragé de le faire par le fonctionnement insatisfaisant de celui-ci(Henk, 1989).

La demande latente peut être catégorisée sous quatre grandes sphères (Clifton & Moura, 2017):

1. Type 1 : Souhaite effectuer des activités, mais le système de transport en place ne le permet pas.
2. Type 2 : Souhaite effectuer des activités, le système de transport en place le permet, mais il y a la présence d'autres barrières.

   Dans ce type de demande latente, la population a accès à un système de transport répondant à leur souhait, mais certaines barrières existent, par exemple:

   - La pauvreté (ne possède pas les moyens pour effectuer les activités voulues ou prendre le transport en commun);

- Un horaire trop chargé (pas de temps pour faire les activités souhaitées);
- L'exclusion sociale.

3. Type 3 : Ne souhaite pas effectuer d'activités, mais il y a un système de transport en place adéquat et pouvant répondre à des demandes supplémentaires.

   Dans ce type de demande latente, la population a encore accès à un système de transport pouvant répondre à une demande supplémentaire. Cependant, dans ce type de demande latente, il se peut que :

   - Les usagers ne sont pas motivés à produire des déplacements supplémentaires;
   - Ils ignorent l'existence d'activités qui pourraient les intéresser;
   - Ils ne connaissent pas le fonctionnement des systèmes en place (comment les utiliser ou encore les destinations que ces services desservent).

4. Type 4 : Ne souhaite pas effectuer d'activités et le système de transport en place n'est pas adéquat pour répondre à toutes les demandes. Dans ce type de demande latente, il y a aussi possiblement un système qui est mis en place qui permet de ne pas avoir à se déplacer. Différents exemples peuvent être utilisés pour mieux comprendre :

   - Livraison par drone;
   - Véhicule autonome;
   - Magasinage en ligne;
   - …

La Figure 5-3 résume sur un axe x représentant la capacité du système de transport et sur un axe y correspondant à la volonté d'effectuer une activité ou non les 4 grands types de demande latente.

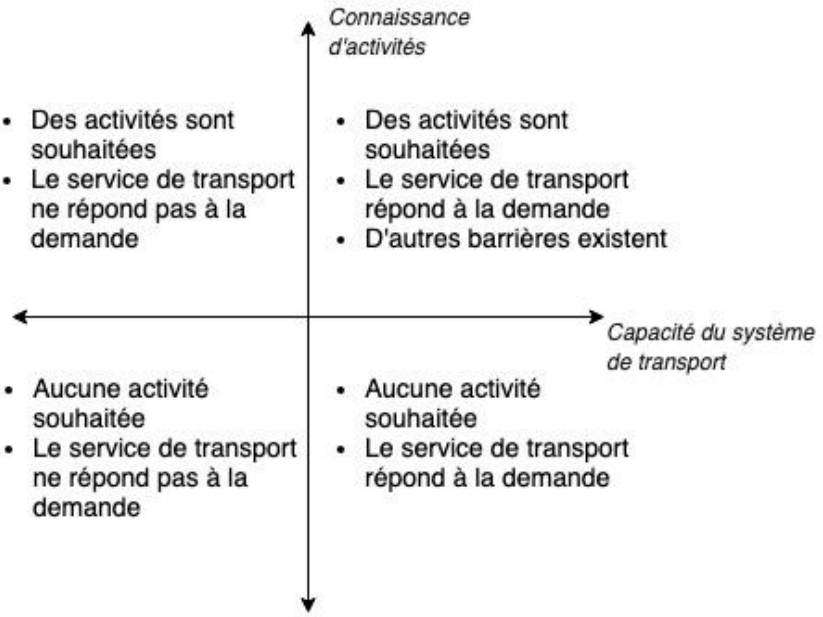


Figure 5-3: 4 grands types de demandes latentes (traduit de: Clifton & Moura, 2017)

Le développement d'un modèle de prévision pour le type 1 (manque de service) et le type 2 (problème d'équité) de la demande latente serait intéressant à explorer dans des travaux futurs.

RÉFÉRENCES

APIs, G. T. (2019). Test des flux GTFS. Retrieved from https://developers.google.com/transit/gtfs/guides/tools?hl=fr

Arrondissement_Outremont (2018, 03/09/2018). Piste cyclable sur l'avenue Willowdale. Retrieved

Badey, S. (2017). *Atelier Archéomatique 17.1: l'analyse par maille: un outil d'aide à l'analyse et de représentation cartographique quantitative.* UMR 7324 CITERES-Laboratoire Archéologie et Territoires; Inrap,

Bahbouh, K. (2017). *Corridors de demande: Modélisation et contributions à l'évaluation du niveau de durabilité.* (Transportation engineering). École Polytechnique de Montréal, PolyPublie. Retrieved from https://publications.polymtl.ca/2433/1/2016_KinanBahbouh.pdf

Barra, A., Carvalho, L., Teypaz, N., Cung, V.-D., & Balassiano, R. (2007). *Solving the transit network design problem with constraint programming.* Paper presented at the 11th World Conference in Transport Research-WCTR 2007.

Bertini, R. L., & El-Geneidy, A. (2003). Using archived data to generate transit performance measures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1841*, 109-119.

Boutros, M. (2019). La dépendance à la voiture est-elle psychologique? [Press release]. Retrieved from https://www.ledevoir.com/societe/transports-urbanisme/550597/la-dependance-a-la-voiture-est-elle-psychologique

Cambridge-Dictionary. (Ed.) (2016) Cambridge dictionary.

CAO, X., & YAN, X. (2003). A REVIEW OF CORRIDOR AND TRANSPORT CORRIDOR [J]. *City Planning Review, 1*.

Chakroborty, P. J. C. A. C., & Engineering, I. (2003). Genetic algorithms for optimal urban transit network design. *18*(3), 184-200.

Chien, S. I. J., & Spasovic, L. N. (2002). Optimization of grid bus transit systems with elastic demand. *Journal of advanced transportation, 36*(1), 63-91.

Clifton, K. J., & Moura, F. J. T. R. R. J. o. t. T. R. B. (2017). Conceptual Framework for Understanding Latent Demand: Accounting for Unrealized Activities and Travel. (2668), 78-83.

Comtois, C., & Slack, B. (2009). *The geography of transport systems*: Routledge.

Dalvi, M., Beig, G., Patil, U., Kaginalkar, A., Sharma, C., & Mitra, A. (2006). A GIS based methodology for gridding of large-scale emission inventories: application to carbon-monoxide emissions over Indian region. *Atmospheric Environment, 40*(16), 2995-3007.

Dubuc, A. (2019). Évaluation foncière: des hausses trois fois plus élevées qu'en 2015. Retrieved from https://www.lapresse.ca/actualites/grand-montreal/201906/25/01-5231656-evaluation-fonciere-des-hausses-trois-fois-plus-elevees-quen-2015.php

Eboli, L., & Mazzulla, G. (2011). A methodology for evaluating transit service quality based on subjective and objective measures from the passenger's point of view. *Transport policy, 18*(1), 172-181.

El Mahrsi, M. K. (2011). Étude de similarité et clustering de trajectoires d'objets mobiles.

Équiterre. (2010). Transport, environnement et santé publique.

Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., & Xu, X. (1996). *A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise.* Paper presented at the Kdd.

Fan, W. (2004). *Optimal transit route network design problem: Algorithms, implementations, and numerical results*: The University of Texas at Austin.

Fortin, P. (2016). *Méthodologie de caractérisation d'un réseau de transport en commun.* École Polytechnique de Montréal,

Frappier, A. (2015). *Méthode d'évaluation de la diversité et de la qualité des alternatives de déplacement de transport en commun.* École Polytechnique de Montréal,

Godin, A. (2012). *L'accessibilité en transport: Méthodes et indicateurs.* École Polytechnique de Montréal,

Google. (2014). FeedValidator. GitHub. Retrieved from https://github.com/google/transitfeed/wiki/FeedValidator

Google_Transit_APIs. (2019). Référence, Extensions GTFS. Retrieved from https://developers.google.com/transit/gtfs/reference/?hl=fr

Gouvernement_du_Québec. (2019). Effets de la pollution de l'air sur la santé. Retrieved from https://www.quebec.ca/sante/conseils-et-prevention/sante-et-environnement/effets-pollution-air-sur-la-sante/

Grediac, M., Sur, F., & Blaysat, B. (2016). The Grid Method for In-plane Displacement and Strain Measurement: A Review and Analysis. *Strain, 52*(3), 205-243.

Guermond, Y., & Lajoie, G. (1991). L' analyse intra-urbain par carroyage. *THE URBAN POPULATION AT A MICROSCALE LES POPULATIONS URBAINES A MICRO-ECHELLE*, 47.

Henk, R. H. (1989). Quantification of Latent Travel Demand on New Urban Facilities in the State of Texas. *ITE Journal, 59*, 24-28.

Holroyd, E. (1967). *The optimum bus service: a theoretical model for a large uniform urban area.* Paper presented at the Proceedings of the Third International Symposium on the Theory of Traffic FlowOperations Research Society of America.

Iseki, H., & Taylor, B. D. (2010). Style versus service? An analysis of user perceptions of transit stops and stations. *Journal of Public Transportation, 13*(3), 2.

Kepaptsoglou, K., & Karlaftis, M. J. J. o. t. e. (2009). Transit route network design problem. *135*(8), 491-505.

KFH_Group. (2013). Transit capacity and quality of service manual.

Lajoie, G. (1992). *Le carroyage des informations urbaines: une nouvelle forme de banque de données sur l'environnement du Grand Rouen* (Vol. 177): Publication Univ Rouen Havre.

Lajoie, G., Landa, P., & Langlois, P. (1989). Une chaîne de programmes pour la gestion des carroyages dans SIGUR. *Actes du VIe Colloque de Géographie Théorique et Quantitative (àparaître), Chantilly*.

Lina, A. (1999). *Transformée en ondelettes, tortuosité et lacunarité fractale pour la caractérisation de surfaces rugueuses: application à la mesure de rugosité du pavage*.

Litman, T. (2007). Evaluating accessibility for transportation planning.

Mahmoud, M., Hine, J., & Kashyap, A. (2011). Bus transit service quality monitoring in UK: A methodological framework. *Proceedings of the ITRN*.

Martellini, C. (2014, 12/11/2014). Infographie: Bilan des accidents de vélo à Montréal. *Metro*. Retrieved from https://journalmetro.com/wp-content/uploads/2014/11/opinions-infographique-morts-velo-fin2.jpg

McHugh, B. (2013). Pioneering open data standards: The GTFS story. *Beyond transparency: open data and the future of civic innovation*, 125-135.

MELCC. (2018). *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2015 et leur évolution depuis 1990*.

Montréal, V. d. (2015). *L'état du vélo à Montréal*. Retrieved from http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/transports_fr/media/documents/etat_velo_2015.pdf

Montufar, J., Arango, J., Porter, M., & Nakagawa, S. (2007). Pedestrians' Normal Walking Speed and Speed When Crossing a Street. *2002*(1), 90-97. doi:10.3141/2002-12

Morency, C., Verreault, H., & Frappier, A. (2019). Estimating latent cycling and walking trips in Montreal. *International Journal of Sustainable Transportation*, 1-12.

Neethu, C., & Surendran, S. (2013). Review of Spatial Clustering Methods. *International Journal of Information Technology Infrastructure, 2*(3).

Newell, G. J. T. S. (1979). Some issues relating to the optimal design of bus routes. *13*(1), 20-35.

Origine-Destination, S. à. l. e. (2013). *La mobilité des personnes dans la région de Montréal FAITS SAILLANTS*. Retrieved from

Pattnaik, S., Mohan, S., & Tom, V. J. J. o. t. e. (1998). Urban bus transit route network design using genetic algorithm. *124*(4), 368-375.

Perring, F. H., & Walters, S. M. (1962). Atlas of the British flora. *Atlas of the British Flora.*

Poe, M. (2019). Generate a grid of hexagonal cells in a PostgreSQL database (Version 18). GitHub: GitHub. Retrieved from https://gist.github.com/mjumbewu/1761802ea06fb78c596f9cf8c9b2e769

Québec, V. (2017a). Piste cyclables surélevée. Retrieved from http://velosympathique.velo.qc.ca/amenagement-cyclable-piste-cyclable-surelevee/

Québec, V. (2017b). Sentier polyvalent. Retrieved from http://velosympathique.velo.qc.ca/amenagement-cyclable-sentier-polyvalent/

Rajerison, M. (2012a). Le carroyage avec QGIS et le plugin QMarxan, c'est facile !

Rajerison, M. (2012b). Le carroyage avec QGIS et le plugin QMarxan, c'est facile. . *Data analysis, QGIS, Urbanism.* Retrieved from https://datagistips.hypotheses.org/115

Reiss, R., Gordon, R., Neudorff, L., & Harding, J. (2006). *Integrated Corridor Management Concept Development and Foundational Research-Phase 1-Concept Development and Foundational Research Task 3.1-Develop Alternative Definitions*. Retrieved from

Rodrigue, J.-P., Comtois, C., & Slack, B. (2016). *The geography of transport systems*: Routledge.

Rodrigue, J. P. (2004). FREIGHT, GATEWAYS AND MEGA-URBAN REGIONS: THE LOGISTICAL INTEGRATION OF THE BOSTWASH CORRIDOR1. *Tijdschrift voor economische en sociale geografie, 95*(2), 147-161.

Guide de sécurité à vélo, (2018).

Sioui, L. (2014). *Pour une approche pragmatique et opérationnelle de la mobilité durable: Concept, méthodes et outils.* École Polytechnique de Montréal,

Smith, S. A. (1999). *Guidebook for transportation corridor studies: A process for effective decision-making* (Vol. 435): Transportation Research Board.

Statistique_Canada. (2016). *Fichiers des limites des secteurs de recensement du Recensement de 2016*.

Steg, L. (2005). Car use: lust and must. Instrumental, symbolic and affective motives for car use. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, 39*(2-3), 147-162.

Guide d'aménagement pour le transport en commun, (2011).

STM. (2013). *PROGRAMME TRIENNALD'IMMOBILISATIONS 2014-2015-2016*. Retrieved from https://www.stm.info/sites/default/files/pdf/fr/pti_14-16.pdf

Tanaboriboon, Y., Quium, A. A., & Changsingha, C. (1993). Performance indicator analysis: a management tool for the improvement of bus transit operation in Bangkok. *Journal of advanced transportation, 27*(2), 207-223.

Tom, V., & Mohan, S. (2003). Transit route network design using frequency coded genetic algorithm. *Journal of transportation engineering, 129*(2), 186-195.

Transport_Québec. (2013). Enquêtes origine-destination. Retrieved from https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/Planification-transports/enquetes-origine-destination/Pages/enquetes-origine-destination.aspx

Turcot, C., & St-Jacques, M. (2015). Aménagement de voies cyclables pour faire du vélo un mode de transport utilitaire au Québec. *Routes et Transports, 44*(2), 16-18.

Tyrinopoulos, Y., & Antoniou, C. (2008). Public transit user satisfaction: Variability and policy implications. *Transport policy, 15*(4), 260-272.

van Nes, R., Hamerslag, R., & Immers, L. (1988). *The design of public transport networks* (Vol. 1202): National Research Council, Transportation Research Board.

Van Oudheusden, D., Ranjithan, S., & Singh, K. J. T. (1987). The design of bus route systems—An interactive location-allocation approach. *14*(3), 253-270.

Viggiano, C., Koutsopoulos, H., Wilson, N., & Attanucci, J. (2015). *Identifying opportunities for bus service expansion using automatically collected data.* Paper presented at the 14th International Conference on Competition and Ownership in Land 3 Passenger Transport.

Viggiano, C. A. (2017). *Bus network sketch planning with origin-destination travel data.* Massachusetts Institute of Technology,

Wikipédia. (2013). General Transit Feed Specification.

Wikipédia. (2018). Azimut. Retrieved from https://fr.wikipedia.org/wiki/Azimut

Wikipédia. (2019a). General Transit Feed Specification. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/General_Transit_Feed_Specification

Wikipédia. (2019b). Piéton. Retrieved from https://fr.wikipedia.org/wiki/Pi%C3%A9ton

ANNEXES

ANNEXE A – ENSEMBLE DU CODE ÉCRIT

Code de création de grilles de désirs

Disponible sur : https://github.com/YJ2292/Grille_CR

Code de création du niveau 2 de l'offre

Disponible sur : https://github.com/YJ2292/level_2_services