



Titre: Modélisation des facteurs ayant une incidence sur le choix des trajets en transport en commun
Title: trajets en transport en commun

Auteur: Alicia Brodeur
Author:

Date: 2025

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Brodeur, A. (2025). Modélisation des facteurs ayant une incidence sur le choix des trajets en transport en commun [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/71309/>
Citation:

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/71309/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Catherine Morency
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Modélisation des facteurs ayant une incidence sur le choix des trajets en
transport en commun**

ALICIA BRODEUR

Département des génies civil, géologique et des mines

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

Génie civil

Octobre 2025

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Modélisation des facteurs ayant une incidence sur le choix des trajets en transport en commun

Présenté par **Alicia BRODEUR**

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

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

M. Martin TRÉPANIÉ, président

Mme. Catherine MORENCY, membre et directrice de recherche

M. Hamzeh ALIZADEH, membre

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d’abord à exprimer ma profonde gratitude à ma directrice de recherche, Catherine Morency, pour la confiance qu’elle m’a accordée dans la réalisation de ce projet. Ses précieux conseils, sa rigueur scientifique et son énergie communicative ont été des sources de motivation et d’inspiration, particulièrement dans les moments de doute.

Je souhaite également remercier chaleureusement les étudiants à la maîtrise et au doctorat en transport, qui sont rapidement devenus bien plus que de simples collègues. Leur présence au quotidien, leur bonne humeur et leur entraide ont non seulement contribué à faire avancer ce projet, mais ont aussi rendu cette expérience universitaire mémorable. Chacun a su apporter, à sa façon, des idées, des connaissances et surtout des éclats de rire qui ont égayé mes longues journées de rédaction. Je garde en mémoire nos séances de natation, nos sorties à vélo, nos discussions de potinage et de tranches de vie, les moments passés dans les parcs et les nombreux congrès auxquels nous avons participé tous ensemble. La fois où nous sommes allés encourager nos précieuses athlètes durant leur triathlon, le séjour au chalet à Gore ou encore les dîners thématiques comptent parmi les souvenirs marquants qui ont transformé cette maîtrise en une aventure des plus agréables. J’en ressors avec un groupe d’amis aussi unique qu’inestimable.

Un merci particulier à Hubert Verreault pour son aide avec les bases de données, ainsi qu’aux associés de recherche pour leur soutien technique avec la plateforme Transition.

Je remercie aussi les partenaires de la Chaire Mobilité pour leur appui au projet : Ville de Montréal, Société de transport de Montréal, Exo, ARTM, ministère des Transports et de la Mobilité durable et Ville de Québec.

Enfin, je ne saurais oublier mes amis proches pour leurs encouragements constants et leur capacité à me changer les idées lors des périodes plus exigeantes. Par-dessus tout, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à ma mère, mon père et ma sœur pour leur patience, même dans mes moments de moins bonne humeur, pour leur bienveillance lorsque je me remettai en question et pour leur soutien inconditionnel tout au long de cette aventure et dans tout ce que j’entreprends.

À tous, merci d’avoir contribué, par votre présence, vos encouragements et votre soutien, à faire de cette aventure un moment inoubliable. Je vous en suis profondément reconnaissante.

RÉSUMÉ

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre général de l'évaluation de l'offre de transport en commun et des logiques liées au choix d'un trajet. Le mémoire propose une modélisation des facteurs influençant le choix des trajets en transport en commun à partir des trajets choisis tels que déclarés dans l'enquête OD et des trajets simulés à l'aide de la plateforme Transition. L'hypothèse de départ est que le temps total de déplacement est le facteur le plus important dans le choix d'un trajet mais il y a une variété d'autres facteurs qui sont déterminants. Le but du projet est de fournir une méthodologie permettant d'évaluer la qualité et la diversité des offres de TC et aussi de mieux comprendre les logiques liées au choix de trajet de divers usagers. Les objectifs du projet sont les suivants :

- Identifier les coefficients associés aux facteurs qui influencent le choix d'un trajet en transport collectif
- Analyser les logiques liées au choix des trajets en créant des arbres de décision et en développant des combinaisons de coefficients d'une équation de coût généralisé pour différents types de trajets et d'usagers
- Analyser les propriétés des trajets choisis et non choisis par l'entremise d'analyses spatio-temporelles
- Développer des indicateurs qui permettent de poser des constats sur la pénibilité perçue et la qualité de l'offre de TC

Une revue de la littérature a permis d'identifier les principaux facteurs affectant le choix d'un trajet en TC. Il existe une infinité de facteurs déterminants, tels que le temps d'attente, le nombre de correspondances, l'accessibilité au réseau, les détours et plus encore. Elle a également fait une synthèse des coefficients associés à ces facteurs permettant de quantifier la perception du temps. La revue de littérature a aussi permis d'explorer les équations de coût généralisé et a mis en lumière plusieurs méthodes d'enquêtes sur les préférences déclarées ainsi que d'autres concepts explorés dans ce projet, tels que la vitesse théorique et l'impact de la présence de trajet plan B dans le choix d'itinéraire.

Le mémoire propose une méthodologie combinant analyses spatiales et statistiques. La méthodologie développée s'articule autour de deux volets principaux :

1. Les choix de trajets par les usagers : Ce volet vise à comprendre pourquoi un usager choisit un trajet donné parmi plusieurs options. Les coefficients issus de la littérature ont été intégrés dans une équation de coût généralisé, calculant un temps perçu propre à chaque itinéraire, et ce, pour une typologie d'usagers et de trajets. Le segment de population "homme de 40 à 64 ans" a la combinaison de coefficients de l'équation de coût généralisé qui obtient le meilleur taux de succès avec 64,26 %. Des arbres de décision, élaborés selon le motif de déplacement, ont permis d'analyser les écarts entre les trajets les plus courts et ceux réellement choisis. Ceci permet de contribuer à mieux comprendre pourquoi les usagers ont choisi des trajets qui n'ont pas le temps le plus court. Pour l'arbre de décision des déplacements motif Travail, le facteur le plus important, représenté par la première branche, était le nombre de correspondances. Pour le motif Étude, Loisir et Magasinage, le facteur le plus important, représenté par la première branche, est le temps en véhicule.
2. La qualité des alternatives de trajets : Ce volet s'appuie sur l'analyse descriptive des trajets choisis et non choisis, l'étude des vitesses théoriques (avec des seuils fixés à 6 km/h et 10 km/h), l'évaluation des trajets de type plan B (avec les seuils de différence de vitesse à 1, 2 et 3 km/h) et la construction d'une matrice origine-destination pour observer la répartition spatiale des trajets les plus courts. L'analyse des vitesses théoriques permet de constater qu'il y a environ 7,7 % des trajets PCC qui ne respectent pas le seuil de vitesse de 6 km/h et que 34,2 % des trajets PCC ne respectent pas un seuil de vitesse de 10 km/h. De plus, parmi toutes les alternatives possibles de la BD, 62 % des trajets générés pour le motif Magasinage n'atteignent pas une vitesse théorique de 10 km/h. Un algorithme d'agrégation spatiale, encapsulé dans TRACCLUS, couplé à QGIS, a permis de localiser les corridors et les lignes de désir où les vitesses observées sont faibles.

Deux indicateurs ont été développés : l'indicateur de pénibilité perçue (temps perçu de l'équation de coût généralisé selon le temps réel du trajet) et l'indicateur de détour (temps pour parcourir le trajet à vol d'oiseau à une vitesse de 6 km/h et de 10 km/h selon le temps réel du trajet).

En conclusion, ce mémoire apporte une contribution à la compréhension des logiques liées au choix de trajet en transport collectif et à l'évaluation de la qualité de l'offre dans le grand Montréal. Parmi les limites identifiées, la plateforme Transition présente certaines contraintes en lien avec la simulation des alternatives. De plus, les coefficients de temps perçu tirés de la littérature scientifique proviennent majoritairement d'études internationales, ce qui pourrait affecter la

précision des résultats. Les perspectives de recherche incluent la réalisation d'un sondage spécifiquement pour les usagers à Montréal, l'approfondissement de l'étude des trajets plan B, l'intégration de valeurs seuils aux indicateurs, ainsi qu'un raffinement des coefficients de correspondance selon leur nature (bus-bus, métro-bus, etc.) dans l'équation de coût généralisé.

Cette recherche met en lumière l'importance d'adapter l'offre de transport collectif aux besoins réels des usagers, en tenant compte de la diversité des usagers et du contexte local. Une telle approche constitue un moyen clé d'améliorer l'efficacité et l'attractivité du réseau, et ultimement, favoriser une transition vers une mobilité plus durable.

ABSTRACT

This thesis is part of the broader framework of evaluating public transit supply and the underlying logic behind route choice. It proposes a modelling of the factors influencing public transit route choice, based on the trips reported in the origin destination (OD) survey and on simulated trips generated with the Transition platform. The initial hypothesis is that total travel time is the most important factor in route choice, but that a variety of other factors are also decisive. The aim of the project is to provide a methodology to assess the quality and diversity of public transit supply, while gaining a better understanding of the logic behind route choice for different types of users. The project's objectives are as follows:

- Identify the coefficients associated with factors that influence public transit route choice
- Analyze the logic behind route choice by building decision trees and developing generalized cost equations for different types of trips and users
- Analyze the properties of chosen and non-chosen trips through spatiotemporal analyses
- Develop indicators to assess perceived inconvenience and the quality of public transit supply

A literature review identified the main factors affecting public transit route choice. There are countless determining factors, such as waiting time, the number of transfers, network accessibility, detours, and more. The review also synthesized the coefficients associated with these factors, enabling the quantification of perceived time. It further explored generalized cost equations and highlighted several stated preference survey methods, as well as other concepts examined in this project, such as theoretical speed and the impact of the presence of a “plan B” route on itinerary choice.

The thesis proposes a methodology combining spatial and statistical analyses. The approach is structured around two main components:

1. Users' route choices: This component seeks to understand why a user selects a given route from among several options. Coefficients from the literature were integrated into generalized cost equations to calculate a perceived travel time specific to each route, for various user and trip typologies. The population segment “Men aged 40 to 64” has the generalized cost equation that achieves the best success rate with 64.26%. Decision trees,

developed according to trip purpose, were used to analyze the differences between the shortest routes and those actually chosen. This helps explain why users may choose routes that are not the fastest. For the “Work” trip purpose, the most important factor, represented by the first branch, was the number of transfers. For “Study,” “Leisure,” and “Shopping” purposes, the most important factor, represented by the first branch, was in-vehicle travel time.

2. Quality of route alternatives: This component is based on a descriptive analysis of chosen and non-chosen routes, the study of theoretical speeds (with thresholds set at 6 km/h and 10 km/h), the evaluation of “plan B” type trips (with thresholds set at 1, 2 and 3 km/h), and the construction of an origin–destination matrix to observe the spatial distribution of the shortest routes. The theoretical speed analysis reveals that about 7.7% of PCC routes fail to meet the 6 km/h threshold, and 34.2% fail to meet the 10 km/h threshold. Moreover, among all possible database-generated alternatives, 62% of shopping-purpose trips do not reach a theoretical speed of 10 km/h. A spatial aggregation algorithm, implemented in TRACUS and coupled with QGIS, was used to identify corridors and desire lines where observed speeds are low.

Two indicators were developed: the perceived inconvenience indicator (ratio of perceived time from the generalized cost equations to the actual trip time) and the detour indicator (ratio of the time to cover the trip “as the crow flies” at 6 km/h and 10 km/h on the actual trip time).

In conclusion, this thesis contributes to understanding the logic behind public transit route choice and evaluating the quality of the supply in Greater Montréal. Among the identified limitations, the Transition platform has certain constraints related to simulating alternatives. Furthermore, the perceived time coefficients from literature are mainly derived from international studies, which may affect the precision of the results. Future research perspectives include conducting a survey specifically for Montréal users, further exploring “plan B” trips, integrating threshold values into the indicators, and refining transfer coefficients in the generalized cost equations according to their nature (bus—bus, metro—bus, etc.).

This research underscores the importance of tailoring public transit supply to the real needs of users, considering user diversity and the local context. Such an approach is a key means of

improving the efficiency and attractiveness of the network and, ultimately, promoting a shift toward more sustainable mobility.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XIV
LISTE DES FIGURES	XVII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XXI
LISTE DES ANNEXES.....	XXII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Problématique.....	2
1.3 Objectifs de recherche	3
1.4 Structure du mémoire	3
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	5
2.1 Perception du temps	5
2.1.1 Temps réel et temps perçu.....	5
2.1.2 Obtention de données sur la perception du temps.....	6
2.2 Facteurs impactant la pénibilité perçue d'un trajet	8
2.2.1 Temps de déplacement total.....	10
2.2.2 Temps en véhicule.....	10
2.2.3 Correspondances	11
2.2.4 Temps d'attente	12
2.2.5 Temps d'accès, de sortie et de marche aux correspondances	15
2.2.6 Distorsion géométrique	17

2.2.7	Utilisation du temps à bord du véhicule.....	18
2.2.8	Achalantage du véhicule	19
2.2.9	Fiabilité du service	21
2.2.10	Aménagement aux arrêts et à bord du véhicule	22
2.2.11	Accessibilité à bord des véhicules et en station	24
2.2.12	Caractéristiques propres aux usagers	25
2.2.13	Autres facteurs.....	26
2.3	Équations de coût généralisé	27
2.4	Modèles de choix d'itinéraire.....	27
2.5	Plateforme Transition.....	28
2.6	Algorithme TRACCLUS	29
2.7	Vitesse théorique	31
2.8	Impact de la présence de trajet plan B.....	31
2.9	Trajet à vol d'oiseau.....	32
CHAPITRE 3	MÉTHODOLOGIE	33
3.1	Méthodologie générale.....	33
3.2	Description des données et des outils.....	35
3.2.1	Enquête Origine-Destination.....	35
3.2.2	Plateforme Transition.....	35
3.2.3	Base de données	36
3.3	Analyse de qualité des trajets choisis et leurs alternatives.....	37
3.3.1	Analyse descriptive des trajets	40
3.3.2	Représentation des trajets.....	42
3.3.3	Analyse des vitesses théoriques	44

3.3.4	Matrice Origine-Destination	46
3.3.5	Analyse spatiale.....	48
3.4	Analyse des logiques liées au choix d'un trajet	49
3.4.1	Arbres de décision.....	49
3.4.2	Équation de coût généralisé.....	50
3.5	Calcul des indicateurs.....	56
3.5.1	Indicateur de détour.....	56
3.5.2	Indicateur de pénibilité perçue	57
CHAPITRE 4	RÉSULTATS	58
4.1	Analyse de qualité des trajets choisis et des alternatives	58
4.1.1	Analyse descriptive des sous-ensembles de trajets PCC, PPCC et PCPC	58
4.1.2	Représentation des trajets.....	72
4.1.3	Analyse des vitesses théoriques	74
4.1.4	Matrice Origine-Destination	81
4.1.5	Analyse spatiale.....	82
4.2	Analyse des logiques liées au choix de trajet.....	95
4.2.1	Arbres de décision.....	95
4.2.2	Équation de coût généralisé.....	100
4.3	Analyse des indicateurs.....	103
4.3.1	Indicateur de détour.....	103
4.3.2	Indicateur de pénibilité perçue	108
CHAPITRE 5	CONCLUSION	116
5.1	Synthèse de la méthode	116
5.2	Contributions du mémoire.....	117

5.3	Limites du cadre méthodologique	118
5.4	Perspectives	119
RÉFÉRENCES		120
ANNEXES		133

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Coefficient lié au temps d’attente selon la densité de passagers en station (Douglas, 2008).....	14
Tableau 2.2 : Coût lié à la marche en station à divers niveaux de densité de piéton (Douglas, 2008)	16
Tableau 2.3: Coefficient lié au temps de marche en correspondance selon la densité de passagers en station (Douglas, 2008)	17
Tableau 2.4: Coefficient lié au taux d’occupation d’un véhicule de TC (J. Liu et al., 2021)	20
Tableau 2.5: Coefficient lié au taux d’occupation d’un véhicule de TC (Douglas & Karpouzis, 2006).....	20
Tableau 2.6 : Coefficient lié à la fiabilité selon le retard moyen (Douglas, 2008)	22
Tableau 3.1 : Exemple de colonnes ajoutées à la base de données	40
Tableau 3.2: Portion des combinaisons de caractéristiques ciblées	44
Tableau 3.3: Matrice OD du nombre de trajets pour l’ensemble PCC+PPCC	47
Tableau 3.4: Matrice OD du nombre de trajets pour l’ensemble PCC	48
Tableau 3.5: Exemple des niveaux de la méthode Taguchi	52
Tableau 3.6: Exemple des combinaisons tests de la méthode Taguchi.....	53
Tableau 3.7 : Exemple taux de succès brut des combinaisons tests de la méthode Taguchi	54
Tableau 4.1: Part des déplacements PCC pour chaque motif	60
Tableau 4.2: Part des déplacements PCC pour chaque statut	60
Tableau 4.3: Part des déplacements PCC selon la possession du permis de conduire.....	60
Tableau 4.4: Part des déplacements PPCC selon la possession du permis de conduire	64
Tableau 4.5: Comparaison des sous-ensembles de trajet PCC et PPCC	66
Tableau 4.6: Comparaison des sous-ensembles de trajets PCC, PPCC et PCPC.....	67

Tableau 4.7: Part des paires OD selon le nombre de trajets plan B pour seuil de différence de 1, 2 et 3 km/h.....	78
Tableau 4.8 : Part des paires OD selon le nombre de trajets plan B pour seuil de 6 et 10 km/h ..	78
Tableau 4.9: Matrice OD de la part des trajets PCC	82
Tableau 4.10: Combinaisons de coefficients de l'équation de coût généralisé développées pour différents types de personnes et déplacements.....	102
Tableau 4.11: Part des trajets choisis selon l'indicateur de détour avec le seuil de 6 km/h.....	104
Tableau 4.12 : Part des trajets choisis selon l'indicateur de détour avec le seuil de 10 km/h.....	104
Tableau 4.13 : Coefficients sélectionnés pour l'équation de coût généralisé de tous les trajets de la BD	109
Tableau 4.14 : Combinaisons de coefficients de l'équation de coût généralisé utilisées pour l'analyse de l'indicateur de pénibilité	109
Tableau 4.15 : Part des trajets choisis selon l'indicateur de pénibilité avec le coefficient d'attente minimal.....	110
Tableau 4.16 : Part des trajets choisis selon l'indicateur de pénibilité avec le coefficient de marche intermédiaire.....	112
Tableau 4.17: Part des trajets choisis selon l'indicateur de pénibilité avec le coefficient de correspondance intermédiaire	113
Tableau 4.18 : Part des trajets choisis selon l'indicateur de pénibilité avec l'équation choisie..	115
Tableau C.1: Liste des valeurs des coefficients à tester pour l'équation de coût généralisé	142
Tableau D.1 : Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour les hommes de 65 ans et plus .	143
Tableau D.2 : Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour les femmes de 65 ans et plus ..	143
Tableau D.3: Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour les femmes de 40 à 64 ans	144
Tableau D.4: Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour les hommes de 40 à 64 ans	144
Tableau D.5: Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour les hommes de 25 à 39 ans	145
Tableau D.6 : Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour les femmes de 25 à 39 ans	145

Tableau D.7: Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour les femmes de 15 à 24 ans	146
Tableau D8 : Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour les hommes de 15 à 24 ans	146
Tableau D.9 : Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour les hommes de 0 à 14 ans	147
Tableau D.10 : Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour les femmes de 0 à 14 ans	147
Tableau D.11: Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour le travail.....	148
Tableau D.12: Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour l'étude	148
Tableau D.13: Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour le loisir	149
Tableau D.14: Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour le magasinage	149
Tableau F.1: Combinaisons tests de la méthode Taguchi (toute la base de données).....	156
Tableau F.2: Moyennes des S/N pour chaque facteur et chaque niveau (toute la base de données)	156
Tableau F.3: Combinaison de coefficients de l'équation de coût généralisé sélectionnée (toute la base de données).....	157

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1: Schéma méthodologique.....	34
Figure 3.2: Paramètres utilisés dans Transition (Chaire Mobilité, 2020)	36
Figure 3.3: Création de la base de données	37
Figure 3.4 : Séparation de la base de données des trajets apparaissant comme alternative Transition	38
Figure 3.5: Schéma des quatre types de trajets provenant de la base de données.....	41
Figure 3.6 : Deux cas possibles lors du choix de trajet	41
Figure 3.7 : Fréquence des temps d'accès et de sortie de toutes les alternatives	43
Figure 3.8 : Schéma explicatif de l'analyse des vitesses théoriques	46
Figure 3.9: Base de données utilisée pour l'équation de coût généralisé.....	51
Figure 4.1: Schéma des trois sous-ensembles PCC, PPCC et PCPC	58
Figure 4.2: Pourcentage des hommes et femmes optant pour le trajet PCC selon l'âge.....	59
Figure 4.3: Différence de temps total entre le trajet PPCC et le trajet PCPC	61
Figure 4.4 : Différence du nombre de correspondances entre le trajet PPCC et le trajet PCPC ...	62
Figure 4.5: Différence de temps d'accès entre le trajet PPCC et le trajet PCPC	62
Figure 4.6: Différence de temps de sortie entre le trajet PPCC et le trajet PCPC.....	63
Figure 4.7: Différence de temps en véhicule entre le trajet PPCC et le trajet PCPC	63
Figure 4.8: Part des déplacements PCPC selon le temps de déplacement	64
Figure 4.9: Part des déplacements PCPC selon le nombre de correspondances	65
Figure 4.10: Part des déplacements PCPC selon le temps d'accès et de sortie.....	65
Figure 4.11: Temps de déplacements des sous-ensembles PCC, PPCC, PCPC	68
Figure 4.12: Nombre de correspondance des sous-ensembles PCC, PPCC, PCPC.....	69
Figure 4.13: Temps d'accès des sous-ensembles PCC, PPCC, PCPC	70

Figure 4.14: Temps de sortie des sous-ensembles PCC, PPCC, PCPC	71
Figure 4.15: Vitesse des sous-ensembles PCC, PPCC, PCPC	71
Figure 4.16: Temps d'attente en correspondance des sous-ensembles PCC, PPCC, PCPC	72
Figure 4.17: Représentation des trajets n'ayant pas le temps le plus court.....	74
Figure 4.18 : Pourcentage de paires OD selon le nombre d'alternatives respectant le seuil de 10 km/h.....	75
Figure 4.19: Pourcentage de paires OD selon le nombre d'alternatives respectant le seuil de 6 km/h	76
Figure 4.20: Part des paires OD selon le nombre de trajets plan B potentiel pour trois seuils	77
Figure 4.21: Pourcentage des trajets PCC ne respectant pas le seuil de 10 km/h selon le motif ..	79
Figure 4.22: Pourcentage des trajets PCC ne respectant pas le seuil de 6 km/h selon le motif	80
Figure 4.23: Part des trajets selon l'heure de départ et la vitesse théorique	81
Figure 4.24: Trajet PCC sous les seuils de vitesse théorique de 6 km/h et 10 km/h selon leur distance à vol d'oiseau	83
Figure 4.25: Part des trajets PCC ayant une vitesse théorique plus basse que 10 km/h selon leur distance à vol d'oiseau et le nombre de lignes TC utilisées.....	84
Figure 4.26: Part des trajets PCC ayant une vitesse théorique plus basse que 6 km/h selon leur distance à vol d'oiseau et le nombre de lignes TC utilisées.....	85
Figure 4.27: Lignes de désir des trajets PCC ayant une vitesse théorique plus basse que 6 km/h selon le nombre de lignes TC utilisées.....	86
Figure 4.28: Lignes de désir des trajets PCC ayant une vitesse théorique plus basse que 10 km/h avec une ligne TC utilisée	88
Figure 4.29: Lignes de désir des trajets PCC ayant une vitesse théorique plus basse que 6 km/h selon les distances à vol d'oiseau.....	89
Figure 4.30: Lignes de désir des trajets PCC ayant une vitesse théorique plus basse que 10 km/h selon les distances à vol d'oiseau.....	91

Figure 4.31: Carte des segments et corridors de l'analyse TRACCLUS pour les trajets PCC ayant des vitesses théoriques plus basses que 6 km/h.....	93
Figure 4.32: Carte des segments et corridors de l'analyse TRACCLUS pour les trajets PCC ayant des vitesses théoriques plus basses que 10 km/h.....	94
Figure 4.33: Arbre de décision tous motifs.....	96
Figure 4.34: Arbre de décision motif travail.....	97
Figure 4.35: Arbre de décision motif étude.....	98
Figure 4.36: Arbre de décision motif loisir.....	99
Figure 4.37: Arbre de décision motif magasinage	100
Figure 4.38 : Taux de succès Taguchi selon le taux de succès trajets PCC pour les diverses typologies	103
Figure 4.39: Part des trajets choisis selon le motif et l'indicateur de détour avec le seuil de 6 km/h	105
Figure 4.40: Part des trajets choisis selon le motif et l'indicateur de détour avec le seuil de 10 km/h	106
Figure 4.41: Part des trajets choisis selon la distance réseau et l'indicateur de détour avec le seuil de 6 km/h.....	107
Figure 4.42 : Part des trajets choisis selon la distance réseau et l'indicateur de détour avec le seuil de 10 km/h.....	108
Figure 4.43 : Part des trajets choisis selon la distance réseau et l'indicateur de pénibilité pour le coefficient d'attente minimal	111
Figure 4.44 : Part des trajets choisis selon la distance réseau et l'indicateur de pénibilité pour le coefficient de marche intermédiaire.....	112
Figure 4.45: Part des trajets choisis selon la distance réseau et l'indicateur de pénibilité pour le coefficient de correspondance intermédiaire.....	114
Figure 4.46 : Part des trajets choisis selon la distance réseau et l'indicateur de pénibilité pour l'équation choisie	115

Figure B.1: Base de données utilisée pour identifier les limites de Transition	134
Figure B.2 : Destination se situant entre deux stations de métro (Chaire Mobilité, 2020)	135
Figure B.3 : Trajet de la ligne de bus 28 de la RTL (Transit, 2025b)	136
Figure B.4: Trajet de la ligne de bus 88 de la RTL (Transit, 2025c)	136
Figure B.5: Trajet de la ligne de bus 8 de la RTL (Transit, 2025a)	136
Figure B.6: Répétition de la ligne de bus 161 de la STM (Chaire Mobilité, 2020)	137
Figure B.7 : Origine ou destination se trouvant entre la ligne verte et la ligne orange du métro de Montréal (Chaire Mobilité, 2020)	138
Figure B.8: Exemple de trajet simple (Chaire Mobilité, 2020)	139
Figure B.9: Exemple de trajet allongé (Chaire Mobilité, 2020)	139
Figure B.10 : Correspondance de train inutile 1	140
Figure B.11 : Correspondance de train inutile 2	140
Figure E.1: Différence entre les trois sous-ensembles pour le temps de déplacement	151
Figure E.2 : Différence entre les trois sous-ensembles pour le temps d'accès	152
Figure E.3: Différence entre les trois sous-ensembles pour le temps de sortie	153
Figure E.4: Différence entre les trois sous-ensembles pour le temps d'attente en correspondance	155

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

La liste des sigles et abréviations présente, dans l'ordre alphabétique, les sigles et les abréviations utilisés dans le mémoire ou la thèse ainsi que leur signification. En voici quelques exemples :

BD	Base de données
OD	Origine-Destination
PCC	Trajet plus court choisi
PCPC	Trajet plus court pas choisi
PPCC	Trajet pas plus court choisi
STM	Société de transport de Montréal
TC	Transport collectif
TCD	Tableau croisé dynamique

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A Commandes TRACLUS	133
ANNEXE B Limites de la méthode de génération d’alternatives dans Transition et de la codification des réseaux TC	134
ANNEXE C Liste des coefficients possibles de l’équation de coût généralisé provenant de la littérature scientifique	142
ANNEXE D Coefficients de l’équation de coût généralisé sélectionnés pour chaque segment.	143
ANNEXE E Tests statistiques pour assurer la différences significatives des sous-ensembles de trajets PCC, PPCC et PCPC	150

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Dans une ère où les changements climatiques représentent une réelle problématique, se diriger vers une mobilité plus durable représente une solution vers laquelle les efforts devraient être mis. En effet, choisir le transport collectif est une mesure individuelle efficace pour réduire son empreinte carbone. Au Canada, en 2023, environ 28 % des émissions de gaz à effet de serre proviennent du secteur des transports (Gouvernement du Canada, 2025). Ces émissions sont principalement liées au transport routier, englobant le transport de personnes et les véhicules lourds. En 2022, au Canada, le nombre total de véhicules automobiles immatriculés était de 26,3 millions, représentant une hausse de 0,3 % par rapport à 2021 (Statistique Canada, 2025). Avec la place qu'occupe l'automobile dans la mobilité quotidienne, l'augmentation de la part modale du transport collectif constitue un défi majeur pour les villes et les autorités de transport. Pour modifier la part modale au profit du transport en commun, ce dernier doit se positionner comme une alternative compétitive et attrayante. Cela implique non seulement un réseau bien connecté mais aussi une offre de service fiable, fréquente et adaptée aux besoins des usagers. Le transport collectif doit répondre efficacement aux attentes en matière de rapidité, de confort et de ponctualité afin de rivaliser avec les avantages perçus de l'automobile. Améliorer l'attractivité du transport collectif est essentiel pour favoriser un transfert modal et répondre aux objectifs de mobilité urbaine.

1.1 Mise en contexte

Les réseaux de transport en commun sont généralement conçus pour répondre à la demande des déplacements domicile-travail durant les heures de pointe. Ce type de réseau de transport est efficace pour une bonne portion des déplacements, mais une variété de types d'usagers est cependant mal desservie. Afin de générer un changement de la part modale en faveur du transport en commun, l'offre de transport collectif doit répondre aux besoins de mobilité d'une population diverse avec différents motifs de déplacement pour toutes les heures de la journée. Offrir un réseau de transport de qualité satisfaisante demande une compréhension du contexte et des contraintes liés à ce mode de transport. Il est aussi d'une haute importance de comprendre les habitudes de déplacements de la population, particulièrement les logiques liées au choix de trajet qui entre en jeu lorsqu'un usager choisit un trajet de transport collectif parmi plusieurs alternatives. En effet, analyser ces logiques de choix permet de mieux cerner les facteurs déterminants dans le choix d'un

itinéraire. Cette compréhension est essentielle pour concevoir une offre de transport adaptée, répondant aux préférences des usagers, et ainsi améliorer l'efficacité et l'attractivité du réseau.

De nos jours, il est facile d'utiliser un calculateur de trajet comme Google Maps ou Transit pour planifier ses déplacements. Les usagers peuvent comparer diverses options de trajet selon la durée totale du déplacement, le coût, le nombre de correspondances, ou encore la géométrie du trajet. Ces outils permettent aussi d'identifier les trajets offrant les meilleures conditions selon les préférences personnelles.

De plus, les sociétés de transport publient régulièrement des mises à jour sur l'état de leur réseau. Par exemple, la Société de transport de Montréal (STM) informe les usagers en temps réel sur les perturbations de service de ses lignes de métro et d'autobus, les modifications d'itinéraires, ou encore les horaires révisés (Société de transport de Montréal, 2025).

Ainsi, la combinaison de ces outils et d'une meilleure compréhension du comportement des usagers permet d'optimiser la planification des trajets selon les préférences de chaque usager.

1.2 Problématique

Ce projet de maîtrise porte sur la modélisation des facteurs qui ont un impact sur le choix d'un trajet en TC, avec un accent sur la grande région de Montréal. Deux grands volets structurent cette étude. Le premier volet porte sur les logiques de choix de trajet des usagers du TC. Le deuxième volet porte sur l'évaluation de la qualité des alternatives de trajets offertes.

Le premier volet permet d'explorer le concept de la perception du temps et de la pénibilité perçue lors des déplacements en TC. Une revue de littérature permet d'exposer l'état des connaissances sur les facteurs qui impactent le choix d'un trajet de TC ainsi que les coefficients associés à ces facteurs pour divers types de personnes. Ces coefficients serviront à quantifier la perception du temps en transport en commun. Des combinaisons de coefficients dans une équation de coût généralisé seront développées afin de calculer le temps perçu pour les différentes alternatives de trajets. Ensuite, des arbres de décision permettent de modéliser et prédire le choix de trajet.

Le second volet consacré à la qualité des alternatives de trajet offertes contient une analyse descriptive des trajets disponibles dans la base de données. Une analyse spatiale et une étude des vitesses permettent de brosser un portrait global de la qualité des alternatives. L'étude des trajets

plans B, c'est-à-dire une option valide autre que le trajet le plus rapide, permet d'évaluer si d'autres options peuvent être satisfaisantes pour les usagers.

Finalement, la typologie de personnes et de trajets viendra enrichir la compréhension des contraintes exercées par chaque segment de la population.

1.3 Objectifs de recherche

Le premier objectif consiste à identifier les coefficients associés aux facteurs qui influencent le choix d'un trajet en transport collectif afin de quantifier le temps perçu. Le deuxième objectif vise à évaluer la qualité de l'offre de transport en commun en analysant les propriétés des trajets choisis et non choisis par l'entremise d'analyses spatiales et d'études de vitesse. Le troisième objectif est d'analyser les logiques liées au choix de trajet en créant des arbres de décision et en développant des combinaisons de coefficients d'une équation de coût généralisé segmentées selon une typologie de trajets et d'usagers. Le quatrième objectif est de développer des indicateurs qui permettent de poser des constats sur la pénibilité perçue et la qualité de l'offre de TC.

1.4 Structure du mémoire

Premièrement, une revue de littérature scientifique est réalisée dans le but de clarifier quelques concepts clés du projet tel que la perception du temps, les méthodes d'enquête possibles, un état des connaissances sur les facteurs impactant le choix d'un trajet ainsi que les coefficients associés qui permettent de quantifier la pénibilité perçue par les usagers.

Deuxièmement, la méthodologie décrit en détail chacune des étapes importantes pour la réalisation du projet. La base de données utilisée est d'abord présentée. Les étapes pour effectuer l'analyse des propriétés des trajets choisis et non choisis sont présentées. Une analyse spatiale, incluant la construction d'une matrice origine-destination (OD) et l'application de l'algorithme d'agrégation spatiale encapsulé dans TRACCLUS, est développée. L'analyse du choix de trajet, incluant la création des arbres de décision et le développement d'une équation de coût généralisé, est ensuite présentée. Par la suite, les calculs menant à la création des deux indicateurs sont développés. Une section qui explore les limites de la plateforme Transition a aussi sa place dans la méthodologie.

Troisièmement, les résultats issus des diverses étapes méthodologiques sont présentés. Les indicateurs calculés permettent d'émettre des constats sur la qualité de l'offre de TC dans la région du grand Montréal en 2018 et sur les logiques liées au choix de trajet des usagers.

Quatrièmement, le dernier chapitre de ce mémoire présente la conclusion du projet. Une synthèse de l'approche du projet est proposée. Les principales contributions du projet, les limites et les perspectives sont mises en lumière.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre offre un état des connaissances des facteurs impactant la perception du temps et la pénibilité perçue des trajets en transport en commun. Les principaux facteurs ainsi que les coefficients qui y sont reliés sont présentés.

2.1 Perception du temps

La perception du temps fait référence à l'écart qui existe entre le temps réel mesuré et le temps tel qu'il est ressenti par les usagers. En transport collectif, la perception du temps affecte directement la satisfaction des passagers et est donc un aspect important à considérer lors de la planification d'un réseau de transport public (Cornet et al., 2022; Espino & Román, 2020; Meng et al., 2018; Outwater et al., 2014). Ainsi, des conditions inconfortables, stressantes ou frustrantes peuvent engendrer une surestimation du temps de déplacement, ce qui augmente la pénibilité perçue du trajet, même si sa durée objective reste constante.

Ce phénomène a des impacts importants dans l'analyse de la qualité du service, puisqu'il démontre que la simple réduction du temps de parcours ne suffit pas à améliorer l'expérience usager, il faut aussi agir sur les conditions de voyage pour réduire le temps perçu. La littérature a mis en évidence plusieurs facteurs susceptibles d'influencer cette perception, qu'ils soient physiques, cognitifs, environnementaux ou sociaux et qui seront abordés dans les sections qui suivent.

2.1.1 Temps réel et temps perçu

Le temps réel est une mesure objective qui correspond à la durée d'un déplacement, indépendamment de l'expérience vécue par l'utilisateur. À l'inverse, le temps perçu est une notion subjective qui varie selon les caractéristiques individuelles, les conditions du trajet et le contexte de la zone (González et al., 2025; Kittelson & Associates, Inc. et al., 2013; Litman, 2023; J. Liu et al., 2021). Sa mesure est plus complexe car elle repose sur la manière dont les individus vivent et interprètent le déroulement de leur déplacement.

La perception du temps peut différer significativement d'une personne à une autre. Par exemple, pour un jeune adulte en bonne condition physique, le temps de marche pour rejoindre un arrêt de bus peut sembler relativement court et peu contraignant. En revanche, pour une personne âgée ou

à mobilité réduite, ce même temps de marche peut être perçu comme plus long et plus pénible, en raison de l'effort physique requis (Outwater et al., 2014; Sugovic & Witt, 2013).

De plus, la perception varie aussi selon la durée totale du trajet. Une étude a montré que les trajets courts, qui comportent souvent des segments multiples et enchaînés rapidement, tendent à être surestimés. Chaque étape étant perçue distinctement, leur accumulation amplifie la sensation de durée (Meng et al., 2018). De plus, la familiarité avec un itinéraire affecte la perception du temps. Voyager sur des trajets routiniers atténue le temps perçu, qui tend à être sous-estimé (Harms et al., 2021). Cela montre que la perception du temps n'est pas linéaire par rapport à sa mesure réelle mais qu'elle dépend d'un ensemble de facteurs contextuels et psychologiques.

2.1.2 Obtention de données sur la perception du temps

Il existe plusieurs méthodes pour recueillir des données relatives au transport collectif, chacune ayant ses avantages et ses limites. Dans le cadre de ce projet, l'un des objectifs est d'analyser les logiques liées au choix de trajets. Pour ce faire, il faut obtenir des informations sur la perception du temps des usagers lors de leurs déplacements en transport en commun.

Une première méthode consiste à interviewer les usagers directement en station, comme cela a été réalisé à Singapour dans le cadre d'une étude sur la perception du temps (Meng et al., 2018). Les participants étaient recrutés soit parmi les contacts des enquêteurs, soit parmi les usagers rencontrés dans les stations. Un point de départ et une heure étaient communiqués pour le déroulement de l'entrevue. Les enquêteurs accompagnaient les usagers du transport collectif depuis leur point d'origine jusqu'à leur destination. Durant le trajet, les interactions entre l'interviewer et le répondant étaient réduites au minimum pour éviter d'influencer les perceptions. Le temps réel de chaque étape du trajet était mesuré, tandis que le temps perçu était évalué immédiatement après chaque phase du déplacement. D'autres variables comme l'âge, le sexe, la météo, le mode de transport utilisé et le motif du déplacement étaient aussi enregistrées. Bien que cette méthode offre une grande richesse de données, elle exige un investissement important en ressources humaines. De plus, les temps perçus obtenus dans cette étude étaient globalement plus bas que ceux d'autres recherches sur le même sujet. Cela peut être dû au fait que l'enquêteur questionnait la personne à la fin de chaque activité, faisant qu'elle était plus sensible au temps réel et non à son temps perçu.

Une deuxième option est l'entrevue téléphonique assistée par ordinateur (CATI) (Choi, 2004). Les enquêteurs contactent les personnes par téléphone et effectuent leur enquête. L'enquête téléphonique assistée par ordinateur inclut des enregistrements audios des conversations, ainsi, des logiciels spécialisés sont utilisés pour transcrire les réponses sur un ordinateur, ce qui permettrait d'éviter les erreurs humaines de retranscription (Zalewski et al., 2019). Auparavant, ce type d'entrevue permettait d'atteindre un large échantillon, en particulier lorsque la base de sondage repose sur les abonnés de l'annuaire téléphonique régional. Toutefois, l'efficacité de cette méthode diminue avec le déclin de l'utilisation des téléphones résidentiels filaires. Ceci rend particulièrement difficile de joindre les personnes de certains groupes d'âge comme les 15 à 30 ans qui utilisent principalement des téléphones cellulaires. Cette évolution rend la couverture de certains segments de population plus difficile (Ministère des transports, de la mobilité durable et de l'électrification des transports, 2017). Bien que cette méthode ait représenté une approche pertinente, elle est aujourd'hui moins adaptée aux besoins actuels.

Une troisième approche intéressante est la méthode en deux étapes (Zalewski et al., 2019). Tout d'abord, les enquêteurs effectuent le recrutement de répondants dans les stations de TC ou à bord des véhicules. Les enquêteurs distribuent de petits questionnaires qui peuvent être remplis sur place. Par la suite, les répondants sont contactés afin de remplir un deuxième questionnaire plus détaillé en ligne ou par téléphone. La méthode en deux étapes a été utilisée dans le cadre d'une enquête pour le métro de Los Angeles (LACMTA, 2011). Pour commencer, des questionnaires où étaient demandés l'origine et la destination du trajet ainsi que le numéro de téléphone du participant ont été distribués. Ensuite, des entrevues téléphoniques ont été effectuées pour avoir des informations sur les déplacements et sur les usagers. À la suite de cette enquête, le Los Angeles County Metropolitan Transportation Authority a noté que le taux de réponse était nettement plus élevé avec cette méthode qu'avec les questionnaires sur papier.

Une quatrième approche est le questionnaire papier auto-administré. Typiquement, les sondages sur papier sont distribués aux répondants, qui doivent ensuite y répondre par eux-mêmes et retourner le sondage à l'enquêteur ou l'envoyer par la poste. Cette méthode est avantageuse car elle requiert moins de main d'œuvre sur place. En effet, les enquêteurs peuvent distribuer et collecter une grande quantité de questionnaires, ce qui diminue le nombre d'enquêteurs ainsi que les heures nécessaires pour la collecte de données (Zalewski et al., 2019). Dans les sondages sur

papier, la formulation des questions est très importante et peut avoir un grand impact sur la qualité des résultats obtenus. Des recommandations sont de ne pas inclure de questions à réponse ouverte et de limiter le nombre d'options dans les questions à choix de réponse (Pew Research Center, 2025). Cependant, cette méthode présente plusieurs désavantages qui font qu'elle n'est plus très utilisée. La transcription des données papier sur un ordinateur prend beaucoup de ressources et de temps et peut engendrer des erreurs de frappe. Ainsi, le codage des réponses sur papier représente un grand coût pour méthode d'enquête (Statistique Canada, 2015).

Une cinquième approche consiste à réaliser une enquête web. Le questionnaire, créé sur une plateforme web, peut être diffusé par voie électronique auprès d'un échantillon ciblé. Par exemple, une enquête web a été menée par Exo en 2020 afin de mieux comprendre les habitudes de transport de ses usagers dans la région de Montréal. Les sondages électroniques sont économiques, car ils ne nécessitent pas la présence continue d'un enquêteur. De plus, les enquêtes web sont généralement perçues comme étant plus rapides à compléter que des sondages sur papier (Exo, 2021; Zalewski et al., 2019). Les sondages web peuvent rejoindre un grand nombre de personnes car, en 2024, aux États-Unis, environ 96 % des adultes disent utiliser l'internet. Cependant, il faut utiliser la bonne méthode de recrutement afin d'éviter un risque d'erreurs d'échantillonnage de la population. En faisant un recrutement basé sur les adresses des ménages, il est possible d'échantillonner chaque segment de population de manière adéquate et proportionnelle à la réalité (Harter et al., 2016).

Bien d'autres méthodes de collecte de données existent, offrant chacune des avantages selon le contexte et les objectifs. Cependant, ces méthodes, bien qu'intéressantes pour obtenir des résultats précis, impliquent certains coûts et nécessitent un délai de mise en œuvre étendu.

Dans le cadre de ce projet, les coefficients associés aux facteurs influençant la perception du temps seront notamment extraits de la littérature scientifique existante. Ces valeurs, obtenues à partir d'études antérieures, sont présentées dans la section suivante.

2.2 Facteurs impactant la pénibilité perçue d'un trajet

Diverses variables entrent en jeu lorsque les usagers du transport en commun choisissent un trajet. En effet, le choix d'un trajet ne se limite pas à une simple logique de minimisation du temps ou de

la distance mais inclut également une charge mentale, psychologique et physique, associée à la gestion d'un déplacement (Bosch et al., 2024; Norgate et al., 2020). Une hypothèse couramment admise est que le temps de parcours total constitue la variable principale que les usagers cherchent à minimiser. Cette vision repose sur une approche microéconomique du comportement rationnel selon laquelle l'individu cherche à maximiser l'utilité globale de son trajet (Bonnell, 2004). La théorie de l'utilité appliquée aux transports repose sur l'idée que chaque usager agit de manière rationnelle en choisissant le trajet qui maximise sa satisfaction ou son utilité. Cette utilité est déterminée par des critères comme le temps de trajet, le coût, ou même la fréquence. Les modèles de prévision de la demande s'appuient sur cette approche pour estimer les comportements de déplacement. Chaque alternative est évaluée à partir de son utilité globale. Cette théorie, bien qu'elle simplifie la réalité, reste un outil fondamental pour analyser et anticiper les choix de trajet (Bonnell, 2004).

Dans ce cadre théorique, l'Homo Economicus est utilisé comme hypothèse de référence. Ce concept suppose que le voyageur agit de manière rationnelle en comparant les différentes options de trajet qui s'offrent à lui et optant pour celle qui minimise son coût généralisé de transport. Le coût généralisé est une mesure qui combine le temps, le coût monétaire, le confort, l'effort et autres désagréments (Ravalet, 2013). Le temps de déplacement total, perçu comme du temps non productif, est donc généralement considéré comme le facteur le plus important (Tawfik et al., 2010; J. Wang & Rakha, 2020).

Cependant, le choix d'un trajet ne repose pas uniquement sur des considérations de durée. D'autres éléments, comme le nombre de correspondances, la fiabilité du service, le confort perçu, la sécurité, ou encore la complexité de l'itinéraire, influencent de manière significative la pénibilité perçue d'un trajet (Gauthier, 2020; Kittelson & Associates, Inc. et al., 2013; Litman, 2023; Outwater et al., 2014). Ainsi, deux trajets de durée équivalente peuvent être jugés très différemment selon ces facteurs.

Dans cette section, les études analysées s'intéressent spécifiquement aux perceptions et aux préférences des usagers à l'égard de ces différentes composantes du trajet. Les facteurs influençant la qualité perçue sont reliés à des coefficients qui quantifient leur pénibilité associée, permettant ainsi d'identifier leur poids relatif dans les choix effectués.

2.2.1 Temps de déplacement total

Le temps de déplacement total est souvent considéré comme le facteur principal influençant le choix d'un trajet en transport en commun. Il correspond à la somme des différentes composantes temporelles du déplacement, soit le temps d'accès, le temps d'attente, le temps en véhicule, le temps de correspondance et le temps de sortie. Du point de vue des usagers, ce temps est généralement perçu comme un coût à minimiser car il empiète sur d'autres activités jugées plus utiles ou agréables (Bonnell, 2004). En effet, la plupart des individus désirent se rendre à leur destination en prenant le moins de temps possible.

Le temps de déplacement total ne peut donc pas être intégré aux équations de coût généralisé avec un coefficient unique puisqu'il englobe plusieurs facteurs, chacun associé à un coefficient distinct.

2.2.2 Temps en véhicule

Il est reconnu dans la littérature scientifique que le temps en véhicule est utilisé comme référence pour l'évaluation de la perception du temps (Douglas, 2008; Frappier, 2015; Kittelson & Associates, Inc. et al., 2013; Litman, 2023; Outwater et al., 2014). Autrement dit, il sert d'unité de comparaison dans les équations de coût généralisé. Le coefficient relié au temps en véhicule est donc fixé à 1, ce qui veut dire qu'il est généralement considéré comme la portion du trajet la moins pénible parmi les autres facteurs. En effet, tous les autres facteurs sont transformés en équivalent de temps en véhicule grâce aux coefficients. Cette méthode permet de comparer les différents coefficients sur une même échelle.

Le choix du temps en véhicule comme référence repose sur plusieurs observations empiriques. Ce temps est relativement prévisible, il est souvent passé assis et peut être utilisé pour d'autres activités telles que la lecture, l'écoute de musique, le repos, etc. Ainsi, cette étape est perçue comme moins désagréable que d'autres phases du trajet, comme l'attente à l'arrêt ou les correspondances. Cependant, cette perception peut varier selon les conditions à bord. La surcharge à bord, le bruit, des sièges inconfortables ou le manque de climatisation peuvent accroître la pénibilité du temps passé dans le véhicule (Douglas, 2008; Gauthier, 2020; Li et al., 2020). Certains de ces facteurs seront présentés dans les sections qui suivent. Malgré cela, dans la majorité des études, le temps en véhicule reste le point de comparaison pour l'évaluation des autres composantes temporelles.

Cette convention facilite la construction d'équations de coût généralisé permettant de comparer objectivement différentes alternatives de trajet. Attribuer aux facteurs des coefficients en fonction

de leur équivalence en temps en véhicule permet d'estimer plus fidèlement la pénibilité perçue d'un trajet.

2.2.3 Correspondances

Les correspondances constituent l'un des facteurs les plus pénalisants dans le choix d'un trajet en transport en commun. Elles introduisent non seulement une augmentation du temps de déplacement, mais aussi une charge physique et cognitive supplémentaire (Chowdhury, 2019; Grisé & El-Geneidy, 2019). Effectuer une correspondance exige souvent de marcher dans des stations bondées où les gens peuvent être pressés, de monter ou descendre des escaliers, d'attendre à nouveau et de s'orienter dans un environnement parfois inconnu ou mal signalé. Ce processus peut générer du stress, particulièrement chez les usagers moins familiers avec le réseau, les personnes âgées ou les personnes à mobilité réduite. Le stress cognitif est encore plus élevé lorsque la correspondance implique un changement de mode (par exemple, passer du bus au métro) ou lorsque la fréquence de la ligne de correspondance est faible, augmentant ainsi l'incertitude liée au temps d'attente (Cascajo et al., 2019; Espino & Román, 2020; Garcia-Martinez et al., 2018). Une des principales craintes associées aux correspondances est la peur de rater la liaison, surtout dans les réseaux peu cadencés. Ce risque perçu peut dissuader les usagers d'opter pour certains itinéraires, même si ceux-ci sont plus rapides en théorie. Il est donc essentiel de prendre en compte la fréquence et la fiabilité des correspondances dans l'évaluation de leur impact.

La littérature montre une grande variabilité des coefficients associés aux correspondances, reflétant la forte importance contextuelle. En raison du risque lié à manquer la correspondance et que le trajet dure plus longtemps que prévu, chaque correspondance peut engendrer une pénalité comprise entre 12 et 17 minutes (Kittelson & Associates, Inc. et al., 2013). Selon Raveau et al. (2011), la valeur de pénalités liées aux correspondances est de 3,8 minutes (Raveau et al., 2011). Selon Vrtic et Axhausen (2003), cette valeur est de 18,9 minutes (Vrtic & Axhausen, 2003). Bovy et Hoogendoorn-Lanser (2005) différencient les correspondances à fréquence élevée (intervalle de moins de 7 minutes) à celles à fréquence faible (intervalle supérieur à 7 minutes). Pour les correspondances à fréquence élevée, la pénalité est de 5,1 minutes, tandis que pour les correspondances à fréquence faible, cette pénalité est de 11,4 minutes (Bovy & Hoogendoorn-Lanser, 2005). Tel que cité par Outwater et al. (2014), la valeur du temps perçu pour une correspondance se situe dans une plage de 5 à 15 minutes (Horowitz & Zlosel, 1981). Une étude

menée à Séoul indique que les pénalités de correspondance vont de 1,6 à 13,55 minutes (Yoo, 2015).

D'autres recherches confirment que les correspondances ajoutent une pénalité au temps perçu. Par exemple, en Australie, le temps perçu lié aux correspondances est fixé à 6,7 minutes par correspondance en heure de pointe. Cette pénalité est 30 % plus élevée en dehors des heures de pointe, ce qui reflète un stress accru en période de moindre fiabilité du service (Litman, 2023). De façon plus générale, comme cité par Litman (2023) une plage de 5 à 15 minutes de temps perçu est accordée à la pénalité de correspondance selon le contexte (Evans et al., 2004).

Des études de cas plus spécifiques illustrent également cette variabilité. Comme cité par Espino et Román (2020), à Édimbourg, une correspondance est perçue comme équivalente à 4,5 minutes de temps en véhicule supplémentaire pour les usagers du bus, contre 8 minutes pour les usagers du train à Glasgow (Wardman et al., 2001). À Londres, les valeurs observées sont de 5,4 minutes pour la base de données de 1980, et 3,7 minutes pour celle de 1990 (Wardman & Hine, 2000). Enfin, à Madrid, la pénalité perçue pour une correspondance est de 15,2 minutes et, lorsqu'il y a deux correspondances, cette pénalité grimpe à 17,7 minutes par correspondance (Garcia-Martinez et al., 2018).

Ainsi, bien que la correspondance soit une composante incontournable dans les réseaux de transport intégrés, son coût perçu élevé en fait un des éléments les plus critiques à prendre en compte dans la planification et la modélisation du choix de trajet.

2.2.4 Temps d'attente

Que ce soit au début du trajet, en attendant l'arrivée du premier véhicule, ou lors d'une correspondance, l'attente est perçue comme un moment d'inactivité, souvent associé à une impression de perte de temps, d'incertitude ou d'insécurité. Contrairement au temps en mouvement, qui peut parfois être perçu comme utile ou productif, le temps d'attente est souvent jugé plus désagréable et inutile, particulièrement lorsqu'il se déroule dans des environnements peu confortables, sans information en temps réel ou sans possibilité de s'abriter (Garcia-Martinez et al., 2018; González et al., 2025; Meng et al., 2018). Une étude portant sur les facteurs qui impactent la performance du TC durant la pandémie de COVID-19 explique qu'une augmentation d'une

minute de temps d'attente contribuerait à une diminution de 0,34 % du nombre d'utilisateurs de TC (Nikolaidou et al., 2023).

Les études empiriques montrent que le temps d'attente est systématiquement perçu comme plus coûteux que le temps en véhicule et que les coefficients qui lui sont attribués dans les modèles de coût généralisé varient fortement en fonction du contexte, de la durée de l'attente et de la qualité de l'expérience vécue pendant cette attente. Par exemple, un modèle estimé donne une valeur de 1,413 pour le coefficient du temps d'attente, ce qui signifie que chaque minute d'attente est perçue comme 1,413 minutes de temps en véhicule (Outwater et al., 2014). Une étude française fixe ce coefficient à 1,5 (Roquigny, 2013). Les moyennes observées varient également selon les contextes géographiques. Aux États-Unis, le coefficient moyen du temps d'attente est de 2,1, avec une plage allant de 0,8 à 5,1, tandis qu'au Royaume-Uni, la moyenne se situe autour de 1,8 (Kittelson & Associates, Inc. et al., 2013). En Slovénie, dans la ville de Maribor, les utilisateurs du bus percevraient le temps d'attente comme étant 35 % plus long qu'il ne l'est réellement (Čelan et al., 2017). Ces variations peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs tels que le niveau d'information en temps réel disponible, la fréquence du service, la sécurité perçue à l'arrêt, la possibilité de s'asseoir ou encore la météo (Espino & Román, 2020; González et al., 2025). Selon Litman, le temps d'attente impose un coût 2 à 5 fois plus grand que le temps en véhicule (Litman, 2023). Selon Tomhave et Khani (2022), 1 minute de temps d'attente serait perçue comme 2,65 minutes de temps en véhicule (Tomhave & Khani, 2022).

Le Tableau 2.1 présente les coefficients associés au temps d'attente en fonction de la densité de passagers par mètre carré à une station de transport en commun. Pour une densité modérée, comprise entre 0,2 et 0,5 passager par mètre carré, le coefficient est de 1, ce qui signifie que dans ces conditions, le temps d'attente est perçu de manière neutre, c'est-à-dire équivalente au temps en véhicule. Cependant, on observe que pour des densités inférieures à 0,2, les coefficients augmentent. Cette hausse peut s'expliquer par une incertitude plus grande liée à l'environnement. En l'absence d'autres utilisateurs, certaines personnes peuvent ressentir un stress accru, se demandant si elles sont bien au bon endroit ou si le véhicule est déjà passé, ce qui peut affecter négativement leur perception du temps. À l'inverse, pour des densités supérieures à 0,5 passager par mètre carré, les coefficients augmentent également. Cette hausse reflète probablement le désagrément associé à un achalandage élevé comme l'inconfort physique, le bruit, la difficulté à se déplacer ou le

sentiment d'insécurité peuvent tous contribuer à une pénibilité accrue de l'attente dans un environnement surchargé.

Tableau 2.1 : Coefficient lié au temps d'attente selon la densité de passagers en station (Douglas, 2008)

Densité (piéton/m ²)	Coefficient d'attente
0,0	1,30
0,1	1,15
0,2	1,00
0,5	1,00
0,7	1,02
0,9	1,09
1,0	1,14
1,2	1,27
1,5	1,55
1,7	1,79
1,9	2,08
2,0	2,10
2,5	3,20
2,7	3,66
3,0	4,44
3,3	5,31
3,5	5,95

Enfin, plusieurs recherches soulignent que le contexte de l'attente influence fortement sa perception (Čelan et al., 2017; Espino & Román, 2020; Garcia-Martinez et al., 2018; González et al., 2025; Meng et al., 2018). Le temps d'attente initial, en début de trajet, tend à être mieux anticipé (les usagers planifient leur départ en fonction des horaires), tandis que l'attente lors des correspondances est souvent vécue comme plus stressante, en raison du risque de manquer la correspondance suivante. De plus, l'usage que l'on peut faire de ce temps influence également sa pénibilité perçue. Attendre dans un espace agréable avec des informations en temps réel, réduit la perception négative du temps d'attente. Ainsi, bien que le temps d'attente soit une fraction relativement courte du temps total de déplacement, son poids psychologique et son impact sur le choix de trajet sont majeurs.

2.2.5 Temps d'accès, de sortie et de marche aux correspondances

Le temps d'accès correspond à la durée nécessaire pour se rendre depuis le point d'origine jusqu'à la première station de transport collectif, tandis que le temps de sortie (ou *egress*) représente le déplacement effectué depuis la dernière station jusqu'à la destination. Le temps de marche aux correspondances représente le temps qu'il faut pour marcher durant une correspondance, pour se rendre de la première ligne de TC à la deuxième et ainsi de suite.

Ce temps de marche, indispensable au bon fonctionnement du système de transport, représente souvent une pénibilité importante pour les usagers. D'une part, il exige un effort physique non négligeable, ce qui peut être particulièrement contraignant pour les personnes âgées ou les personnes à mobilité réduite (Sugovic & Witt, 2013). D'autre part, contrairement au temps passé à bord d'un véhicule, ce temps ne peut généralement pas être utilisé de manière productive. De plus, l'anxiété liée à la contrainte horaire, par exemple, devoir arriver à l'heure au travail ou ne pas manquer une correspondance renforce la perception négative de cette partie du trajet.

En conséquence, les modèles de coût généralisé attribuent généralement au temps d'accès et de sortie un coefficient de pénibilité plus élevé que celui du temps en véhicule. Le rapport TCRP indique un coefficient de 1,491 (Outwater et al., 2014). Ce coefficient peut aussi avoir la valeur de 2 (Roquigny, 2013). Une source présente même une plage de valeurs comprises entre 2 et 5 fois le temps en véhicule (Litman, 2023). Aux États-Unis, la moyenne observée est de 2,2, avec des valeurs allant de 0,8 à 4,4, tandis qu'au Royaume-Uni, la moyenne est de 1,7 (Kittelson & Associates, Inc. et al., 2013). Dans une étude par Tomhave et Khani (2022), le temps d'accès a un coefficient de temps équivalent en temps en véhicule de 1,65 et un coefficient de temps de sortie de 2,77 (Tomhave & Khani, 2022).

La marche lors d'une correspondance constitue également une composante significative de la pénibilité perçue. Cette perception dépend en grande partie de la densité d'usagers à la station. Lorsque la densité est faible, la marche s'effectue sans problème. En revanche, lorsque la densité augmente, le confort de déplacement diminue, la vitesse de marche ralentit, les usagers doivent éviter les piétons et le stress s'intensifie, notamment lorsqu'il faut se rendre rapidement d'un point à un autre.

Le Tableau 2.2 démontre le coût relié au temps de marche en station à divers niveaux d'achalandage.

Tableau 2.2 : Coût lié à la marche en station à divers niveaux de densité de piéton (Douglas, 2008)

Densité k (piéton/m ²)	Coefficient de marche en correspondance
[0 ; 0,31[	1,00
[0,31 ; 0,43[	1,06
[0,43 ; 0,71[	1,17
[0,71 ; 1,08[	1,20
[1,08 ; 2,13[	2,34
2,13 et plus	10,14

Enfin, la disposition des stations joue un rôle non négligeable dans la perception de ce temps. Les correspondances multiplateformes, qui s'effectuent sur un même niveau, sont généralement perçues comme plus faciles et moins pénibles que les correspondances nécessitant de monter ou descendre des escaliers, en particulier lorsque les correspondances sont mal indiquées ou exigent de longs déplacements (Douglas & Jones, 2013; Grisé & El-Geneidy, 2019; Raveau et al., 2011). Ces éléments d'infrastructure influencent donc directement la satisfaction des usagers et doivent être pris en compte dans l'évaluation de la performance et de l'attractivité du réseau.

Le Tableau 2.3 présente les coefficients associés au temps de marche en correspondance en fonction de la densité de passagers par mètre carré à une station de transport en commun. Pour une densité comprise entre 0,0 et 1,2 passager par mètre carré, le coefficient est de 1,5, ce qui signifie que, dans ces conditions, le temps de marche vaut 1,5 fois le temps en véhicule. Toutefois, on observe que pour des densités inférieures à 1,2, les coefficients augmentent. En situation d'achalandage très élevé, le coefficient lié au temps de marche en correspondance peut atteindre 6,85.

Tableau 2.3: Coefficient lié au temps de marche en correspondance selon la densité de passagers en station (Douglas, 2008)

Densité (piéton/m ²)	Coefficient de marche en correspondance
0,0	1,50
0,1	1,50
0,2	1,50
0,5	1,50
0,7	1,50
0,9	1,50
1,0	1,50
1,2	1,50
1,5	1,65
1,7	1,94
1,9	2,27
2,0	2,30
2,5	3,60
2,7	4,15
3,0	5,06
3,3	6,10
3,5	6,85

2.2.6 Distorsion géométrique

La distorsion géométrique désigne l'écart entre le trajet à vol d'oiseau et le trajet réellement effectué par un usager en transport collectif. Elle se manifeste notamment dans les détours et parcours sinueux que doivent souvent emprunter les lignes d'autobus. Une distorsion géométrique élevée reflète des trajets qui s'éloignent considérablement du parcours optimal, entraînant plus de temps de déplacement, plus de correspondances, ou une distance cumulée plus importante. Ces détours peuvent se traduire par une pénalisation temporelle et cognitive pour les usagers (C.-N. Wang et al., 2020). En effet, des détours cognitifs, comme les changements de direction ou une géométrie de réseau complexe, augmentent la perception du temps chez les usagers (Parthasarathi et al., 2013).

Les détours imposés par la configuration du réseau sont souvent vécus comme une source de frustration par les usagers. En effet, ils allongent à la fois la distance parcourue et le temps de

déplacement. La comparaison entre la distance à vol d'oiseau et la distance réellement parcourue met en évidence cette distorsion qui peut être perçue comme une perte de temps ou d'efficacité.

La distorsion géométrique peut être mesurée en temps ou en distance et elle a un impact direct sur la perception de la qualité du service. Un concept pertinent pour quantifier cet écart est le coût angulaire, qui exprime le coût relatif associé à la déviation d'un trajet par rapport au trajet direct (Raveau et al., 2011). Plus un itinéraire effectue de détours ou de changements de direction, plus son coût angulaire est élevé. Ce concept permet de formaliser le caractère pénalisant des trajets indirects dans les modèles de choix de trajet. Les études montrent que les usagers du transport collectif valorisent fortement la linéarité d'un trajet. Une étude souligne que, pour deux trajets de même durée, les usagers ont tendance à privilégier celui qui est le plus direct, même si l'autre inclut un détour compensé par une vitesse plus élevée (Raveau et al., 2011). Cela confirme que l'alignement spatial perçu vers la destination est un facteur important dans la satisfaction et le choix d'itinéraire. Par conséquent, la réduction de la distorsion géométrique constitue un aspect important pour améliorer l'attractivité du TC.

2.2.7 Utilisation du temps à bord du véhicule

Le temps consacré à un déplacement a longtemps été perçu, dans les approches traditionnelles en économie des transports, comme une désutilité à minimiser. Cependant, cette vision s'est progressivement nuancée avec la reconnaissance du fait que, dans un véhicule de transport collectif, les passagers sont libérés de la tâche de conduite et peuvent donc consacrer ce temps à diverses activités. Le temps passé en déplacement ne représente alors plus nécessairement un temps perdu mais peut être mobilisé à des fins utiles, productives ou récréatives. Pour plusieurs usagers, ce moment devient une occasion précieuse de lire, de travailler, d'étudier ou même de se détendre (Garcia-Martinez et al., 2018; Roquigny, 2013).

Cette capacité à s'engager dans des activités personnelles ou professionnelles à bord du transport collectif contribue à atténuer la perception négative du temps de déplacement (Roquigny, 2013). À l'inverse, en voiture, le conducteur doit être constamment vigilant de son environnement, ce qui limite fortement les possibilités d'utilisation du temps de déplacement. De plus, les transports collectifs peuvent être perçus comme une option moins stressante que la voiture. Une étude menée en Angleterre par David Lewis (2010, cité par Litman, 2023), est fondée sur des mesures

biophysiques telles que le rythme cardiaque, a démontré que les trajets en transport collectif sont en moyenne un tiers moins stressants que ceux effectués en voiture pour un même itinéraire.

Comme cité par Poirier (2021), pour les déplacements plus longs, les usagers préfèrent des alternatives plus confortables, ce qui peut s'expliquer par la possibilité d'utiliser le temps à bord pour d'autres activités (Grisson et al., 2017). La littérature récente explore également les multiples fonctions du déplacement au-delà de sa seule finalité de mobilité. Selon une étude (Cornet et al., 2022), les trajets peuvent servir à plusieurs objectifs comme effectuer une transition mentale entre deux lieux, faire du multitâche, disposer d'un temps libre ou neutre, ou encore, dans une perspective plus large, contribuer au développement personnel et au bien-être. Une autre étude distingue deux types de valeur associée au temps de déplacement (Jain & Lyons, 2008). D'une part, le temps de transition, qui permet à l'individu de se préparer mentalement à son activité suivante ou de se détendre après une journée. D'autre part, le temps mort, vécu non pas comme une perte de temps, mais comme un moment de pause volontaire, propice à la récupération, à l'introspection ou à de petites activités non productives mais bénéfiques.

Ainsi, la valorisation du temps passé à bord des transports collectifs remet en question la conception que le temps de déplacement est une contrainte à minimiser. Elle permet une compréhension plus nuancée de l'expérience de mobilité vécue par tous types de voyageurs.

2.2.8 Achalandage du véhicule

Le niveau d'achalandage à bord des véhicules de transport collectif influence fortement la qualité perçue du trajet (Yap et al., 2023). Il est évident qu'un bus peu occupé est généralement perçu comme plus confortable et agréable qu'un bus bondé. La possibilité de s'asseoir, de disposer d'un espace personnel adéquat et de bénéficier d'un environnement calme contribue significativement au bien-être des passagers (Frappier, 2015; Gauthier, 2020). À l'inverse, dans un véhicule bondé, les usagers doivent souvent rester debout, parfois dans des positions inconfortables, ce qui limite considérablement la possibilité de lire, de se reposer ou d'utiliser le temps de déplacement de manière productive (Roquigny, 2013; Yap et al., 2023).

Ce manque de confort physique est particulièrement problématique pour certaines catégories de population, notamment les personnes âgées, les personnes à mobilité réduite, les femmes enceintes ou les passagers accompagnés d'enfants. Pour ces usagers, l'impossibilité de s'asseoir ou la densité excessive à bord peut devenir un facteur qui impacte le choix d'un trajet. Rester debout dans un

espace serré exige un effort physique considérable, accentué par les mouvements brusques du véhicule et la nécessité de maintenir l'équilibre. De plus, les environnements bruyants et surchargés demandent une attention constante et peuvent générer un certain stress cognitif, ce qui affecte négativement l'expérience globale du déplacement (Gauthier, 2020). La pandémie de COVID-19 a fortement impacté la perception de l'achalandage à bord. Avant la pandémie, la valorisation du temps en véhicule augmente de 0,22 pour chaque augmentation du nombre moyen de passagers debout par mètre carré une fois que la charge de passagers à bord du métro atteint la capacité assise. Après la pandémie, ce nombre devient 0,42 (Yap et al., 2023).

Le Tableau 2.4 démontre que le coefficient lié au taux d'occupation d'un véhicule peut varier beaucoup si l'utilisateur est assis ou debout.

Tableau 2.4: Coefficient lié au taux d'occupation d'un véhicule de TC (J. Liu et al., 2021)

Taux d'occupation (%)	Assis	Debout
0 à 75	0,86	-
75 à 100	0,95	-
100 à 125	1,05	1,62
125 à 150	1,16	1,79
150 à 175	1,27	1,99
175 à 200	1,40	2,2
+ de 200	1,55	2,44

Le Tableau 2.5 montre des coefficients liés à l'achalandage d'un véhicule, le tout provenant d'une autre source.

Tableau 2.5: Coefficient lié au taux d'occupation d'un véhicule de TC (Douglas & Karpouzis, 2006)

Taux d'occupation	Coefficient
80 %	1,00
100 %	1,10
160 %	1,60
200 %	1,74

Un achalandage élevé peut également induire un stress pour les usagers embarquant à des arrêts en milieu de parcours, surtout lorsque le véhicule approche de sa capacité maximale. L'incertitude quant à la possibilité de trouver une place assise, combinée à la proximité physique entre les voyageurs, peut accroître l'anxiété et la pénibilité perçue du trajet (Frappier, 2015; Roquigny, 2013). Ce facteur psychologique influence directement la satisfaction des usagers et peut affecter leurs choix futurs en matière de mobilité.

Au-delà du confort et du stress individuel, une forte densité de passagers a également des effets opérationnels négatifs. L'embarquement et le débarquement deviennent plus lents à cause de la difficulté à circuler à bord du véhicule, ce qui prolonge les arrêts et engendre des retards cumulés. Une demande élevée à chaque arrêt implique davantage de passagers à faire monter ou descendre, ce qui perturbe l'horaire planifié et peut générer une insatisfaction supplémentaire chez les usagers (Buchunde et al., 2024; Gauthier, 2020). Ainsi, l'achalandage constitue une variable centrale dans la perception de la qualité de service.

2.2.9 Fiabilité du service

La fiabilité du service en transport collectif correspond à la capacité des véhicules à respecter les horaires de passages prévus aux arrêts. Elle constitue un facteur central dans la perception de la qualité du service, en particulier pour les trajets quotidiens comme les déplacements domicile-travail. En théorie, la fiabilité est évaluée par le taux de retard, mesuré à partir des écarts entre l'horaire planifié et l'horaire réel de passage (Klinkhardt et al., 2025). Le retard moyen est calculé en multipliant la proportion de véhicules en retard pour une ligne par la moyenne de leur retard respectif. Plus le retard moyen est bas, plus on peut dire que la ligne est fiable.

Cette approche théorique permet de donner un score de performance au service, mais elle doit être complétée par des données sur la perception usager. En effet, l'impact sur la pénibilité est souvent plus important que ce que les indicateurs théoriques peuvent laisser entendre. Dans une étude menée en Allemagne basée sur les préférences déclarées, le retard moyen pour les transports en commun est évalué environ 3,7 fois plus négativement que le temps de trajet en véhicule (Klinkhardt et al., 2025). Dans une étude par Frohlich (2014, cité par Klinkhardt, 2025) sur les préférences déclarées en Suisse, des ratios de 1,5 à 3 ont été identifiés dépendamment du motif et de la longueur du trajet.

Une étude menée auprès d’usagers du train a permis d’attribuer des coefficients de pénalité équivalents en temps en véhicule pour différents niveaux de fiabilité (Douglas, 2008). Ces coefficients traduisent la manière dont les retards sont perçus.

Le Tableau 2.6 assigne des coefficients pour la fiabilité de divers types de services pour divers niveaux de retard.

Tableau 2.6 : Coefficient lié à la fiabilité selon le retard moyen (Douglas, 2008)

Fiabilité	Retard moyen (minute)	Service hors pointe	Service en pointe	Service rapide et navette d’aéroport
Excellent	[0 ; 0,5[	2,0	2,9	4,1
Bien	[0,5 ; 1[	2,2	3,3	4,5
Moyen	[1 ; 2 [	2,5	3,7	5,2
Mauvais	[2 ; 6[	2,8	4,1	6,4
Très mauvais	6 et plus	3,3	5,0	8,7

Les résultats montrent que les usagers valorisent fortement la ponctualité. Ainsi, une amélioration de la fiabilité du service peut être perçue comme équivalente à une réduction du temps de parcours en véhicule de 4,59 minutes à Charlotte (États-Unis) et de 5,64 minutes à Chicago (États-Unis), pour des trajets domicile-travail (Outwater et al., 2014). Par ailleurs, les retards inattendus, qui ne peuvent pas être anticipés par l’usager, ont un impact particulièrement négatif sur l’expérience de déplacement. Ces retards augmentent les coûts perçus du temps en véhicule de 3,7 à 5 fois par rapport au coût lorsque le service est ponctuel (Litman, 2023).

Ces résultats confirment que la fiabilité du service n’est pas seulement une exigence opérationnelle mais aussi une attente des usagers, qui influence directement leur niveau de satisfaction, leur stress quotidien et leur fidélité au transport collectif.

2.2.10 Aménagement aux arrêts et à bord du véhicule

Le confort lors d’un déplacement inclut évidemment le temps passé à bord mais aussi le temps passé aux arrêts de TC. Un arrêt bien aménagé peut faire une grande différence dans le temps perçu d’attente. En effet, un arrêt mené d’un toit obtient un bénéfice de 1,1 minute en équivalent de temps en véhicule. Un arrêt muni d’éclairage donne un bénéfice de 0,7 minute tandis qu’un arrêt avec des

bancs donne un bénéfice de 0,2 minute en temps en véhicule (Dowling et al., 2008). La proximité à des commerces, la propreté et la sécurité sont aussi des aspects importants de l'aménagement.

Une étude expérimentale utilise le suivi oculaire pour analyser les schémas d'attention visuelle dans des configurations de cabines de transport collectif, à divers niveaux d'entretien. Les résultats montrent que les designs enrichis, notamment ceux intégrant des éléments naturels ou des aménagements fonctionnels, suggèrent une meilleure orientation visuelle et une charge cognitive réduite. Ceci peut créer une expérience plus fluide et moins stressante pour les passagers (Hakiminejad et al., 2025). Une autre étude a mis en évidence que les arrêts et stations dépourvus d'aménagements basiques comme des bancs ou des abris font que les usagers perçoivent leur temps comme au moins 1,3 fois plus long que la réalité (Fan & Levinson, 2016).

Une étude menée par Neil Douglas en Nouvelle-Zélande s'est intéressée à la valeur que les usagers du transport collectif attribuent à différents aspects de leur expérience de voyage (Douglas, 2008). À travers une enquête, les répondants ont été invités à exprimer leur disposition à accepter une augmentation du temps de déplacement ou du prix du billet en échange d'améliorations spécifiques des conditions de voyage. Cette approche permet de quantifier la valeur perçue de divers aménagements en les exprimant en temps équivalent en véhicule ou en augmentation tarifaire.

Les résultats révèlent que les usagers sont sensibles à plusieurs aspects du confort et de l'environnement à bord. Par exemple, pour une amélioration de 10 % de la propreté des lieux, les participants accepteraient un allongement du temps de trajet de 16 secondes ou une augmentation du tarif de 1,5 %. Pour une amélioration de la qualité des annonces sonores à bord, les répondants accepteraient 10 secondes supplémentaires de déplacement ou une hausse tarifaire de 0,9 % (Douglas, 2008).

Les systèmes de chauffage et de climatisation sont également valorisés, les usagers déclarent être prêts à tolérer 9 secondes supplémentaires de déplacement ou à payer 0,8 % de plus pour une amélioration de 10 %. Une amélioration de l'éclairage de 10 % entraînerait une acceptabilité de 8 secondes de plus ou 0,7 % d'augmentation du prix du billet. Enfin, le confort des sièges, bien qu'important, est légèrement moins valorisé dans cette étude, avec un compromis acceptable de 4 secondes ou une hausse de 0,4 % du tarif (Douglas, 2008).

Ces résultats mettent en lumière l'importance des aménagements à bord dans la perception de la qualité du service. Ces améliorations influencent de manière significative la satisfaction des usagers, de manière qu'ils soient disposés à accepter des compromis mesurables.

2.2.11 Accessibilité à bord des véhicules et en station

De nombreuses personnes dépendent du transport collectif pour effectuer leurs déplacements quotidiens. Toutefois, l'accès au réseau peut s'accompagner de divers obstacles, tant physiques qu'organisationnels. L'accessibilité demeure ainsi un enjeu central pour de nombreux usagers, en particulier les personnes âgées, les personnes vivant avec un handicap ou d'autres formes de vulnérabilité. Ces populations expriment fréquemment un sentiment d'anxiété lié à l'utilisation du transport en commun, souvent en lien avec des difficultés d'accès ou un manque d'accommodation de l'environnement (L. Liu et al., 2023; Vega et al., 2025).

L'accessibilité physique est particulièrement importante lors des phases d'accès et de sortie du réseau. Les personnes vulnérables se déplacent généralement à des vitesses plus lentes et sont fortement influencées par la qualité des aménagements piétonniers, comme la présence de trottoirs continus, sécuritaires et bien entretenus. Ces conditions peuvent créer des disparités importantes dans l'accès aux transports en commun et limiter l'utilisation du service par certains groupes (L. Liu et al., 2023).

Dans le réseau de transport, les infrastructures peuvent aussi poser des défis. La configuration des véhicules doit garantir un espace suffisant pour le mouvement des fauteuils roulants ou d'autres aides à la mobilité, ce qui peut être difficile s'il y a un grand achalandage. La présence d'infrastructures accessibles à tous et en bon état permettra de diminuer le stress associé à l'utilisation des TC (Negm et al., 2025; Vega et al., 2025).

Dans les stations, la présence et le bon fonctionnement d'ascenseurs, d'escaliers roulants ou de dispositifs d'assistance peuvent rendre le déplacement beaucoup plus agréable. Ces éléments ont un impact direct sur l'expérience du trajet et ont un impact direct sur la pénibilité perçue (Negm et al., 2025). À New York, par exemple, la présence d'escaliers roulants dans les stations a un effet mesurable sur la perception du temps de déplacement, elle réduirait le temps perçu à bord du

véhicule de 4 minutes (Outwater et al., 2014). Ce type d'aménagement illustre bien comment une meilleure accessibilité physique peut favoriser l'équité d'accès.

2.2.12 Caractéristiques propres aux usagers

Il est bien établi que la perception du temps ne dépend pas uniquement des caractéristiques du trajet mais varie également selon les profils des usagers. Des facteurs sociodémographiques, professionnels et personnels peuvent influencer significativement la manière dont un trajet est perçu.

Il est bien établi que les populations à faible revenu sont plus dépendantes du transport en commun en raison d'une plus faible possession de voiture. Cette population combine plus souvent plusieurs modes par des correspondances plus fréquentes et utilise moins souvent le train de banlieue et les installations de stationnements incitatifs que les populations plus aisées (Lachapelle & Boisjoly, 2023). Ils voyagent souvent pendant les heures creuses où le service est réduit, plutôt que durant les heures de pointe. Des différences importantes subsistent entre les hommes et les femmes en termes de temps et de distances de déplacement. La présence d'enfants, bien qu'augmentant le temps d'accès et la complexité des correspondances, réduit le temps d'attente, le temps de trajet global et la proportion de temps hors véhicule. Pour ce qui est de la localisation du ménage, les usagers dont le trajet provient des banlieues proches et éloignées ont des temps d'attente et des parts de temps hors véhicule plus élevés et des vitesses de trajet réduites, ce qui peut allonger le temps perçu du voyage en raison de la moindre efficacité (Lachapelle & Boisjoly, 2023).

Selon une étude, le statut de l'utilisateur joue un rôle notable dans la perception du temps de marche. Une personne employée tend à le percevoir comme plus long qu'une personne sans emploi (Meng et al., 2018). Cela pourrait s'expliquer par la pression temporelle associée aux horaires fixes ou au stress de la journée à venir. De manière similaire, le motif du déplacement influence également la perception du trajet. Les déplacements contraints, comme ceux effectués pour le travail ou les études, sont généralement perçus comme plus longs et plus pénibles. À l'inverse, les déplacements effectués pour des motifs récréatifs, tels que les loisirs ou le magasinage, sont souvent perçus comme moins contraignants, et donc plus courts, même lorsque leur durée réelle est équivalente (Meng et al., 2018).

L'âge de l'utilisateur est aussi un facteur déterminant. Les personnes âgées tendent à percevoir le temps d'attente comme étant plus long que les jeunes adultes, possiblement en raison d'un plus grand inconfort physique ou d'un sentiment de vulnérabilité. En ce qui concerne les correspondances, elles sont également perçues plus négativement par les personnes âgées, notamment à cause de la fatigue, de la complexité des déplacements dans les stations ou de limitations physiques (Cascajo et al., 2019).

Le sexe de l'utilisateur influence aussi la perception de certaines étapes du trajet. Effectivement, les femmes donnent une pénalité plus élevée au temps de marche que les hommes (Garcia-Martinez et al., 2018). Paradoxalement, les femmes appliqueraient une pénalité moindre aux correspondances et seraient donc plus enclines à en effectuer (Chowdhury, 2019). Cependant, les hommes indiqueraient des taux de satisfaction plus élevés quant au temps d'attente des bus. En effet, une étude effectuée à Istanbul énonce que les hommes ont indiqué un taux de satisfaction de 74,9 %, tandis que pour les femmes ce taux s'élève à 65,9 % (Genç et al., 2023).

Chez les enfants, la perception du temps suit encore une autre dynamique. Le temps total de déplacement est souvent perçu comme plus court pour eux que pour les adultes, peut-être en raison d'un rapport différent au temps ou d'une capacité à se distraire plus facilement. Cependant, l'inconfort, notamment lors de l'attente dans de mauvaises conditions, peut être bien plus marqué. Le temps d'attente perçu par un enfant dans un environnement inconfortable peut valoir l'équivalent de 175 % du temps en véhicule (Litman, 2023).

Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte la diversité des profils usagers dans l'estimation du temps perçu et dans la modélisation du choix de trajet. Une approche différenciée permet de mieux comprendre les comportements de mobilité pour l'ensemble de la population.

2.2.13 Autres facteurs

Un trajet de transport en commun peut être perçu de manière différente par chaque type de personne. En effet, chaque personne a des préférences propres à elle et une infinité de facteurs peuvent engendrer des effets différents chez chaque personne. La littérature scientifique nomme une multitude d'aspects en lien avec le transport en commun qui pourrait avoir un effet sur la pénibilité perçue. Le niveau sonore, le design des véhicules et des stations, la qualité des indications

pour se déplacer dans les stations, la fréquence de la ligne, la sécurité en station, la disponibilité de diverses options de paiement, la présence d'information en temps réel, la présence de wifi dans les véhicules et stations, la géographie de la région, sont des facteurs parmi tant d'autres qui peuvent avoir un impact sur la pénibilité perçue en TC.

2.3 Équations de coût généralisé

Les équations de coût généralisé permettent d'attribuer une valeur quantitative à la perception du temps. Ainsi, le temps perçu peut être estimé et comparé au temps réel d'un trajet. Les équations de coût généralisé linéaires prennent généralement la forme suivante (Brands et al., 2014):

$$\text{Temps perçu} = \beta_1 T_1 + \beta_2 T_2 + \beta_3 T_3 + \beta_4 N_{\text{correspondance}} + \dots \quad (2.1)$$

Ces équations permettent de pondérer différemment les composantes d'un trajet en modifiant les coefficients β qui les précèdent. Dans le cadre de ce projet, l'équation de coût généralisé utilisée aura pour objectif d'estimer le temps perçu des différentes alternatives de trajets en transport collectif. Ce temps perçu est exprimé en équivalent de temps en véhicule, ce dernier étant utilisé comme référence dans la littérature scientifique (Douglas, 2008; Frappier, 2015; Kittelson & Associates, Inc. et al., 2013; Litman, 2023; Outwater et al., 2014). Les coefficients permettront donc de convertir diverses composantes du trajet en unités de temps en véhicule. Les équations de coût généralisé font la somme de plusieurs types de temps généralisés du réseau (sur les tronçons, les nœuds et les connecteurs) (PTV Group, 2022).

Dans le cadre du présent projet, l'équation de coût généralisé inclura notamment le nombre de correspondances, puisque cette variable est reconnue comme particulièrement importante. Toutefois, la sélection finale des autres variables reste à déterminer. La revue de littérature a permis d'identifier des coefficients pertinents pour divers facteurs, tandis que l'analyse par arbres de décision aidera à choisir les variables les plus adaptées à la base de données utilisée.

Il existe plusieurs méthodes afin de créer les équations de coût généralisé en faisant des combinaisons des coefficients. La méthode Taguchi est utilisée pour choisir les combinaisons de coefficients adéquates (Hasan, 2021). Cette méthode sera développée dans le CHAPITRE 3.

2.4 Modèles de choix d'itinéraire

Les équations de coût généralisé, qui permettent de calculer l'utilité d'un trajet, sont liées au choix d'itinéraire en TC et peuvent se baser sur plusieurs modèles. Un concept de base pour ces modèles

est le premier principe de Wardrop sur l'affectation d'équilibre, l'équilibre de l'utilisateur. L'équilibre de l'utilisateur énonce que les usagers visent à minimiser leur propre temps de trajet en choisissant leur itinéraire (Ahmad & Al-Fagih, 2024; Y. Liu et al., 2010). Il existe une multitude de modèles de choix d'itinéraire, quelques-uns sont présentés.

Le modèle d'équilibre stochastique de l'utilisateur (stochastic user equilibrium) inclut une composante aléatoire au temps du trajet attendu. Les usagers visent effectivement à minimiser leur temps perçu de trajet. Ils utilisent des fonctions de coût qui incluent le temps de déplacement et sa variabilité (Di & Liu, 2016). Ce modèle ne prend pas en compte le fait que certains usagers vont choisir des itinéraires différents à certains moments et choisir l'itinéraire le plus court à d'autres moments.

Les modèles basés sur la théorie des perspectives (prospect theory)(Lang, 2020) et l'utilité dépendante du rang (rank-dependent utility model)(Razo & Gao, 2013) modélisent les logiques liées au choix de trajet en prenant en compte la perception psychologique des coûts et des contraintes de rationalité. Ce modèle prend en compte le fait que les voyageurs puissent être plus sensibles aux pertes qu'aux gains et ne pas toujours choisir le chemin le plus court (Ahmad & Al-Fagih, 2024).

Le modèle de choix discret (random utility model) énonce que les individus choisissent l'alternative qui maximise leur utilité perçue (Ahmad & Al-Fagih, 2024). Les modèles Logit sont utilisés dans ce cadre. En effet, comme cité par Nazem (2014), les modèles Logit servent à modéliser le choix des individus en fonction de la maximisation de l'utilité (Hunt, 1990). La fonction d'utilité est souvent une combinaison linéaire des attributs. Une fonction de coût généralisé peut donc être utilisée dans ce modèle.

2.5 Plateforme Transition

Transition est une plateforme développée par la Chaire de Mobilité de Polytechnique Montréal (Chaire Mobilité, 2020). Elle permet d'importer les bases de données de l'offre de divers réseaux de transport ce qui permet, entre autres, de faire des simulations de transport. Des paires OD sont entrées dans le calculateur et celui-ci génère des trajets possibles pour ces paires OD. Les heures de départ déclarées dans l'Enquête OD sont aussi prises en compte dans le calculateur de chemin. Afin de régler les biais de l'enquête liés à la déclaration de l'heure de départ, une fenêtre temporelle de ± 20 minutes est mise en place dans les réglages du calculateur de chemin. Ainsi, une liste des

alternatives de trajets possibles est donc obtenue, comme présenté lors du congrès de TRB (Bourbonnais et al., 2019).

Dans le logiciel Transition, certains paramètres de base sont choisis afin de contrôler le nombre de trajets qui peuvent être modélisés. En effet, ces paramètres permettent d'avoir des alternatives qui sont réalistes et faisables. Le nombre d'alternatives générées se limite donc à un maximum de 50 (Poirier, 2021).

La plateforme Transition utilise une méthode particulière de simulation des alternatives, telle que présentée lors du Colloque annuel 2020 de la Chaire Mobilité (Bourbonnais, 2020). À partir d'une demande de déplacement (définie par une origine, une destination et une heure de départ), le calculateur génère un ensemble d'alternatives. Celles-ci sont filtrées à l'aide de contraintes, telles que la durée maximale, un nombre maximal de correspondances et un niveau minimal d'indépendance entre les alternatives. Chaque alternative est caractérisée par une série d'indicateurs détaillés, regroupés en catégories. Les indicateurs de chaque catégorie sont convertis en un score en pourcentage. Ces scores sont ensuite combinés en un score de qualité global pour chaque alternative, en appliquant des coefficients de pondération qui peuvent être ajustés pour refléter les préférences des voyageurs. Les alternatives sont ensuite classées en fonction de leur score de qualité (Chaire Mobilité, 2021).

L'itinéraire qui minimise l'heure d'arrivée pour une paire OD spécifique est généré. Ensuite, chaque ligne de TC de cette alternative est supprimée séquentiellement pour ensuite générer les alternatives suivantes jusqu'à ce qu'un des paramètres soit atteint (Poirier, 2021).

2.6 Algorithme TRACCLUS

L'algorithme TRCALUS, qui signifie "Trajectory Clustering", est une méthode de regroupement basé sur la densité de trajets (Bahbouh, 2016; Jeudy, 2019). Cet algorithme permet de créer des corridors à partir d'un ensemble de lignes de désir, soit des paires OD. Son fonctionnement se divise en deux étapes principales : le partitionnement et le regroupement (Bahbouh, 2016; Jeudy, 2019).

L'étape du partitionnement identifie les points où une trajectoire change d'orientation ou de vitesse pour la décomposer en petits segments.

L'étape du regroupement regroupe les segments similaires de différentes trajectoires pour former un corridor, à condition qu'un nombre minimal de segments soit présent. La similarité est mesurée par une équation complexe qui combine différentes distances (perpendiculaire, parallèle, angulaire) (Bahbouh, 2016).

Bien que TRACCLUS soit prometteur, son application directe dans les problèmes de transport présente des défis. En effet, l'algorithme ne gère pas directement les facteurs de pondération, ce qui est essentiel dans les enquêtes agrégées. TRACCLUS n'effectue pas de segmentation efficace sur des lignes droites comme les lignes de désir, car il est conçu pour des trajectoires plus complexes (Bahbouh, 2016; Jeudy, 2019).

Pour pallier les limites de TRCALUS, cet algorithme a évolué vers TRACCLUS-DL (Trajectory Clustering for Desire Lines). TRACCLUS-DL est la version adaptée qui sera utilisée dans ce projet.

L'objectif principal de TRACCLUS-DL est d'identifier les corridors de demande à partir de données Origine-Destination (OD) désagrégées, en se basant sur les lignes de désir (lignes directes entre l'origine et la destination).

Afin d'exécuter le logiciel TRACCLUS-DL, il existe quatre paramètres d'entrée (Bahbouh, 2016; Jeudy, 2019):

- Largeur d'influence représentant la demi-largeur du corridor
- Nombre minimal d'observations requis pour créer un corridor
- Angle maximal entre le corridor principal et les lignes de désir
- Longueur de segmentation du corridor

Il est aussi important d'avoir un fichier d'entrée pour analyser les trajets désirés. Ces fichiers d'entrée doivent contenir, pour chaque ligne, les informations suivantes :

- Identification unique pour chaque ligne de désir
- Poids de la ligne de désir ou un facteur de pondération
- Coordonnée x d'origine
- Coordonnée y d'origine
- Coordonnée x de destination
- Coordonnée y de destination

Ensuite, il est temps d'écrire la commande sur Python. Cette commande va permettre de créer des fichiers de résultat en format CSV contenant la liste des corridors et la liste des segments ou paires OD. Ces fichiers pourront ensuite être importés dans un logiciel afin de visualiser les segments et les corridors.

TRACCLUS-DL permet la visualisation et la synthèse des données OD en des axes de mobilité denses. L'algorithme permet aussi d'identifier les corridors de demande, d'effectuer un diagnostic de l'offre de transport et d'identifier la typologie des corridors de demande (Bahbouh, 2016; Jeudy, 2019).

2.7 Vitesse théorique

Le concept de vitesse théorique est utilisé pour évaluer la qualité absolue des trajets en TC (Poirier, 2021). La vitesse théorique est une valeur de référence objective basée sur la distance à vol d'oiseau entre l'origine et la destination d'un déplacement. Dans ce projet, la vitesse théorique sera calculée en divisant la distance du trajet à vol d'oiseau par le temps pris pour effectuer le déplacement.

La vitesse théorique permet d'évaluer la qualité d'un trajet en éliminant les détours liés à la géographie dans laquelle le trajet est effectué. En posant des seuils de vitesse, il est possible d'analyser la qualité des trajets. Selon Poirier (2021), l'évaluation de la vitesse théorique combinée à une analyse spatiale permet de mettre en évidence les disparités dans la distribution de la qualité et de la diversité des alternatives de transport en commun dans l'espace (Poirier, 2021). Cette méthode permet d'identifier les "déserts d'alternatives", c'est-à-dire les secteurs où les populations n'ont pas accès à un plan B de transport en commun de qualité suffisante. Le concept de trajet plan B est expliqué à la section suivante.

2.8 Impact de la présence de trajet plan B

Le choix d'un trajet peut être limité si, pour une paire OD, il y a soit un seul trajet possible, soit que les alternatives sont de qualité insuffisante pour être considérées dans le choix. Le trajet plan B fait référence à la disponibilité d'au moins une deuxième alternative de transport en commun de qualité acceptable pour un déplacement donné (Poirier, 2021). Cette situation force à choisir un trajet qui n'est pas nécessairement adéquat pour l'utilisateur. En effet, la présence d'au moins une 2^e alternative de transport en commun de qualité acceptable rend l'utilisateur moins vulnérable face à des imprévus ou incidents sur le réseau (Van Wee et al., 2019). Ce phénomène rejoint le concept de

"substituabilité" proposé par Van Wee et al. (2019). La substituabilité représente la mesure dans laquelle l'alternative de voyage préférée peut être remplacée par d'autres alternatives initialement moins préférées, dans l'éventualité de grèves ou de pannes de réseau (Van Wee et al., 2019). La substituabilité est considérée comme un concept prometteur pour la recherche sur le choix de trajet, pertinente à la fois du point de vue de l'accessibilité et de la "liberté de choix", un concept défini par l'opportunité d'un individu d'effectuer une action choisie parmi au moins deux trajets disponibles, sans contrainte externe (Van Wee et al., 2019).

2.9 Trajet à vol d'oiseau

Le trajet à vol d'oiseau, aussi nommé "distance euclidienne", représente le trajet sur la ligne droite entre l'origine et la destination (Buczowska et al., 2019). C'est un référentiel théorique créé. Dans ce projet, le concept de trajet à vol d'oiseau sert à évaluer la qualité absolue des trajets. Ce trajet à vol d'oiseau est comparé au trajet réel afin d'avoir une référence théorique pour analyser la qualité absolue.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

La section suivante introduit la méthodologie développée afin de calculer les indicateurs de pénibilité et de détour permettant de tirer des constats sur la qualité des trajets de TC. Les différentes étapes permettant de calculer les indicateurs sont présentées. La manipulation des données des enquêtes OD ainsi que des alternatives de Transition est aussi présentée.

3.1 Méthodologie générale

Le projet est organisé autour de grandes composantes : 1) état des connaissances pour identifier les facteurs ayant un impact sur le choix des trajets TC par les usagers, 2) analyse d'un ensemble de trajets choisis, tels que déclarés dans les enquêtes OD, parmi un ensemble de trajets possibles pour se déplacer entre des OD spécifiques, à une heure donnée, 3) analyse de la qualité des trajets choisis selon des logiques relatives (par rapport au plus court trajet), 4) expérimentation de fonctions de coût généralisé pour représenter les trajets et 5) calcul et analyse d'indicateurs.

Le schéma méthodologique expliquant la série des étapes du projet est présenté à la Figure 3.1.

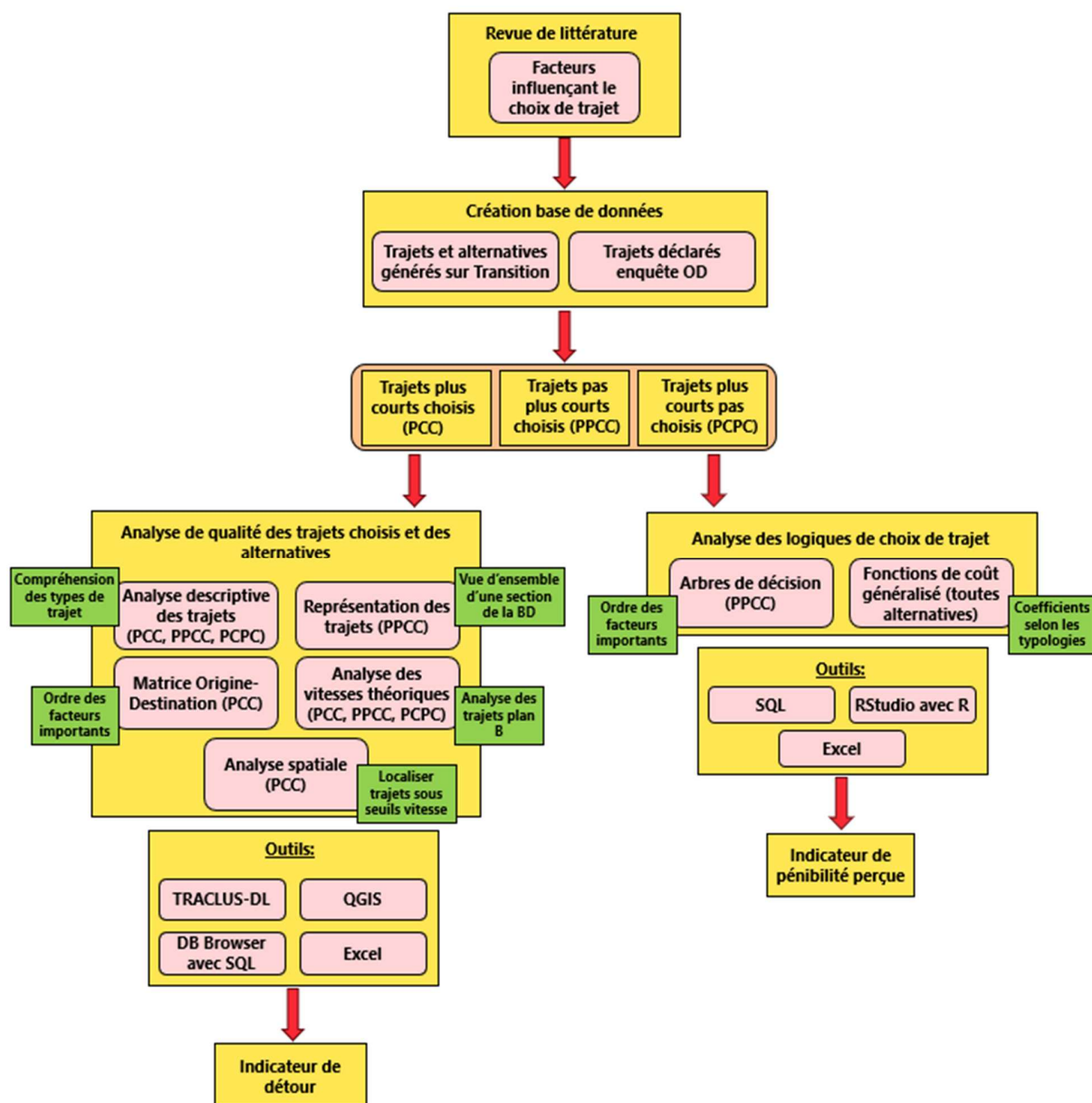


Figure 3.1: Schéma méthodologique

La première étape constitue la revue de la littérature, qui permet d’avoir un état des connaissances sur les facteurs impactant le choix d’un trajet. La revue de la littérature permet aussi de présenter le concept de fonction de coût généralisé et de présenter les outils utilisés. Ensuite, la base de données est créée en combinant les données de l’enquête OD 2018 de Montréal et les trajets simulés par le calculateur de Transition. L’analyse des ensembles de trajets choisis est ensuite effectuée à l’aide d’une matrice OD et à partir de l’algorithme TRACLUS-DL. L’analyse de qualité relative

des trajets choisis par rapport aux trajets plus courts non choisis est ensuite effectuée. Les arbres de décision sont ensuite développés, permettant d'analyser les logiques liées au choix de trajet. L'équation de coût généralisé est testée et développée à partir des coefficients provenant de la revue de littérature et permettent de représenter le temps perçu par une diversité d'usagers. Finalement, des indicateurs sont calculés et analysés pour les trajets choisis.

3.2 Description des données et des outils

Les diverses bases de données utilisées ainsi que les outils adoptés afin de compléter ce projet sont présentés ci-dessous.

3.2.1 Enquête Origine-Destination

L'enquête Origine-Destination de Montréal de 2018 est une base de données très importante dans ce projet. Ces enquêtes OD sont effectuées à chaque 5 ans par un consortium de partenaires sous la responsabilité de l'Autorité régionale de transport métropolitain (ARTM). Elles permettent de créer un portrait des habitudes de déplacement de la population. Le taux d'échantillonnage est de 3,89 % des ménages de la grande région de Montréal. En effet, ce sont 73400 ménages qui ont permis de décrire les caractéristiques de 357800 déplacements effectués par 147200 personnes (ARTM, 2020). Ces milliers de ménages sont rejoints par entrevue téléphonique, le médium choisi pour mener ces enquêtes (jusqu'en 2018 car en 2023 l'enquête a principalement été réalisée via le un questionnaire web). Les Enquêtes OD ont lieu en automne et concernent les habitudes de mobilité durant les jours de semaine. Cette base de données contient des informations sur les déplacements effectués ainsi que les informations sociodémographiques sur les personnes enquêtées. Les coordonnées du lieu de domicile ainsi que les points d'origine et de destination des déplacements font partie de cette base de données. Ensuite, des facteurs de pondération permettent d'extrapoler les résultats de l'échantillon sur la population de référence à l'étude.

3.2.2 Plateforme Transition

Le calculateur de chemins de la plateforme Transition, développée par la Chaire de Mobilité de Polytechnique Montréal (Chaire Mobilité, 2020), est utilisé pour effectuer la simulation des alternatives de trajets. Dans le cadre de ce projet, les paires OD de l'Enquête OD de Montréal de 2018 sont entrées dans la plateforme Transition et les alternatives sont simulées.

Dans le logiciel Transition, certains paramètres sont choisis afin de contrôler le nombre de trajets qui peuvent être modélisés. En effet, ces paramètres permettent d’avoir des alternatives qui sont réalistes et faisables. Les paramètres choisis apparaissent dans la Figure 3.2.

The screenshot shows a window titled "NOUVEAU CALCUL" with a subtitle "Sommaire de l'analyse". It contains a list of parameters for a calculation. At the top right, it says "Données de la demande" and "Fichier CSV Fichier téléversé". Below this, it says "Paramètres". The main text reads: "Effectuer le calcul de chemin pour les modes suivants Transport collectif". The scenario is "Scénario REF_GRM_SEM_A2018". The parameters listed are: "Temps de parcours maximal incluant les accès (en minutes) 180", "Temps minimum d'attente (minutes) 1", "Temps maximum d'accès à l'origine et à destination (minutes) 20", "Temps maximum d'accès lors des transferts (minutes) 20", "Temps d'attente maximal au premier arrêt (minutes)", "Calcul avec alternatives Oui", "Résultats détaillés avec étapes Oui", "Inclure les géométries des trajets (geojson) Non", and "Nombre de calculs parallèles 4". At the bottom right, there are three buttons: "Annuler", "Précédent", and "Calculer".

Figure 3.2: Paramètres utilisés dans Transition (Chaire Mobilité, 2020)

Un temps de déplacement maximal de 3 heures et un temps minimal d’attente de 1 minute aux arrêts sont posés. Le temps de marche durant les correspondances et le temps d’accès et de sortie est posé à un maximum de 20 minutes.

3.2.3 Base de données

Tout d’abord, il faut créer la base de données avec laquelle toutes les analyses subséquentes seront effectuées. La base de données utilisée tout au long de ce projet provient des données de l’enquête Origine-Destination et des alternatives simulées par Transition. Les trajets choisis dans les enquêtes OD permettront d’extraire des alternatives de trajet à partir de la plateforme Transition.

Les trajets choisis et les informations sociodémographiques ainsi que les alternatives Transition provenant des deux bases de données sont rassemblés dans une grande base de données sur le logiciel DB Browser avec le langage SQL; ainsi, la base de données initiale est créée.

À partir de cette base de données initiale, il est possible de la séparer en deux autres bases de données.

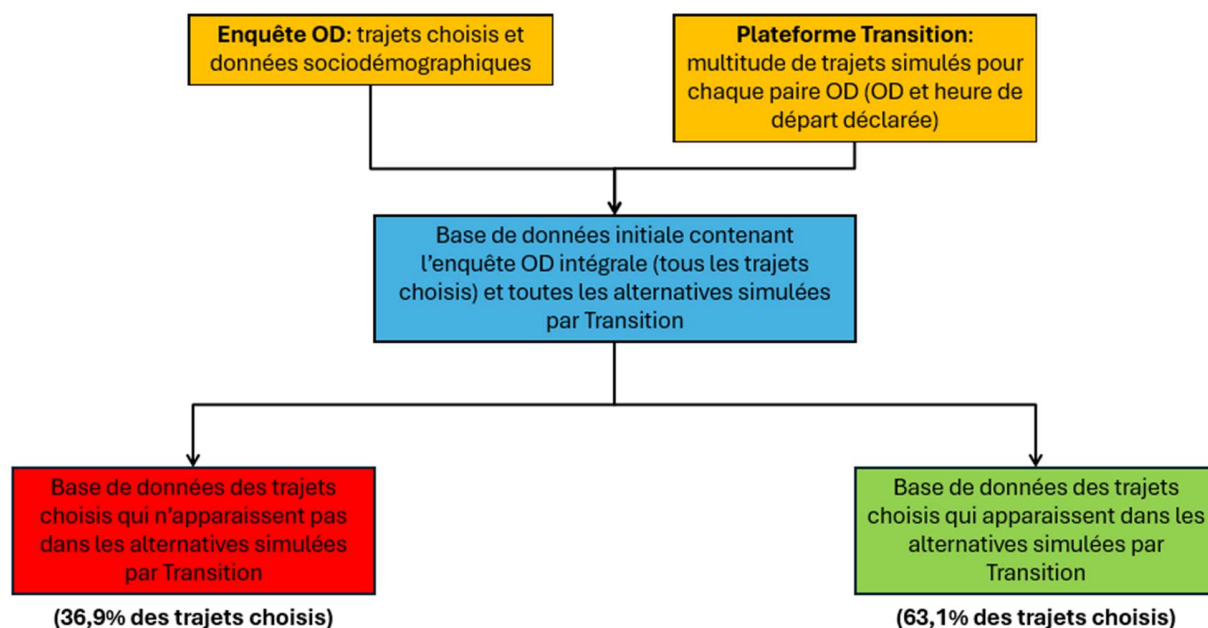


Figure 3.3: Création de la base de données

La première base de données contient 36,9 % des trajets de la base de données initiale. Il est possible que le trajet choisi dans l'enquête OD n'apparaisse pas dans les options de trajet simulé de Transition. En effet, c'est le cas pour 36,9 % des trajets choisis dans la base de données initiale. Cette situation arrive lorsqu'une paire OD entrée dans la plateforme OD crée des simulations d'alternatives mais que le trajet déclaré dans l'Enquête OD ne fait pas partie de la liste de trajets simulés. Ceci démontre que les hypothèses de départ utilisées lors de la simulation de trajets avec la plateforme Transition contiennent des limites, il y a donc certains points à régler afin d'obtenir les simulations adéquates pour toutes les paires OD. Ces limites seront présentées en ANNEXE .

La deuxième base de données contient 63,1 % des trajets de la base de données initiale. Cette base de données contient tous les trajets choisis qui font partie de la liste d'alternatives simulées. Les trajets de cette base de données seront analysés dans cette étude.

3.3 Analyse de qualité des trajets choisis et leurs alternatives

La section suivante explique la méthodologie pour analyser les trajets de la base de données. La base de données contenant 63,1 % des trajets choisis est utilisée.

Dans la base de données contenant les trajets choisis faisant partie des alternatives Transition, diverses requêtes SQL sont effectuées pour fin d'analyse.

Cette base de données contient deux types de trajets choisis : 1) les trajets choisis qui ont le temps de parcours le plus court parmi les alternatives et qui comptent pour 54,4 % des trajets et 2) les trajets qui n'ont pas le temps de déplacement le plus court (45,6 %). Ce dernier ensemble est utilisé pour construire des arbres de décision puisqu'il semble que ce ne soit pas le temps total de déplacement qui dicte leur choix.

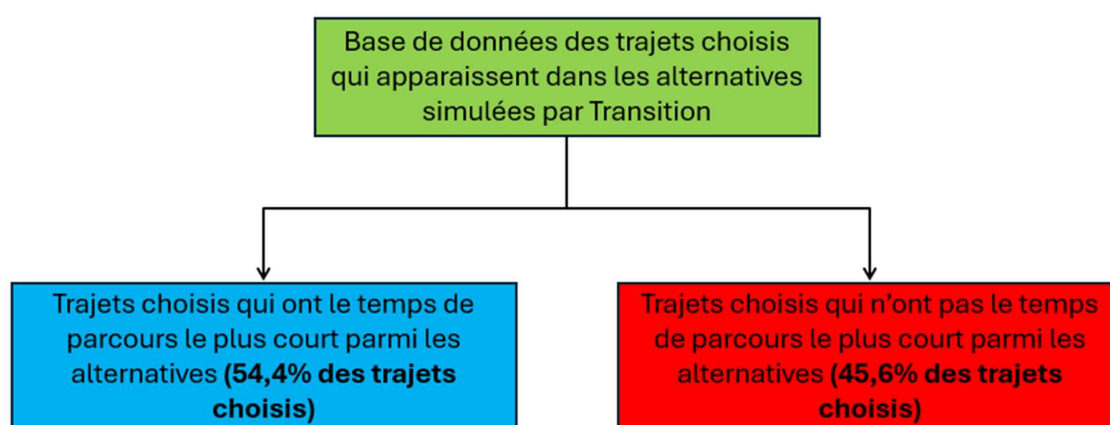


Figure 3.4 : Séparation de la base de données des trajets apparaissant comme alternative Transition

Avec les données sur les déplacements, la plupart des analyses sont en lien avec le temps, la distance et les correspondances. Les données de l'enquête OD permettent d'ajouter des données sociodémographiques dans l'étude. Il est donc possible de brosser un portrait des facteurs qui ont un impact sur le choix de trajet.

Avant de commencer l'analyse, diverses colonnes sont ajoutées à la base de données. Parmi les nouvelles colonnes qui sont créées, il y a une colonne qui permet de trouver, parmi les alternatives de trajet, celle qui est choisie telle que déclarée dans l'enquête OD. Il y a une colonne qui calcule le temps de déplacement total de chaque alternative en soustrayant l'heure d'arrivée et l'heure de départ. Une colonne contient la différence de temps entre le trajet ayant le temps le plus court et les alternatives.

Les mêmes types de colonnes sont créés pour la distance totale, le temps d'attente à l'origine, le temps d'attente en correspondance, la distance de marche totale, la distance et le temps de marche

en correspondance, le temps d'accès et de sortie, le nombre de correspondances et le temps en véhicule.

Des colonnes permettent de savoir si l'alternative a une distance plus courte que le trajet avec le temps le plus court. Une approche catégorielle est utilisée : si la distance est plus courte, on attribue la valeur 1, si la distance est égale, on attribue la valeur 2 et si la distance est plus longue, on attribue la valeur 0. Ce processus est répété pour chaque colonne présentée dans le paragraphe précédent.

Une colonne contenant la vitesse théorique est aussi ajoutée. Les calculs de vitesses théoriques sont présentés plus loin dans le mémoire.

Des colonnes qui permettent de savoir si l'alternative respecte des seuils de vitesse sont aussi ajoutées. Le Tableau 3.1 démontre un exemple de quelques colonnes qui ont été ajoutées à la base de données avec des valeurs possibles. Les colonnes ajoutées sont placées de manière horizontale afin de pouvoir entrer dans la page.

Tableau 3.1 : Exemple de colonnes ajoutées à la base de données

Colonne ajoutée	Exemple alternative 1	Exemple alternative 2	Exemple alternative 3
Trajet choisi	1	0	0
Temps trajet (minutes)	26,70	30,55	39,20
Temps plus court	1	0	0
Différence temps (trajet temps plus court)		3,85	12,50
Distance trajet (m)	5500	6600	6900
Différence distance (trajet temps plus court)		1100	1400
Distance plus courte que trajet temps plus court		0	0
Temps attente (minutes)	4,8	9,7	2,3
Différence temps attente (trajet temps plus court)		4,9	-7,4
Temps attente plus court que trajet temps plus court		0	1
Temps d'accès (minutes)	5,2	5,9	5
Différence temps accès (trajet temps plus court)		0,7	-0,2
Temps accès plus court que trajet temps plus court		0	1
Distance à vol d'oiseau (m)	4500	4500	4500
Vitesse théorique (km/h)	10,11	8,84	6,89
Respecte seuil 6 km/h	1	1	1
Respecte seuil 10 km/h	1	0	0

3.3.1 Analyse descriptive des trajets

Toutes les analyses descriptives sont pondérées avec les facteurs de pondération associés à chaque personne dans l'Enquête OD. Quatre sous-ensembles de trajets sont créés à partir de la base de données :

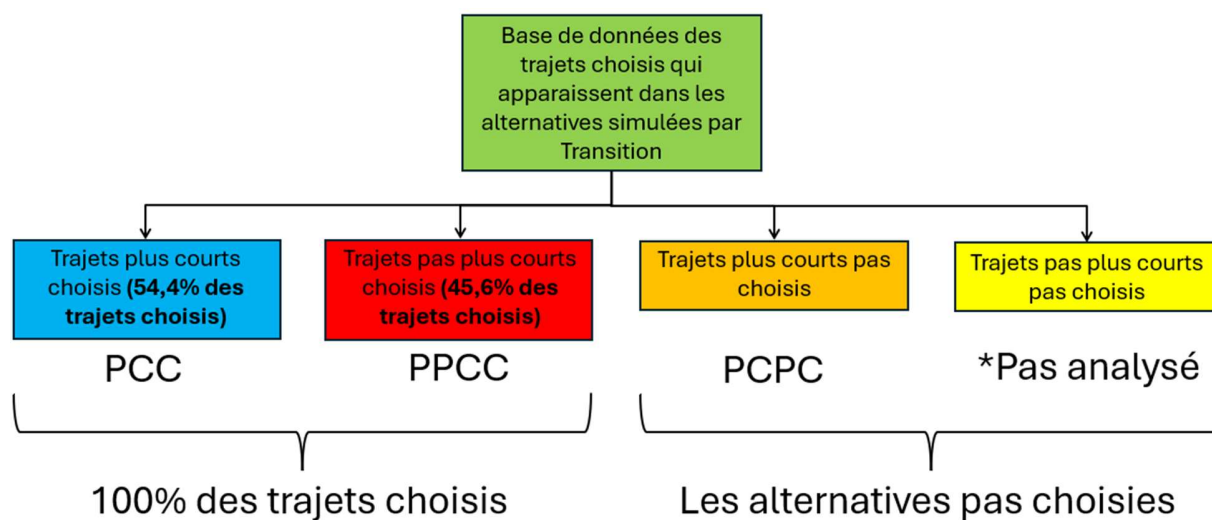


Figure 3.5: Schéma des quatre types de trajets provenant de la base de données

Dans le cadre de ce projet, les trois sous-ensembles suivants seront analysés en profondeur :

1. Les trajets plus courts choisis (PCC)
2. Les trajets pas plus courts choisis (PPCC)
3. Les trajets plus courts pas choisis (PCPC)

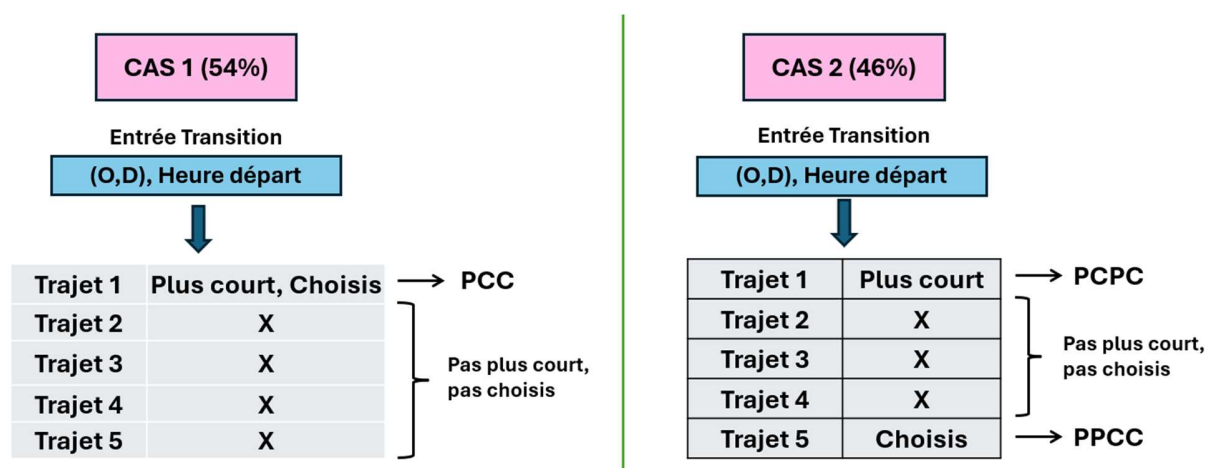


Figure 3.6 : Deux cas possibles lors du choix de trajet

Les trois sous-ensembles sont comparés et les différences sont soulevées. Cette analyse permet de faire ressortir les facteurs sociodémographiques associés aux sous-ensembles A et B. Les facteurs

de trajet qui ont un impact, tels que le temps total et la vitesse, sont aussi analysés pour les trois sous-ensembles.

L'analyse spatiale s'appuie sur une matrice OD. Une analyse par agrégation spatiale via l'outil TRACCLUS-DL requiert plus de manipulations et est présentée aux sections suivantes.

3.3.2 Représentation des trajets

Une représentation des trajets permettant d'illustrer la base de données des trajets de TC est étudiée dans cette section. Les trajets pas plus courts choisis (PPCC) sont utilisés pour la création de cette représentation.

Les caractéristiques de trajet suivantes ont été ciblées:

- le temps d'accès
- le temps de sortie (egress)
- le nombre de correspondance

Comme expliqué plus tôt, le temps de déplacement total est considéré comme la caractéristique la plus importante d'un trajet. La première branche de la représentation des trajets sera donc le temps de parcours. Les trajets PPCC seront donc analysés plus en profondeur afin de comprendre quelles sont les autres caractéristiques importantes.

Pour ce faire, les trajets PPCC sont ensuite comparés à l'alternative ayant le temps de parcours le plus court afin d'obtenir des différences de temps et de nombre de correspondances. Par exemple, la différence de temps d'accès sera calculée entre le trajet PPCC et l'alternative ayant le temps le plus court. Si la différence est élevée, elle sera prise en compte. Pour les temps d'accès et de sortie, un seuil de différence de 6 minutes et plus est pris en compte. Il est possible de justifier ces seuils en regardant la distribution des différences de temps d'accès et de sortie. La distribution des temps d'accès et de sortie s'étend de 0 seconde à 1200 secondes avec environ 50 % des alternatives contenues entre 0 et 360 secondes. La distribution des fréquences de temps d'accès et de sortie de toutes les alternatives est présentée dans la Figure 3.7.

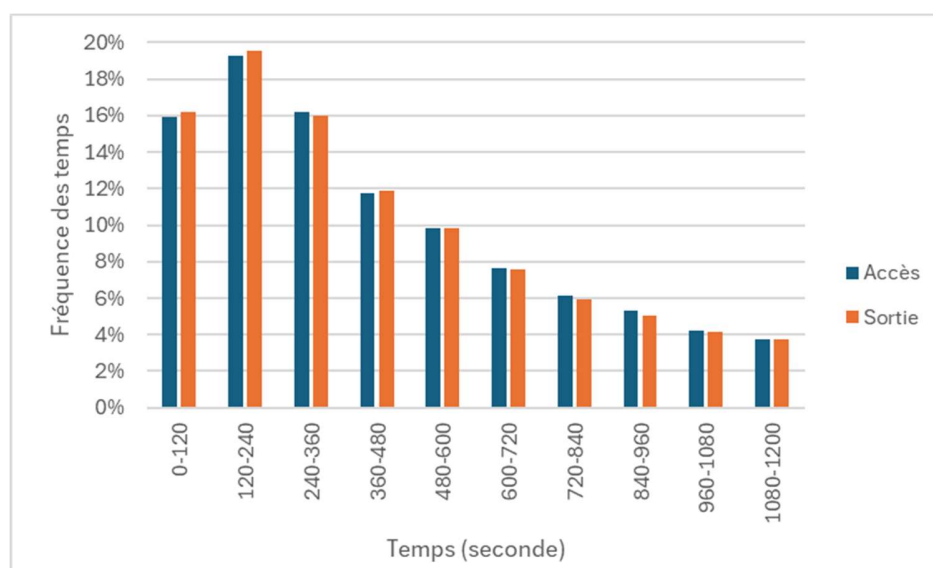


Figure 3.7 : Fréquence des temps d'accès et de sortie de toutes les alternatives

Avec ces données, il est possible d'ajouter à la base de données des colonnes contenant des données 0, 1 et 2. Dans cette base de données, si le trajet PPCC a un temps d'accès plus court que le trajet ayant le temps le plus court, un 1 va apparaître. Si le temps d'accès est plus élevé, un 0 va apparaître. Si le temps d'accès est égal (en appliquant le seuil), un 2 va apparaître.

Ce raisonnement sera appliqué pour tous les trajets choisis et pour les trois caractéristiques de trajet. Par la suite, il suffit de faire un tableau croisé dynamique pour voir les diverses combinaisons de caractéristiques et combien de trajets choisis leur appartiennent. Ceci va permettre de comprendre quelle caractéristique de trajet les usagers ont priorisée au détriment du temps de déplacement.

Le Tableau 3.2 présente les diverses combinaisons des trois caractéristiques ciblées. La colonne décrit quelle caractéristique est priorisée en prenant chacun des types de trajets. Finalement, le pourcentage de trajets qui représente la combinaison est inscrit dans la dernière colonne. Les données représentées dans le tableau décrivent seulement 80 % des combinaisons.

En regardant le Tableau 3.2, la première caractéristique qui ressort dans la colonne des priorités est le nombre de correspondances. Ensuite, c'est le temps d'accès et le temps de sortie. Les caractéristiques seront placées en ordre de priorité dans la représentation des trajets. Il suffit de trouver le pourcentage de trajets choisis pour chaque branche à l'aide de requêtes SQL. La représentation des trajets et son analyse se retrouvent plus loin dans le rapport.

Tableau 3.2: Portion des combinaisons de caractéristiques ciblées

Combinaison (temps accès, temps sortie, nombre de correspondances)	Combinaison priorité	%
2 0 1	Moins de correspondance	14,15 %
0 2 1	Moins de correspondance	11,75 %
0 0 1	Moins de correspondance	7,95 %
2 2 1	Moins de correspondance	6,83 %
2 2 2	-	6,06 %
0 0 2	-	5,40 %
2 0 2	-	5,07 %
0 2 2	-	4,81 %
1 0 1	Temps accès plus court et moins de correspondance	4,21 %
0 1 1	Temps sortie plus court et moins de correspondance	3,99 %
1 2 1	Temps accès plus court et moins de correspondance	3,78 %
2 1 1	Temps sortie plus court et moins de correspondance	3,64 %
2 1 2	Temps sortie plus court	3,00 %

0 : plus élevé que le trajet PCPC

1 : plus bas que le trajet PCPC

2 : égal au trajet PCPC en prenant en compte le seuil de 6 minutes

3.3.3 Analyse des vitesses théoriques

Pour cette analyse, la base de données complète contenant les trajets choisis qui apparaissent dans les alternatives simulées par Transition ainsi que toutes les alternatives Transition est utilisée. Une analyse des vitesses théoriques de toutes les alternatives est effectuée. Premièrement, la vitesse théorique sur la diagonale est calculée pour toutes les alternatives Transition. L'analyse de la vitesse théorique est effectuée à l'aide de la distance à vol d'oiseau entre les extrémités de déplacement. Il suffit de prendre les coordonnées d'origine et de destination du trajet afin d'obtenir la distance à vol d'oiseau. Les coordonnées d'origine et de destination sont trouvées dans la base de données et elles sont dans le système latitude/longitude en format degrés décimaux. Le calcul de la distance à vol d'oiseau utilisée est la suivante :

$$\begin{aligned}
\text{Distance à vol d'oiseau} = & 6371 * \text{ACOS}(\text{COS}(\text{RADIANS}(90 - \text{latitude origine})) \\
& * \text{COS}(\text{RADIANS}(90 - \text{destination latitude})) + \text{SIN}(\text{RADIANS}(90 - \text{latitude origine})) \\
& * \text{SIN}(\text{RADIANS}(90 - \text{destination latitude})) \\
& * \text{COS}(\text{RADIANS}(\text{longitude origine} - \text{longitude destination})) \quad (3.1)
\end{aligned}$$

Ensuite, le temps de déplacement total est pris directement dans la base de données.

Pour calculer la vitesse théorique, l'équation suivante est utilisée.

$$\text{Vitesse théorique} \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right) = \frac{\text{distance à vol d'oiseau}(\text{km})}{\text{temps de déplacement total}(\text{h})} \quad (3.2)$$

Deuxièmement, la différence entre la vitesse théorique de l'alternative par rapport au trajet ayant le temps le plus court est calculée. La formule suivante est utilisée :

$$\begin{aligned}
& \text{Différence de vitesse théorique} \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right) = \\
& \text{vitesse trajet temps plus court} \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right) - \text{vitesse de l'alternative} \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right) \quad (3.3)
\end{aligned}$$

Troisièmement, pour chaque alternative, deux seuils sont évalués. Le premier seuil est de 10 km/h, le second est de 6 km/h. Si le trajet a une vitesse plus élevée que le seuil, le seuil est respecté et ce processus est fait pour les deux seuils. Les seuils de 6 et 10 km/h proviennent d'une présentation qui a été faite lors du 58e congrès de l'AQTr (Morency, 2024).

Quatrièmement, pour chaque paire OD, le nombre d'alternatives qui respecte les seuils de 6 et 10 km/h est calculé. Des tableaux contenant le pourcentage des paires OD selon le nombre d'alternatives respectant les seuils de 6 et 10 km/h selon le motif sont créés. Il y a parfois jusqu'à 50 alternatives qui sont simulées pour un trajet choisi, ce qui devient un peu redondant. Pour l'analyse, seulement les trajets choisis ayant entre zéro et six alternatives respectant le seuil seront sélectionnés. Il est inutile d'analyser les trajets qui ont plus de six alternatives qui respectent le seuil car ces cas représentent un faible pourcentage des trajets choisis.

Finalement, pour chaque paire OD, les différences de vitesse entre l'alternative et le trajet ayant le temps le plus court sont analysées. Il y a trois seuils à évaluer, une différence de vitesse de 1, 2 et 3 km/h. Les différences de vitesse sont évaluées selon les trois seuils. Si la différence de vitesse est plus petite que 1 km/h, alors cette alternative représente un plan B. Le plan B est une alternative de trajet dont la vitesse théorique respecte le seuil de différence de vitesse par rapport au trajet ayant

le temps le plus court. Le même processus est répété pour les deux autres seuils de différence de vitesse. Ce même processus est aussi effectué pour les seuils de vitesse de 6 et 10 km/h vus précédemment. Pour chaque paire OD, il est donc possible de savoir combien il y a de plans B potentiels. Le schéma explicatif de cette analyse est présenté dans la Figure 3.8.

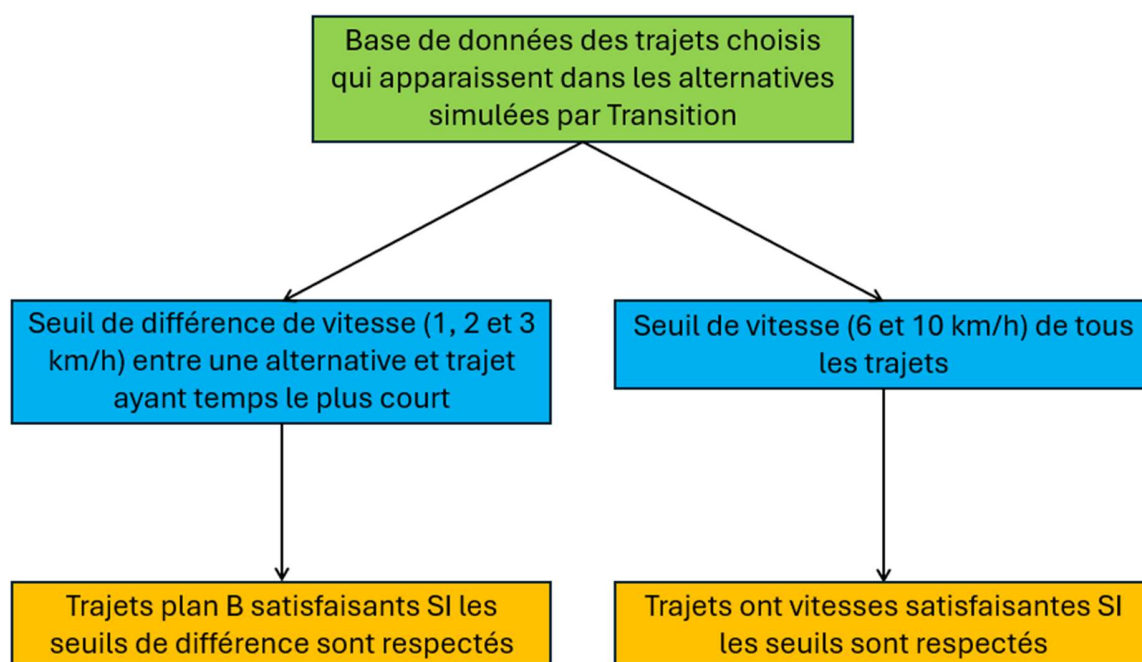


Figure 3.8 : Schéma explicatif de l'analyse des vitesses théoriques

3.3.4 Matrice Origine-Destination

Une analyse spatiale est effectuée à l'aide d'une matrice OD. Le sous-ensemble des trajets plus courts choisis (PCC) ainsi qu'un sous-ensemble combinant PCC et PPCC sont utilisés. Les points d'origine et de destination des trajets choisis peuvent appartenir à diverses régions d'origine et de destination. Ces huit régions sont les suivantes :

1. Agglomération de Montréal – Centre-ville
2. Agglomération de Montréal – Centre
3. Agglomération de Montréal – Est
4. Agglomération de Montréal – Ouest
5. Agglomération de Longueuil
6. Laval

7. Couronne Nord

8. Couronne Sud

Dans la matrice OD, l'axe vertical représente les régions d'origine tandis que l'axe horizontal représente les régions de destination.

Afin de créer la matrice OD finale, il faut créer des tableaux croisés dynamiques. Le premier TCD contient le nombre de trajets pour chaque paire de régions OD, ce pour le sous-ensemble combinant PCC et PPCC. Le deuxième TCD contient le nombre de trajets pour chaque paire de régions OD pour les trajets plus courts choisis, soit le sous-ensemble PCC.

Il est important de créer les TCD avec le nombre de trajets avant d'intégrer les facteurs de pondération. Cette étape permet de voir quelle case de la matrice contient assez de trajets pour que ce soit représentatif. Pour le groupe PCC+PPCC, il y a au total 35248 trajets, donc une case contenant moins de 30 trajets n'est pas prise en compte car elle n'est pas représentative. La limite est posée à 30 trajets car cela relève de la loi des grands nombres, en raison du théorème central limite. Le nombre minimal d'observations est souvent posé à 30 dans la pratique (Chang et al., 2006).

Dans le Tableau 3.3, les cases en orange contiennent les paires OD où il n'y a pas assez de trajets pour que le résultat soit représentatif. Une case contenant moins de 30 trajets est surlignée en orange pour indiquer qu'elle ne sera pas prise en compte dans la matrice OD finale.

Tableau 3.3: Matrice OD du nombre de trajets pour l'ensemble PCC+PPCC

	1	2	3	4	5	6	7	8	Total général
1	622	3732	441	731	911	526	461	564	7990
2	3851	8471	748	880	309	381	186	155	14989
3	456	750	1052	31	12	19	10	3	2335
4	773	875	34	1346	24	48	16	37	3153
5	947	289	9	21	1073	12	2	57	2422
6	555	393	23	56	14	944	63	3	2051
7	465	190	8	13	2	70	444		1193
8	637	192	3	48	69	1		125	1104
Total général	8307	14900	2318	3127	2415	2001	1182	944	35248

Tableau 3.4: Matrice OD du nombre de trajets pour l'ensemble PCC

	1	2	3	4	5	6	7	8	Total général
1	382	2193	268	399	395	363	335	256	4593
2	2316	4457	327	428	144	203	123	98	8100
3	261	338	567	7	5	8	6		1193
4	432	441	9	665	10	20	6	12	1595
5	412	145	5	10	537	10	1	27	1154
6	352	208	9	19	8	530	40	1	1167
7	329	131	7	8		31	320		827
8	253	90	1	21	37			98	521
Total général	4738	8009	1193	1558	1136	1165	831	492	19158

Ensuite, les deux matrices sont créées en pondérant les trajets avec les facteurs de pondération.

Finalement, la matrice OD finale du Tableau 4.9, contient les pourcentages de PCC sur PCC+PPCC. Comme il est mentionné plus haut, l'ensemble PCC représente 54 % des trajets choisis. Cette matrice OD aura donc pour but de voir si la répartition des trajets PCC suit cette même tendance (54 %) pour toutes les paires de régions OD.

3.3.5 Analyse spatiale

Une analyse spatiale est effectuée afin d'observer l'impact de la spatialité sur le choix des trajets. Dans cette analyse, les seuils de vitesse théorique minimaux de 6 km/h et 10 km/h seront conservés. Pour cette analyse, les données utilisées sont les trajets plus courts choisis (PCC) qui ne respectent pas les seuils minimaux de vitesse de 6 km/h et 10 km/h. Ce sous-ensemble de données représente les trajets qui sont supposément les plus avantageux car ils ont les temps de parcours les plus courts mais qui ne respectent pas des seuils de vitesse théorique minimaux.

Ces trajets sont donc pondérés et analysés avec des tableaux croisés dynamiques. Les analyses sont faites par rapport à la distance à vol d'oiseau de ces trajets. Le nombre de lignes de transport en commun utilisées par rapport à la vitesse est aussi analysé. Les données sont importées dans QGIS afin de visualiser les trajets.

Par la suite, une analyse d'agrégation spatiale est effectuée avec TRACCLUS-DL afin d'observer les lignes de désir et les corridors principaux de trajets.

TRACCLUS-DL est la version adaptée de TRACCLUS (présentée dans la revue de littérature). C'est un algorithme qui permet de créer des corridors à partir d'un ensemble de lignes de désirs, soit des paires OD.

Les données utilisées sont les mêmes qu'à la section précédente, soit les trajets plus courts choisis (PCC) qui ont des vitesses théoriques plus basses que 6 km/h et 10 km/h.

Ensuite, il est temps d'écrire la commande sur Python pour les deux seuils de vitesse théorique. Les commandes à entrer pour ces seuils sont présentées en ANNEXE .

Cette commande va permettre de créer des fichiers de résultat en format CSV contenant la liste des corridors et la liste des segments ou paires OD. Ces fichiers pourront ensuite être importés dans QGIS afin de visualiser les segments et les corridors.

Pour le seuil de 6 km/h, les quatre paramètres qui ont été choisis pour l'analyse sont les suivants : 800 mètres, 200 observations, 10 degrés et 800 mètres.

Pour le seuil de 10 km/h, les quatre paramètres qui ont été choisis pour l'analyse sont les suivants : 700 mètres, 500 observations, 10 degrés et 600 mètres.

Ces paramètres ont été choisis par essai erreur. En essayant des combinaisons de paramètres différents, il a été possible d'obtenir des lignes de désir et des corridors clairs et visibles sur les cartes. En essayant des combinaisons différentes, les paramètres choisis sont ceux qui faisaient mieux ressortir les grands axes de mobilité dans la grande région de Montréal.

3.4 Analyse des logiques liées au choix d'un trajet

Les logiques liées au choix d'un trajet de TC sont analysées dans les sections suivantes. Le choix de trajet est analysé via deux outils différents : l'arbre de décision et l'équation de coût généralisé.

3.4.1 Arbres de décision

Les arbres de décision sont créés en utilisant les données pour obtenir des prédictions de choix. Le logiciel RStudio prend la base de données des trajets pas plus courts choisis (PPCC) et émet des prédictions quant aux facteurs ayant un impact sur le choix. Le logiciel va donc segmenter la base de données à partir de certains facteurs.

Dans le cadre du projet, l'analyse est effectuée par rapport à une variable cible : le temps de déplacement total. Ainsi l'arbre donnera en résultat si "Oui" ou "Non" le trajet a le temps de déplacement le plus court parmi les alternatives.

Plusieurs facteurs ont été testés tels que les caractéristiques sociodémographiques et les caractéristiques des trajets. Cependant, en effectuant des tests, il est possible de remarquer que les facteurs sociodémographiques n'ont pas un grand impact sur l'arbre de décision, ceux-ci sont donc retirés du modèle. Les facteurs qui ont le plus d'impact et qui sont intégrés dans le modèle sont :

1. la différence du temps en véhicule
2. la différence du temps d'accès
3. la différence du temps de sortie
4. la différence du nombre de correspondances.

Les différences sont calculées entre le trajet PPCC et le trajet ayant le temps le plus court. Ceci permet d'analyser les logiques liées au choix du trajet n'ayant pas le temps le plus court.

Il est possible d'évaluer si l'arbre de décision est efficace ou pas. Il suffit de générer une matrice de confusion et d'évaluer la précision et la sensibilité. L'importance de chaque facteur peut aussi être déterminée, ceci permet donc d'enlever ou de garder certains facteurs. Cette fonction attribue un taux d'importance à chaque facteur et permet de savoir à quel point le facteur contribue à séparer les observations dans des groupes.

Les arbres de décision sont calculés pour tous les motifs confondus, ainsi que pour le motif travail, étude, loisir et magasinage séparément.

3.4.2 Équation de coût généralisé

Le temps perçu est calculé à l'aide de l'équation de coût généralisé. L'équation intègre les perceptions du temps de chaque étape d'un trajet afin de calculer le temps perçu des trajets.

Pour cette partie du projet, la base de données contenant les trajets choisis ainsi que toutes les alternatives est utilisée.

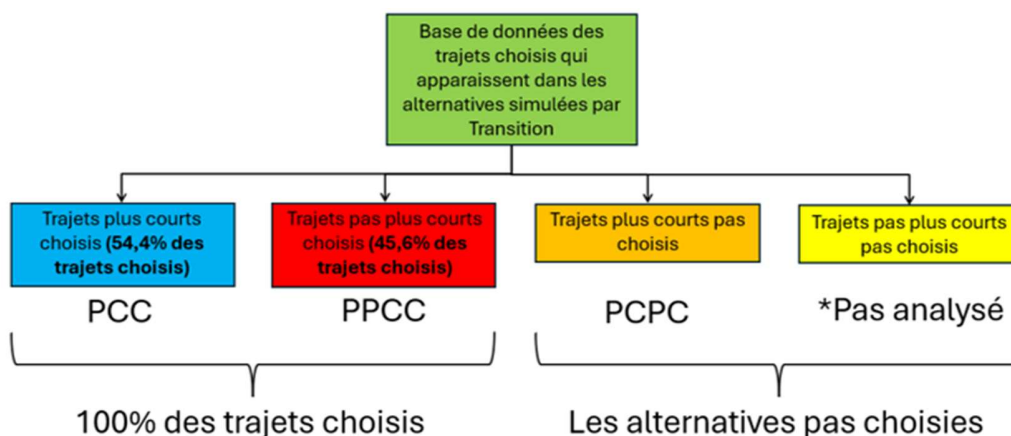


Figure 3.9: Base de données utilisée pour l'équation de coût généralisé

L'équation de coût généralisé est développée en s'appuyant sur la littérature scientifique et en utilisant la méthode Taguchi. Diverses combinaisons de coefficients de l'équation sont développées pour représenter les choix de plusieurs types de personnes. Ces combinaisons introduites dans l'équation vont donner comme résultat une estimation du temps perçu des trajets de TC.

L'équation de coût généralisé utilisée dans ce projet a la forme suivante :

$$\begin{aligned} \text{Temps perçu} = & 1 * T_{\text{véhicule}} + \beta_1 T_{\text{attente correspondance}} \\ & + \beta_2 * (T_{\text{accès}} + T_{\text{sortie}} + T_{\text{mar}} \text{ correspondance}) + \beta_3 N_{\text{correspondance}} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Les coefficients β sont déterminés à partir de la littérature scientifique et sont spécifiques à chaque facteur. Le temps en véhicule a la valeur de 1 tel que mentionné plus tôt. Comme les coefficients de chaque terme de l'équation peuvent varier d'une source à une autre dans la littérature, comme présenté dans le Tableau C.1, différentes combinaisons de valeurs seront donc testées avec la méthode Taguchi pour trouver celles qui sont les plus adaptées au contexte d'étude. La méthode Taguchi est utilisée afin de simplifier le calcul des combinaisons de coefficients. En effet, puisqu'il y a une grande quantité de coefficients possibles provenant de la littérature scientifique et que tester toutes les combinaisons possibles prendrait beaucoup de temps, cette méthode est choisie afin de créer des combinaisons de valeurs à tester. L'étape suivante, qui ne sera pas réalisée dans le cadre de ce mémoire, sera d'estimer les coefficients à l'aide d'un modèle économétrique ou d'apprentissage machine.

Les facteurs présents dans l'équation sont ceux qui ont le plus grand impact sur le choix d'un trajet en TC, comme démontré plus tard à l'aide des arbres de décision.

Il est important de noter que le temps d'attente prend seulement en compte l'attente lors d'une correspondance. Le temps d'attente au début des trajets est posé à 1 minute dans les paramètres initiaux de Transition, comme démontré dans la Figure 3.2. Ceci permet de minimiser l'attente initiale et découle de l'hypothèse qu'un usager ajustera son heure de départ de l'origine conformément à l'heure de passage du premier mode emprunté.

La première étape pour créer l'équation de coût généralisé à l'aide de la méthode Taguchi consiste à identifier les facteurs et leurs niveaux, comme dans l'exemple au Tableau 3.5. Les valeurs des niveaux proviennent des coefficients du Tableau C.1. Pour la première itération, trois niveaux sont définis pour chaque facteur : la valeur minimale, la valeur maximale et une valeur intermédiaire.

Tableau 3.5: Exemple des niveaux de la méthode Taguchi

Facteur	Niveaux
Temps d'attente	[x1, x2, x3]
Temps de marche	[y1, y2, y3]
Correspondance	[z1, z2, z3]

Ensuite, il faut construire une table de test Taguchi. Plutôt que de tester les 27 combinaisons possibles ($3 \times 3 \times 3 = 27$), la méthode Taguchi utilise une table orthogonale L9 qui permet de couvrir l'espace expérimental avec seulement neuf combinaisons représentatives, tout en estimant correctement les effets principaux. Cette réduction est possible car la table orthogonale L9 suppose que les interactions entre facteurs sont négligeables. La table est présentée dans le Tableau 3.6.

Tableau 3.6: Exemple des combinaisons tests de la méthode Taguchi

Test	Facteurs		
	Temps attente	Temps marche	Correspondance
1	x1	y1	z1
2	x1	y2	z2
3	x1	y3	z3
4	x2	y1	z2
5	x2	y2	z3
6	x2	y3	z1
7	x3	y1	z3
8	x3	y2	z1
9	x3	y3	z2

Pour chaque combinaison test, une équation de coût généralisé est construite et appliquée à toutes les alternatives de trajets pour l'ensemble des paires OD. Le temps perçu est calculé pour chaque alternative. Si le trajet choisi correspond à celui ayant le temps perçu le plus court, ceci est considéré comme un "Succès" puisque c'est le comportement qui est attendu (trajet avec le temps le plus court est choisi). En effet, comme expliqué plus tôt, environ 54 % des trajets choisis sont ceux qui ont le temps le plus court (trajets PCC). De plus, si un "Succès" est obtenu, cela signifie que l'équation est capable de prédire quel trajet sera choisi parmi plusieurs alternatives. Par la suite, il faut calculer le taux de succès brut que donnent les combinaisons de coefficients de l'équation. Ce taux de succès représente le pourcentage de paires OD où il y a eu un "Succès", c'est-à-dire, lorsque le trajet ayant le temps le plus court est choisi. Les trajets PCC donnent un taux de succès d'environ 54 % (qui va varier avec la segmentation par typologies d'utilisateurs et de trajets). Le taux de succès brut est une mesure locale provenant d'une combinaison donnée.

La méthode Taguchi ne se limite pas à trouver la combinaison ayant le taux de succès le plus élevé, elle permet de trouver la combinaison qui maximise la robustesse des paramètres face à la variabilité des résultats. Taguchi permet de minimiser la sensibilité au bruit en maximisant le rapport signal/bruit (S/N) (signal : taux de succès; bruit : variabilité des taux de succès selon les combinaisons). Le S/N donne une mesure globale de performance et de robustesse pour chaque combinaison test avec l'équation suivante :

$$S/N = -10 * \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right)$$

Où Y_i est le taux de succès de chaque combinaison test.

Tableau 3.7 : Exemple taux de succès brut des combinaisons tests de la méthode Taguchi

Test	Facteurs			Taux succès brut (%)	S/N
	Temps attente	Temps marche	Correspondance		
1	x1	y1	z1	...	...
2	x1	y2	z2	...	...
3	x1	y3	z3	...	...
4	x2	y1	z2	...	...
5	x2	y2	z3	...	...
6	x2	y3	z1	...	...
7	x3	y1	z3	...	...
8	x3	y2	z1	...	...
9	x3	y3	z2	...	...

Après avoir calculé le S/N pour chaque combinaison test, la moyenne S/N est calculée pour chaque facteur et chaque niveau. Le rapport S/N permet de sélectionner les meilleurs niveaux de chaque facteur en tenant compte à la fois de la performance moyenne et de la stabilité des résultats, plutôt que de choisir une seule combinaison optimale qui pourrait être sensible à la variabilité des données. Le S/N ayant la moyenne la plus élevée est sélectionné.

Après avoir identifié les meilleurs coefficients, l'équation qui est créée est appliquée sur les données de trajets et le taux de succès final est calculé. Si le taux de succès n'est pas satisfaisant, une autre itération Taguchi est effectuée en affinant les niveaux autour des valeurs optimales.

Ce même processus est répété pour chaque segment de la typologie d'utilisateur et de trajets. Différents types de personnes auront des préférences différentes donc une seule combinaison de coefficients pour l'équation de coût généralisé ne pourra pas fonctionner pour tous les déplacements observés. Il faudra essayer plusieurs combinaisons selon le genre, l'âge, le motif, etc. Ceci va permettre de créer une typologie de personnes et de trajets et d'obtenir des combinaisons de coefficients de l'équation qui donnent les plus hauts taux de succès pour différents contextes.

3.4.2.1 Sélection des coefficients β dans la littérature scientifique

Comme expliqué ci-dessus, il faut sélectionner des coefficients β_1, β_2 et β_3 à partir de la littérature scientifique. Le temps perçu est exprimé en minutes équivalentes de temps passé dans le véhicule, ce dernier est donc la référence. Les coefficients β_1, β_2 sont des multiplicateurs. Ces coefficients

vont multiplier les temps des facteurs auxquels ils sont associés. Le coefficient β_3 est une valeur de pénalité de temps qui sera multipliée au nombre de correspondances.

La revue de littérature présentée plus tôt fait un bon recueil des coefficients pour plusieurs facteurs impactant le choix d'un trajet en TC. Les valeurs possibles des coefficients de l'équation de coût généralisé sont présentées en ANNEXE .

Les valeurs de coefficient sont testées dans l'équation de coût généralisé avec la méthode Taguchi afin d'obtenir les combinaisons qui donnent le taux de succès le plus élevé.

3.4.2.2 Typologie de personnes

La typologie de personnes est basée sur (Deschaintres et al., 2021). La typologie est créée à partir du sexe et du groupe d'âge. Les groupes d'âge sont les suivants :

1. 0 à 14 ans
2. 15 à 24 ans
3. 25 à 39 ans
4. 40 à 64 ans
5. 65 ans et plus

Il y a donc cinq groupes d'âge et deux sexes présents dans l'Enquête OD 2018 de Montréal, ce qui donne 10 types d'utilisateurs. Ces 10 types d'utilisateurs sont étudiés et des combinaisons de coefficients de l'équation de coût généralisé spécifiques seront estimées.

3.4.2.3 Typologie de trajets

La typologie de trajets est basée sur le motif du trajet. Les motifs ciblés sont :

1. Travail
2. Étude
3. Loisir
4. Magasinage

Ceci donne quatre types de trajets pour lesquels des combinaisons de coefficients introduites dans l'équation de coût généralisé seront développées.

L'Enquête OD 2018 de Montréal contient huit grandes classes de motif : travail, étude, retour au domicile, loisir, magasinage, autre, sans déplacement, indéterminé. Seulement les quatre classes les plus intéressantes pour l'étude sont retenues.

3.5 Calcul des indicateurs

Dans le cadre de ce projet, deux indicateurs seront calculés afin de donner une vue d'ensemble sur la qualité et sur la pénibilité des trajets. En effet, l'indicateur de détour permet de donner une valeur à la qualité des alternatives de trajet. L'indicateur de pénibilité utilise le temps perçu afin de donner une valeur à la pénibilité des alternatives. Dans cette section, la base de données contenant seulement les trajets choisis est utilisée.

3.5.1 Indicateur de détour

L'indicateur de détour est calculé en prenant le temps réel d'un trajet et le temps théorique. Le temps théorique et le temps basés des horaires sont calculés de manières distinctes. Pour obtenir le temps réel de trajet, il suffit de regarder la base de données, celle-ci contient des temps de trajet provenant d'une simulation basée sur les horaires de TC.

Le temps théorique d'un trajet est calculé en prenant la distance à vol d'oiseau d'une paire OD. Ensuite, il faudra diviser par les seuils de vitesse de 6 km/h et de 10km/h. Ces seuils de vitesse spécifiques ont été présentés durant le 58^e congrès de l'AQTr (Morency, 2024).

Le temps théorique représente le temps espéré dans un scénario où le réseau de TC n'est pas construit autour des obstacles de la ville, mais plutôt en ligne droite directe.

$$\text{Temps théorique (h)} = \frac{\text{Distance à vol d'oiseau OD (km)}}{6 \frac{\text{km}}{\text{h}}} \quad (3.6)$$

$$\text{Temps théorique (h)} = \frac{\text{Distance à vol d'oiseau OD (km)}}{10 \frac{\text{km}}{\text{h}}} \quad (3.7)$$

En comparant le temps théorique et réel, un indicateur de détour pourra être développé pour tirer des constats sur la qualité du réseau de TC.

$$\text{Indicateur détour} = \frac{\text{Temps réel (h)}}{\text{Temps théorique (h)}} \quad (3.8)$$

Cet indicateur est calculé pour les trajets choisis. Plus la valeur de l'indicateur est élevée, plus le temps de déplacement réel est élevé par rapport au trajet à vol d'oiseau (théorique). Au contraire, un petit indicateur indique que le trajet réel prend moins de temps en comparaison au trajet à vol d'oiseau.

3.5.2 Indicateur de pénibilité perçue

L'indicateur de pénibilité perçue met en relation le temps réel d'un trajet et le temps perçu. Le temps réel est obtenu à partir de la base de données; celle-ci contient des temps de trajet provenant d'une simulation basée sur les horaires de TC. Le temps perçu est obtenu à partir de l'équation de coût généralisé qui sont basées sur la perception du temps.

Après avoir calculé le temps perçu, il est possible de calculer l'indicateur de pénibilité perçue.

$$\text{Indicateur pénibilité perçue} = \frac{\text{Temps perçu (minutes)}}{\text{Temps réel (minutes)}} \quad (3.9)$$

Cet indicateur est calculé pour les trajets choisis. Plus l'indicateur est élevé, plus la pénibilité perçue du trajet est élevée.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS

La méthodologie présentée dans la section précédente est appliquée sur des données réelles. Les données de l'Enquête OD de Montréal de 2018 sont utilisées.

4.1 Analyse de qualité des trajets choisis et des alternatives

L'analyse de qualité des trajets choisis et des alternatives permet de brosser un portrait de l'offre de TC disponible.

4.1.1 Analyse descriptive des sous-ensembles de trajets PCC, PPCC et PCPC

Une analyse descriptive de trois sous-ensembles de trajets est effectuée. Les trois sous-ensembles sont tirés de la base de données de trajets. Le premier sous-ensemble représentant les trajets plus courts choisis est identifié par PCC. Le deuxième sous-ensemble représentant les trajets pas plus courts choisis est identifié par PPCC. Le troisième sous-ensemble représentant les trajets plus courts pas choisis est identifié par PCPC. L'analyse de ces trois sous-ensembles de la base de données permet de montrer les différences entre les différents types de trajets et de voir les tendances présentes parmi ces données.

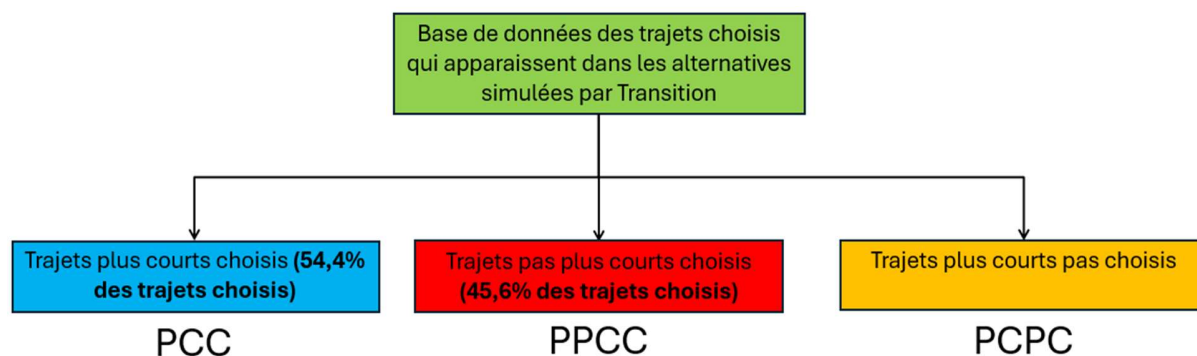


Figure 4.1: Schéma des trois sous-ensembles PCC, PPCC et PCPC

4.1.1.1 Analyse des trajets plus courts choisis (PCC)

La catégorie PCC représente 54,4 % des trajets choisis dans la base de données. Cette section permet de comprendre les propriétés des voyageurs qui optent pour le trajet le plus court.

Il est intéressant de noter que parfois l'absence de trajet plan B satisfaisant fait en sorte que l'utilisateur choisit le trajet le plus court par le simple fait qu'il n'y a pas d'autres options. C'est le cas pour

11,05% des trajets choisis. Donc, en effet, c'est le trajet le plus court, car il n'y a pas d'autre option de trajet, tel que présenté dans la revue de littérature.

La Figure 4.2 permet d'analyser, selon l'âge et le sexe, les types de personnes optant pour le trajet PCC parmi les options. Il est possible de remarquer des pourcentages plus élevés pour le groupe des usagers de 70 à 79 ans.

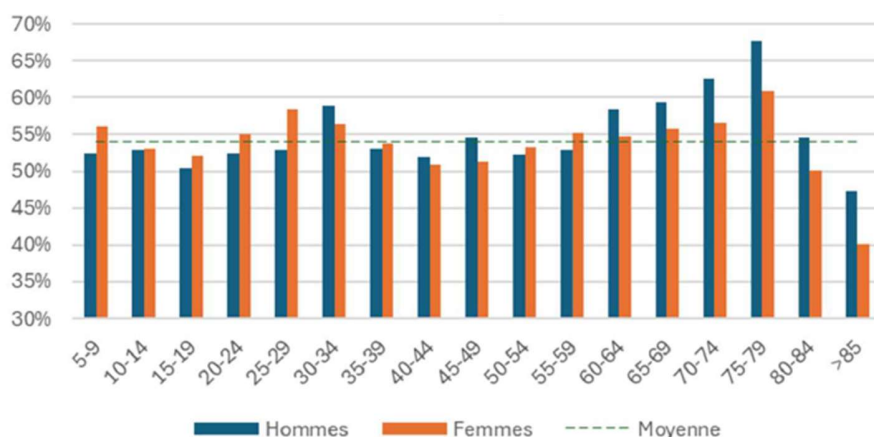


Figure 4.2: Pourcentage des hommes et femmes optant pour le trajet PCC selon l'âge

Le Tableau 4.1 démontre, pour chaque motif, le taux de trajet PCC. L'analyse des motifs suggère que le magasinage est le motif pour lequel les gens optent le plus souvent pour le trajet le plus court. Ceci peut être dû au fait que pour se rendre à des destinations de magasinage, il y a moins d'alternatives de trajet donc les usagers n'auront pas d'autre choix que de prendre le chemin le plus court. En effet, il est possible que pour certaines paires OD, il n'y ait qu'une seule alternative possible, ce qui lui attribue automatiquement le trajet le plus court. Le réseau de TC est centré autour des déplacements travail et étude principalement aux heures de pointe. Pour les motifs comme le travail et les études, une variété d'alternatives est disponible pour se rendre aux destinations, ceci peut expliquer les pourcentages plus bas. Comme il y a plusieurs alternatives, les usagers peuvent choisir celle qui leur convient en prenant compte des facteurs impactant le choix de trajet.

Tableau 4.1: Part des déplacements PCC pour chaque motif

Motif	% trajet le plus court
Travail	52,6 %
Étude	52,5 %
Loisir	60,2 %
Magasinage	61,6 %

L'analyse des statuts des usagers du Tableau 4.2 permet d'observer que les retraités sont ceux qui utilisent le plus souvent le chemin le plus court, tandis que les étudiants et les travailleurs temps plein sont ceux qui utilisent le moins souvent le chemin le plus court. L'analyse des statuts est reliée à l'analyse des motifs. En effet, il se peut que le même phénomène se produise ici. Les hauts taux d'utilisation du trajet le plus court pour les retraités et les travailleurs à temps partiel peuvent être dus au fait que pour se rendre à leurs destinations, il y a moins d'alternatives de trajet donc les usagers n'auront pas d'autre choix que de prendre le chemin le plus court. En effet, il est possible que pour certaines paires OD, il n'y ait qu'une seule alternative possible, ce qui lui attribue automatiquement le trajet le plus court.

Tableau 4.2: Part des déplacements PCC pour chaque statut

Statut	% trajet le plus court
Travailleur temps plein	53,5 %
Travailleur temps partiel	56,9 %
Étudiant	53,5 %
Retraité	57,6 %

Dans le Tableau 4.3, la possession du permis de conduire semble corrélée au choix du trajet le plus court. En effet, selon l'analyse, les trajets les plus courts sont plus souvent effectués par des gens qui ont le permis de conduire.

Tableau 4.3: Part des déplacements PCC selon la possession du permis de conduire

Possession du permis	% trajet le plus court
Oui	55,55 %
Non	50,81 %

4.1.1.2 Analyse des trajets pas plus courts choisis (PPCC)

La catégorie PPCC représente 46 % des trajets choisis dans la base de données. Cette section analyse les différences entre le trajet choisi pas plus court (PPCC) et le trajet plus court pas choisi (PCPC). L'analyse permet de comprendre pourquoi un trajet qui n'a pas le temps le plus court est choisi (PPCC) plutôt que le chemin ayant le temps le plus court (PCPC).

La Figure 4.3 démontre que 12,9 % des trajets choisis durent au moins 10 minutes de plus que le trajet le plus court.

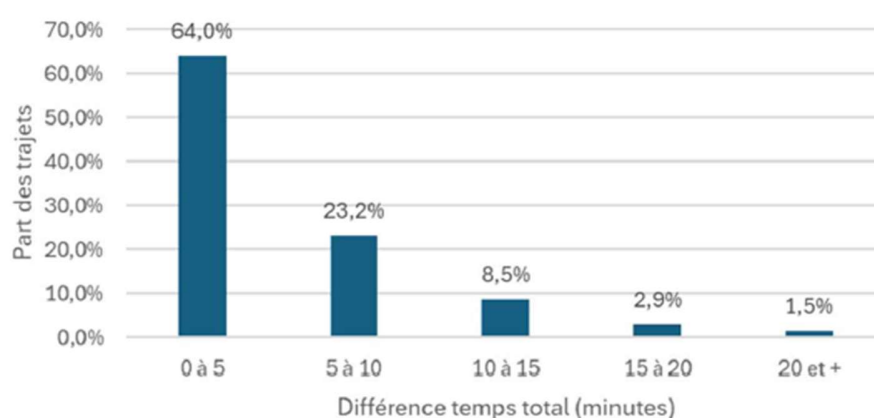


Figure 4.3: Différence de temps total entre le trajet PPCC et le trajet PCPC

Dans la Figure 4.4, il est possible d'observer que 55,35 % des trajets choisis ont moins de correspondances que le trajet le plus court. Les correspondances sont un facteur important dans le choix d'un trajet, en effet, dans 55,35 % des cas, l'utilisateur a préféré allonger son temps de trajet pour avoir moins de correspondance.

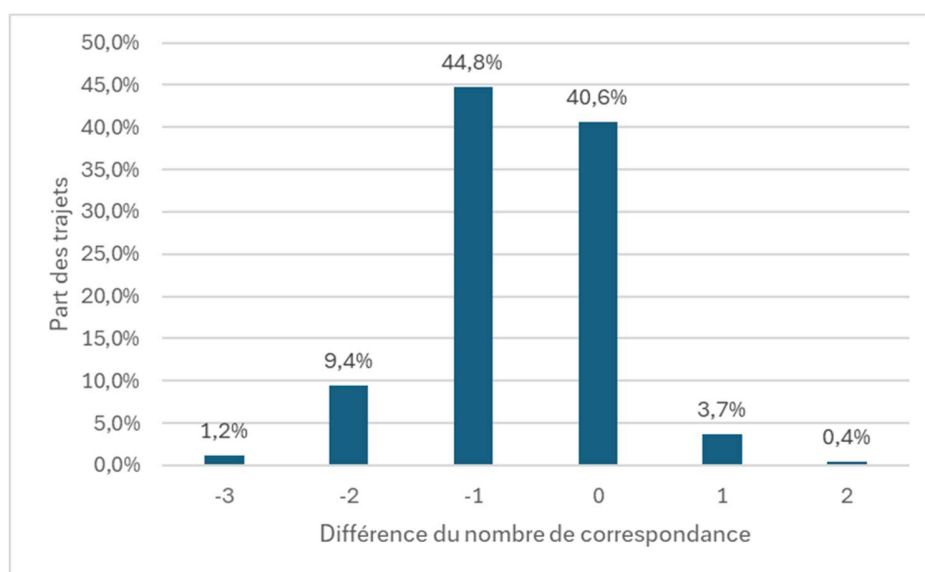


Figure 4.4 : Différence du nombre de correspondances entre le trajet PPCC et le trajet PCPC

La Figure 4.5 démontre que 4,6 % des trajets choisis présentent un temps d'accès de 5 à 15 minutes plus court que celui du trajet le plus court.

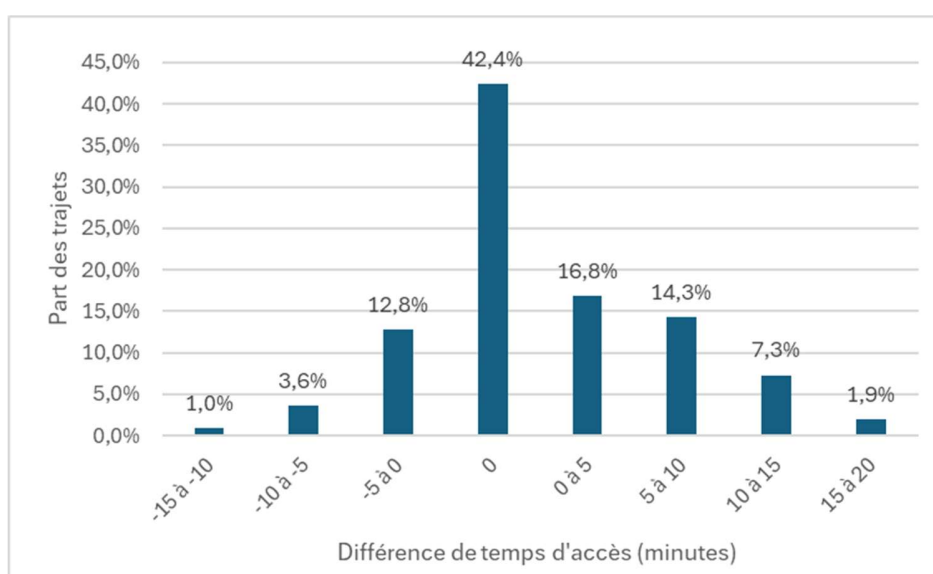


Figure 4.5: Différence de temps d'accès entre le trajet PPCC et le trajet PCPC

En observant la Figure 4.6, il est possible de voir que 9,7 % des trajets choisis présentent un temps de sortie de 10 à 20 minutes plus long que celui du trajet le plus court.

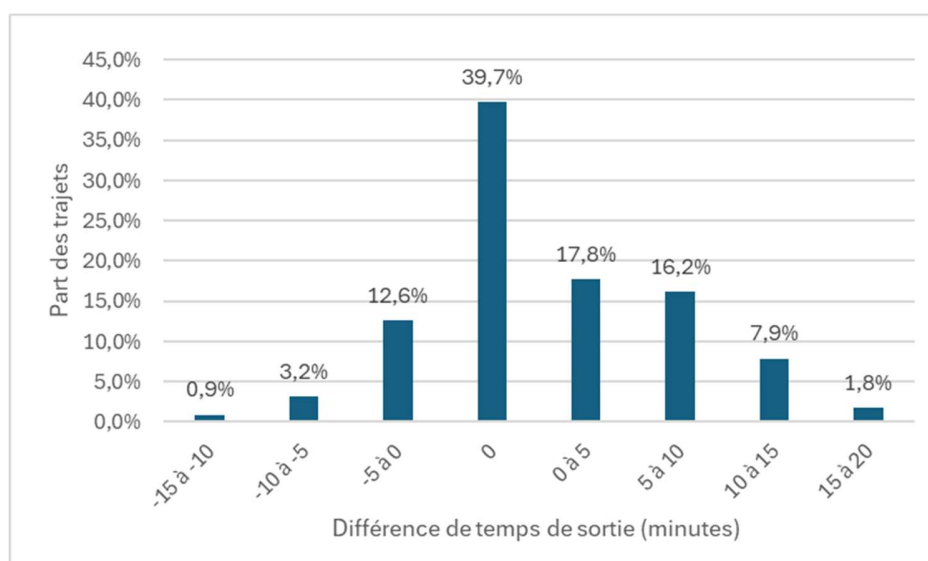


Figure 4.6: Différence de temps de sortie entre le trajet PPCC et le trajet PCPC

En observant la Figure 4.7, il est possible de remarquer que 24,8 % des trajets choisis ont un temps en véhicule de 5 à 25 minutes plus long que le trajet le plus court.

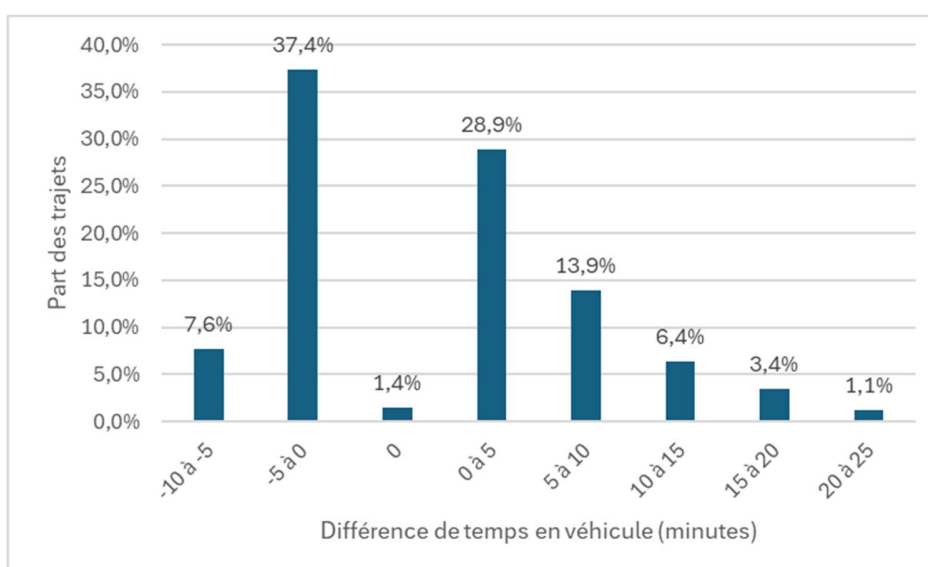


Figure 4.7: Différence de temps en véhicule entre le trajet PPCC et le trajet PCPC

Dans le Tableau 4.4, la possession du permis de conduire est corrélée avec le choix du trajet le plus court. Ici, 49,19 % des gens n'ayant pas de permis n'ont pas choisi le chemin le plus court.

Tableau 4.4: Part des déplacements PPCC selon la possession du permis de conduire

Possession du permis	% trajet pas le plus court
Oui	44,45 %
Non	49,19 %

4.1.1.3 Analyse des trajets plus courts pas choisis (PCPC)

Cette section analyse les caractéristiques des trajets plus courts pas choisis (PCPC). Ceci permet de dresser un profil de ces trajets qui ne sont pas choisis malgré le fait qu'ils ont le temps le plus court.

Dans la Figure 4.8, les trajets plus courts pas choisis (PCPC) ont la majorité des temps de déplacements qui se situent entre 21 à 50 minutes. Environ 2 % des trajets PCPC durent 81 minutes et plus.

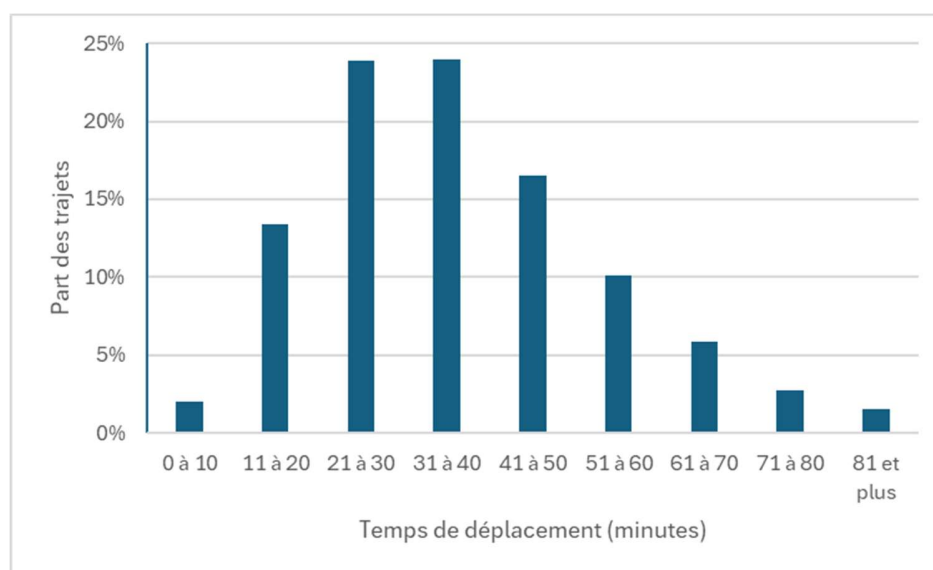


Figure 4.8: Part des déplacements PCPC selon le temps de déplacement

La Figure 4.9 démontre qu'environ 42 % des trajets PCPC ont une correspondance. Environ 18 % des trajets PCPC n'ont pas de correspondance. Ceci signifie que pour ces trajets le nombre de correspondances et le temps de déplacement sont des facteurs moins importants dans le choix du trajet pour ces scénarios. Environ 40 % des trajets PCPC ont deux correspondances ou plus.

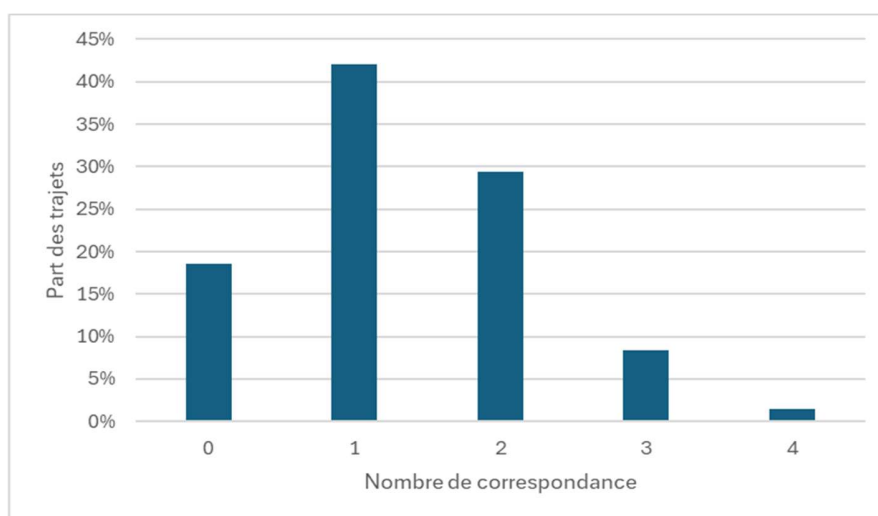


Figure 4.9: Part des déplacements PCPC selon le nombre de correspondances

Les temps d'accès et de sortie ont des distributions assez similaires dans la Figure 4.10. La majorité des trajets PCPC ont des temps de sortie ou d'accès qui durent entre 0 à 5 minutes. Ceci signifie que le temps d'accès et de sortie ne sont pas des facteurs importants dans ces scénarios.

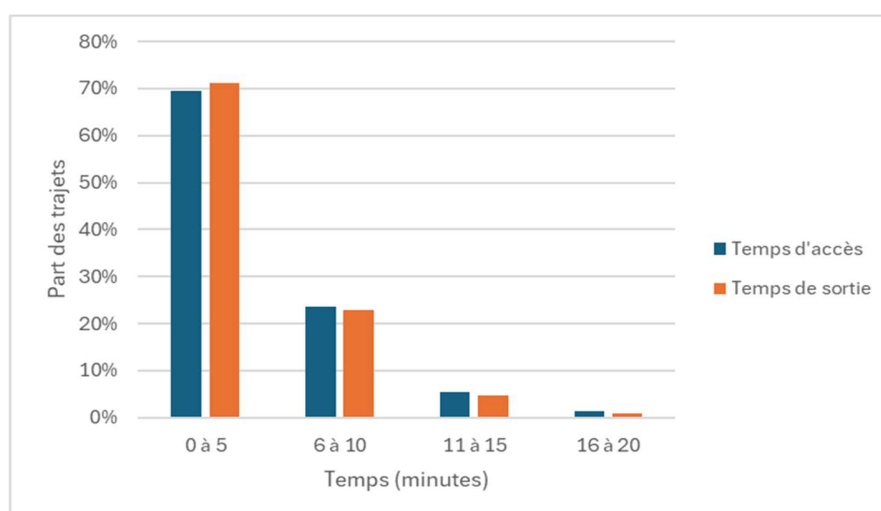


Figure 4.10: Part des déplacements PCPC selon le temps d'accès et de sortie

4.1.1.4 Comparaison des sous-ensembles PCC et PPCC

Dans cette section, les sous-ensembles de données PCC et PPCC, soit les trajets plus courts choisis (PCC) et les trajets pas plus courts choisis (PPCC) sont comparés. Les données sociodémographiques sont analysées dans le Tableau 4.5.

En observant le Tableau 4.5, il est possible de remarquer que les cases surlignées en vert ont des valeurs supérieures à la moyenne, soit de l'ensemble des trajets choisis (PCC+PPCC). Le sous-ensemble PCC a un âge moyen plus élevé, c'est-à-dire que les gens qui choisissent le trajet le plus court parmi les alternatives ont un âge plus élevé en moyenne. Le sous-ensemble PCC contient le plus haut taux de trajets pour les motifs loisir et magasinage. Ceci peut être dû au fait que pour se rendre à des destinations de loisir et de magasinage, il y a moins d'options de trajet, comparativement aux trajets de travail et d'études. Le sous-ensemble PCC contient aussi le plus de personnes retraitées et fait augmenter la moyenne du groupe PCC+PPCC.

Tableau 4.5: Comparaison des sous-ensembles de trajet PCC et PPCC

		PCC+PPCC	PCC	PPCC
Genre	Homme	45,1 %	44,8 %	45,3 %
	Femme	54,9 %	55,2 %	54,7 %
Age moyen	Age moyen	35,98	36,17	35,76
Permis de conduire	Possède le permis	70,3 %	72,2 %	68,2 %
	Ne possède pas le permis	29,7 %	27,8 %	31,8 %
Motif	Travail	50,4 %	49,0 %	52,1 %
	Étude	30,8 %	29,9 %	31,9 %
	Loisir	11,1 %	12,3 %	9,6 %
	Magasinage	7,7 %	8,8 %	6,5 %
Occupation principale	Travailleur temps plein	50,8 %	50,4 %	51,3 %
	Travailleur temps partiel	5,2 %	5,4 %	4,8 %
	Étudiant	36,5 %	36,1 %	36,9 %
	Retraité	7,6 %	8,1 %	7,0 %

4.1.1.5 Comparaison des sous-ensembles PCC, PPCC et PCPC

Dans cette section, les sous-ensembles de données PCC, PPCC et PCPC, soit les trajets plus courts choisis (PCC), les trajets pas plus courts choisis (PPCC) et les trajets plus courts pas choisis (PCPC) sont comparés. Il est donc important de s'assurer que les différences entre les trois groupes sont statistiquement significatives. Donc, des tests statistiques sont effectués en parallèle des analyses. Pour les variables continues (temps d'accès, de sortie, etc.) l'analyse de la variance (ANOVA) est effectuée tandis que pour les variables discrètes/catégorielles, le test du chi-carré d'indépendance est utilisé. Les données associées aux trajets sont analysées dans le Tableau 4.6.

En observant le Tableau 4.6, il est possible de remarquer que les cases surlignées en vert sont associées à des valeurs plus élevées que l'ensemble complet des trajets (PCC+PPCC+PCPC). Il est intéressant de remarquer que le groupe PCPC a un nombre de correspondances moyen plus élevé que les deux autres groupes. En effet, le groupe PCPC représente les trajets plus courts pas choisis, le fait d'avoir un nombre de correspondance plus élevé dissuade les usagers à utiliser ces types de trajets. Le groupe des trajets pas plus courts choisis (PPCC) a des temps d'accès et de sortie moyens plus longs que les autres groupes. Le groupe des trajets plus courts pas choisis (PCPC) a un temps d'attente en correspondance moyen plus long, ceci est un autre facteur qui dissuade les usagers d'utiliser ces trajets.

Tableau 4.6: Comparaison des sous-ensembles de trajets PCC, PPCC et PCPC

	PCC+PPCC+PCPC	PCC	PPCC	PCPC
Vitesse moyenne (km/h)	12,82	14,19	11,25	12,79
Temps de déplacement moyen	36,29	30,78	41,24	37,69
Nombre de correspondances moyen	0,83	0,51	0,64	1,33
Temps d'accès moyen	5,62	4,95	7,06	5,03
Temps de sortie moyen	5,56	4,87	7,13	4,87
Temps d'attente en correspondance moyen	2,68	1,68	2,61	3,79

Les graphiques suivants contiennent les trois courbes des trois sous-ensembles et permettent de les comparer. La Figure 4.11 permet de démontrer le profil de temps des trajets. L'ensemble des trajets plus courts choisis (PCC) ont effectivement généralement des temps de déplacement plus courts. Une bonne portion des trajets PCC a un temps très court. Les temps de déplacement des trois sous-ensembles ne suivent pas des distributions normales tel que déduit par la Figure 4.11, en effet, les distributions sont très asymétriques. Le test global Kruskal-Wallis est donc utilisé afin de démontrer la différence des trois sous-ensembles (plutôt que l'ANOVA) et est présenté en ANNEXE .

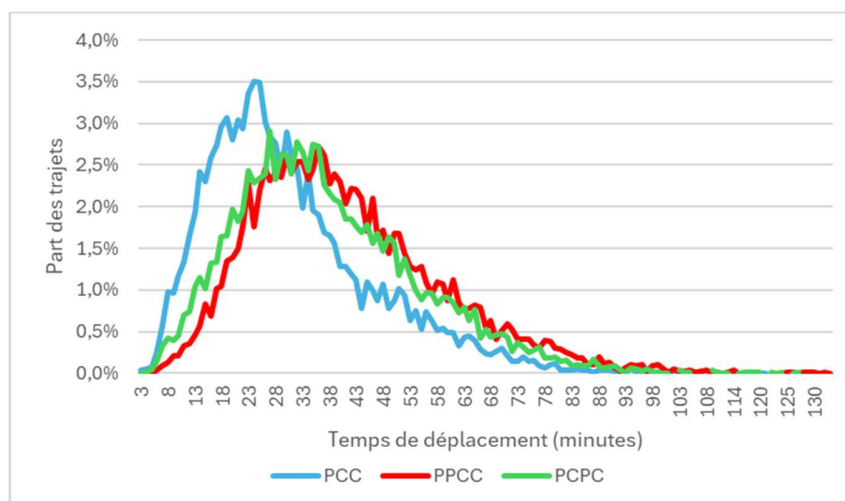


Figure 4.11: Temps de déplacements des sous-ensembles PCC, PPCC, PCPC

En observant la Figure 4.12, il est possible de voir que le sous-ensemble PCPC, soit les trajets plus courts non choisis a généralement plus de correspondance que les autres sous-ensembles. Ceci est intéressant car cela démontre que les trajets ayant beaucoup de correspondances seront moins souvent choisis. Les correspondances représentent un facteur à diminuer le plus possible. Le nombre de correspondances est une variable discrète donc le test du khi-carré est utilisé afin de démontrer la différence des trois sous-ensembles et est présenté en ANNEXE .

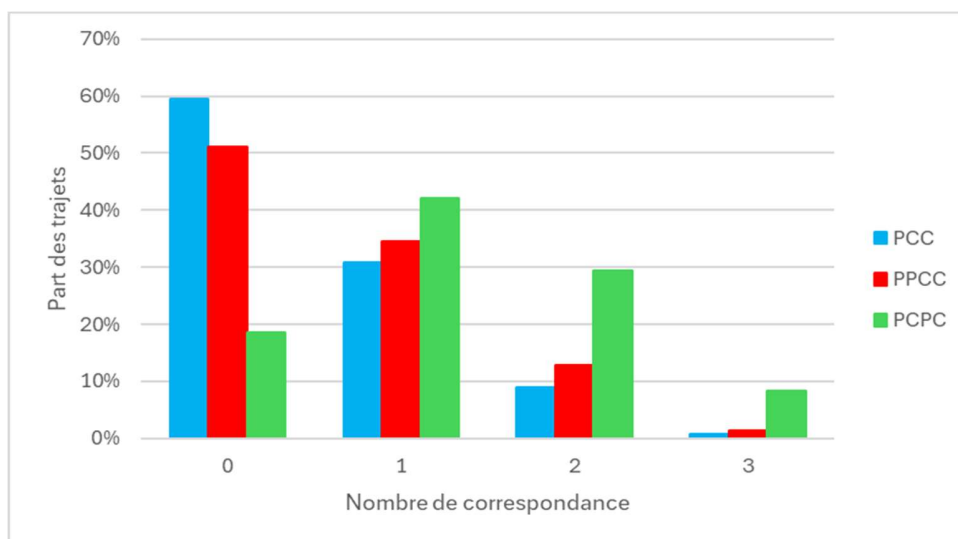


Figure 4.12: Nombre de correspondance des sous-ensembles PCC, PPCC, PCPC

La Figure 4.13 démontre que les trajets plus courts choisis (PCC) et les trajets plus courts pas choisis (PCPC) ont des profils de temps d'accès assez similaires. Le sous-groupe PPCC, soit les trajets pas plus courts choisis, a plus fréquemment des temps d'accès élevés. Les temps d'accès des trois sous-ensembles ne suivent pas des distributions normales tel que déduit par la Figure 4.13, en effet, les distributions sont très asymétriques. Le test global Kruskal-Wallis est donc utilisé afin de démontrer la différence des trois sous-ensembles (plutôt que l'ANOVA) et est présenté en ANNEXE .

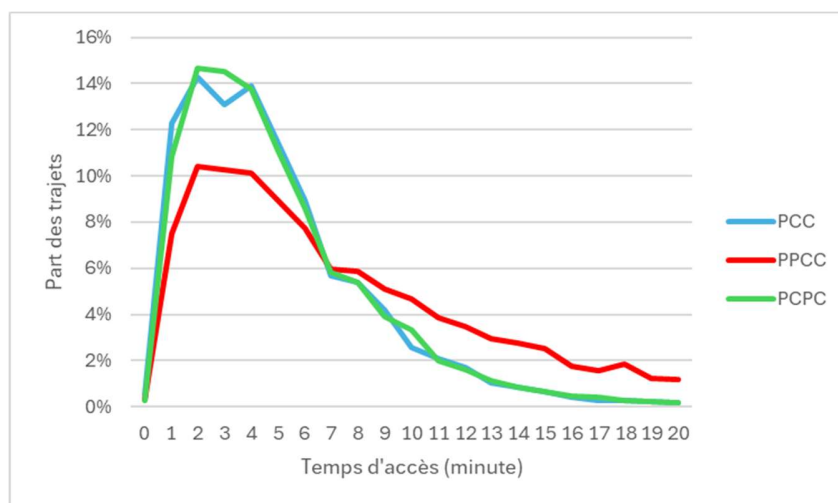


Figure 4.13: Temps d'accès des sous-ensembles PCC, PPCC, PCPC

La Figure 4.14 démontre que les trajets plus courts choisis (PCC) et les trajets plus courts pas choisis (PCPC) ont des profils de temps de sortie assez similaires. Le sous-groupe PPCC, soit les trajets pas plus courts choisis, a plus fréquemment des temps de sortie élevés. Les temps de sortie des trois sous-ensembles ne suivent pas des distributions normales tel que déduit par la Figure 4.14, en effet, les distributions sont très asymétriques. Le test global Kruskal-Wallis est donc utilisé afin de démontrer la différence des trois sous-ensembles (plutôt que l'ANOVA) et est présenté en ANNEXE .

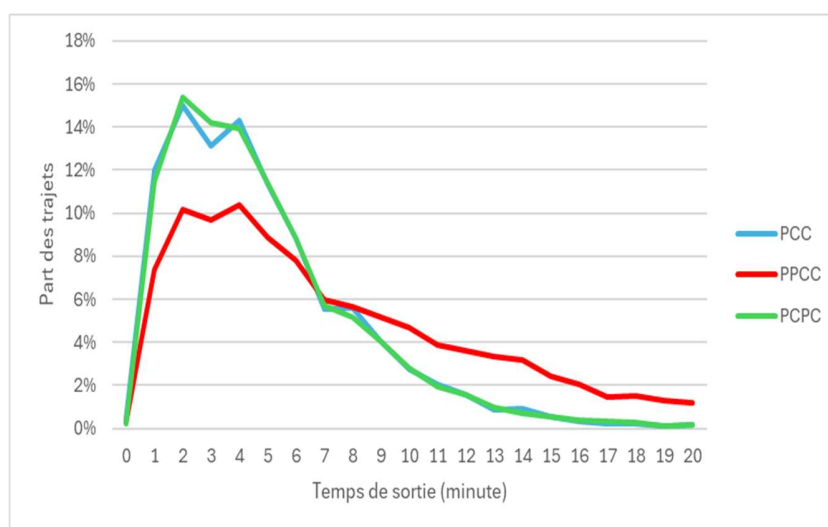


Figure 4.14: Temps de sortie des sous-ensembles PCC, PPCC, PCPC

La Figure 4.15 permet de démontrer que le sous-ensemble des trajets pas plus courts choisis (PPCC) a plus fréquemment des vitesses plus basses que les deux autres sous-ensembles. La vitesse est une variable discrète donc le test du khi-carré est utilisé afin de démontrer la différence des trois sous-ensembles et est présenté en ANNEXE .

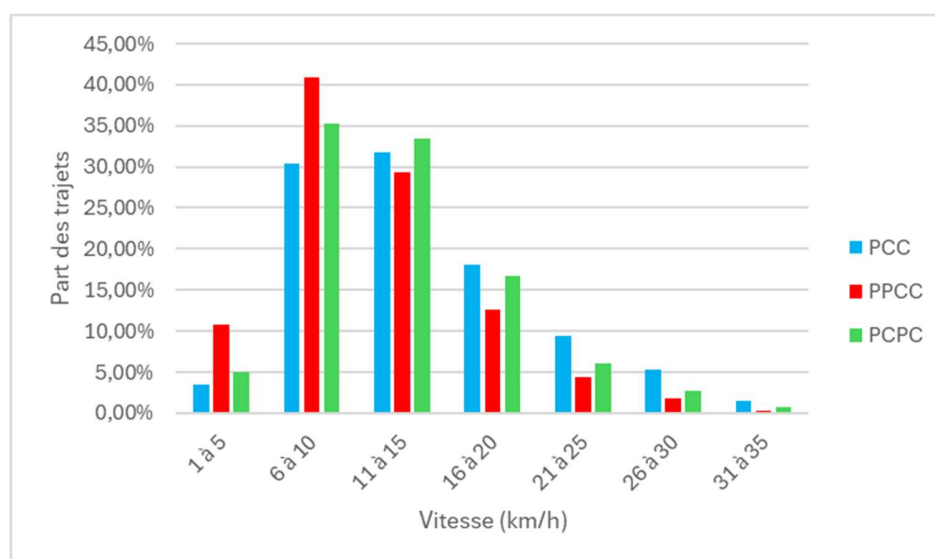


Figure 4.15: Vitesse des sous-ensembles PCC, PPCC, PCPC

La Figure 4.16 démontre que les trois sous-ensembles ont des temps d'attente en correspondance assez similaires. Le sous-ensemble des trajets plus courts non choisis (PCPC) se démarque pour

les temps d'attente en correspondance de 8 minutes et moins. Les temps d'attente en correspondance des trois sous-ensembles ne suivent pas des distributions normales tel que déduit par la Figure 4.16, en effet, les distributions sont très asymétriques. Le test global Kruskal-Wallis est donc utilisé afin de démontrer la différence des trois sous-ensembles (plutôt que l'ANOVA) et est présenté en ANNEXE .

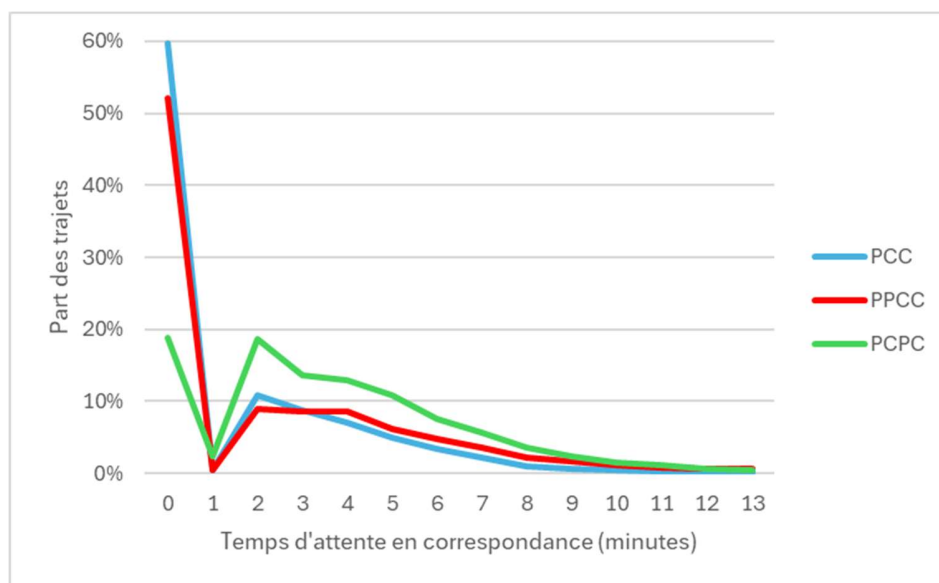


Figure 4.16: Temps d'attente en correspondance des sous-ensembles PCC, PPCC, PCPC

4.1.2 Représentation des trajets

La représentation des trajets créée en analysant directement les trajets choisis de la base de données est représentée. La démarche pour obtenir cette représentation est expliquée plus haut dans le rapport.

La Figure 4.17 représente les trajets choisis qui ne sont pas plus les courts. Il est important de mentionner que les trajets choisis n'ayant pas le temps le plus court qui représente 46 % des trajets choisis sont utilisés dans cette analyse. Les trajets choisis n'ayant pas le temps le plus court sont comparés aux alternatives ayant le temps le plus court pour les mêmes paires OD.

Le premier embranchement indique que 55 % des trajets choisis ont moins de correspondance que les alternatives ayant le temps le plus court. Ceci indique que pour une bonne quantité de trajets, le nombre de correspondances a un impact plus important que le temps de déplacement total. De plus,

le fait que le nombre de correspondances soit le premier embranchement démontre que c'est le facteur le plus important parmi les trois qui sont étudiés.

La section la plus importante avec 18 % des trajets représente les trajets qui ont moins de correspondance, un temps d'accès égal et un temps de sortie plus long que l'alternative ayant le temps total le plus court.

La section la plus petite avec 0,13 % des trajets représente les trajets qui ont plus de correspondance, un temps d'accès plus long et un temps de sortie plus long que l'alternative ayant le temps total le plus court. Ce choix semble être associé à d'autres critères.

Le scénario le plus avantageux avec 0,90 % des trajets représente les trajets qui ont moins de correspondance, un temps d'accès plus court et un temps de sortie plus court que l'alternative ayant le temps total le plus court mais demeurent plus longs que le plus court chemin.

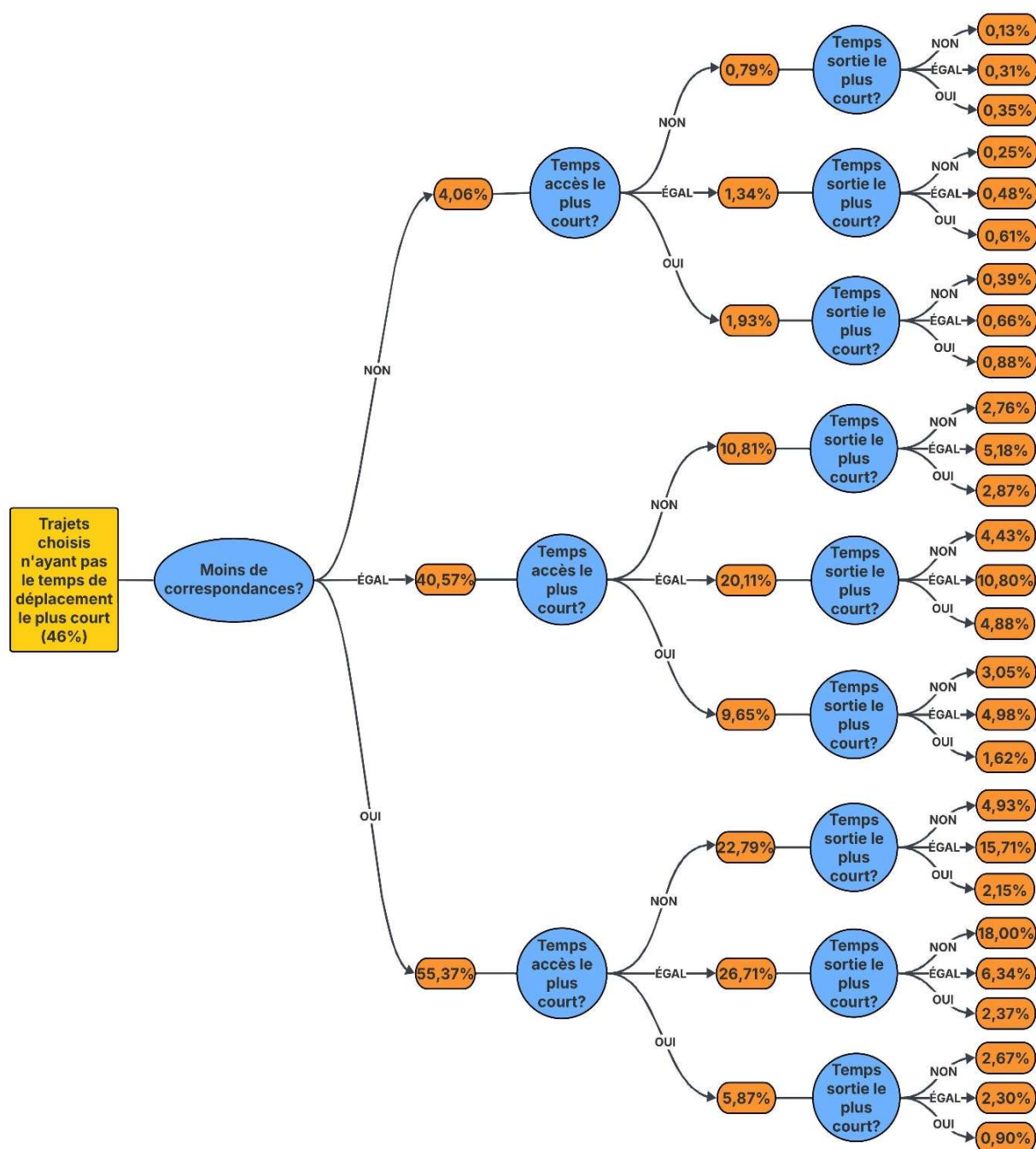


Figure 4.17: Représentation des trajets n'ayant pas le temps le plus court

4.1.3 Analyse des vitesses théoriques

Tous les trajets ainsi que les alternatives, c'est-à-dire toutes les alternatives pour chaque paire OD, sont étudiés dans cette section. L'objectif de cette section est d'évaluer la présence de trajets plans B potentiels et d'évaluer leur qualité à l'aide de seuils de vitesse théorique.

Dans la Figure 4.18, tous les trajets ainsi que les alternatives sont analysés. Il est possible de remarquer qu'il y a un nombre élevé de trajets pour lesquels la vitesse théorique n'atteint pas 10 km/h, en particulier pour le motif magasinage avec 62 %. Pour les motifs étude et loisir, environ 41 % et 47 % des paires OD n'ont aucune alternative qui respecte le seuil de 10 km/h. En général, les paires OD pour le motif travail ont plus d'alternatives qui respectent ce seuil, ceci est normal puisque le système de transport a une bonne offre pour les trajets en heure de pointe qui partent et qui vont vers le centre-ville, là où il y a une grande concentration d'emplois et d'opportunités.

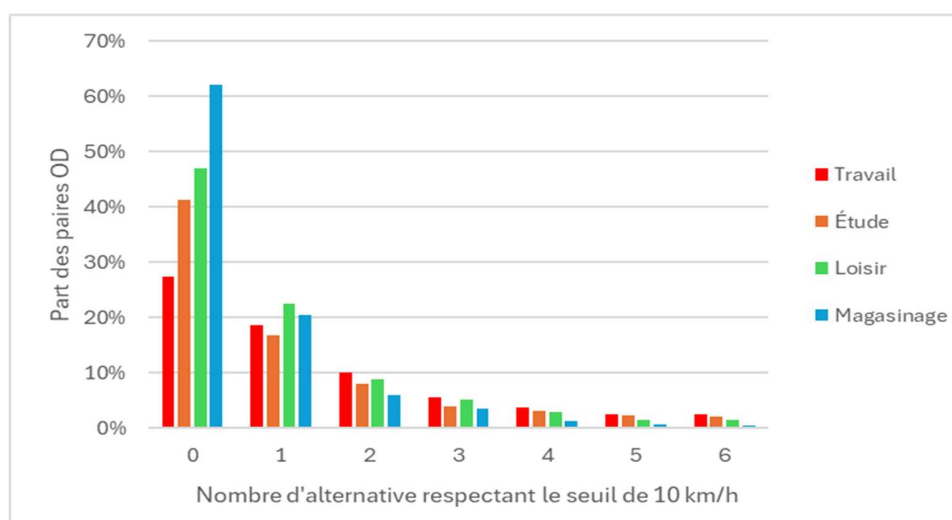


Figure 4.18 : Pourcentage de paires OD selon le nombre d'alternatives respectant le seuil de 10 km/h

Dans la Figure 4.19, tous les trajets ainsi que les alternatives sont analysés. Pour ce qui est du seuil de 6 km/h, puisque le seuil s'est détendu, il y a plus d'alternatives qui respectent le seuil pour tous les motifs. En effet, pour le motif magasinage, la part des paires OD qui n'ont aucune alternative respectant le seuil a diminué de 40 %. En comparant cette figure à celle du seuil de 10 km/h, les pourcentages pour 1 à 6 alternatives respectant le seuil ont augmenté. Le pourcentage pour 0 alternative respectant le seuil a diminué. Ce sont toujours les trajets avec le motif travail qui sont les mieux desservis.

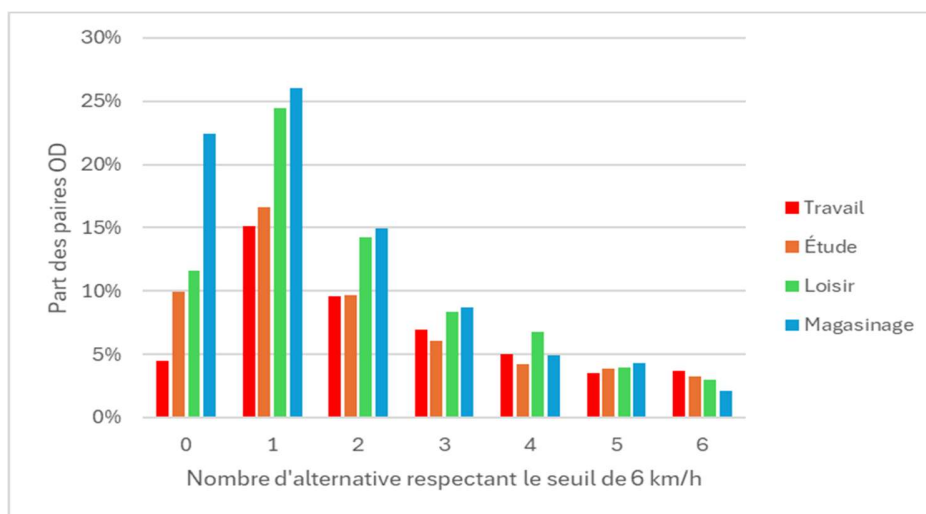


Figure 4.19: Pourcentage de paires OD selon le nombre d'alternatives respectant le seuil de 6 km/h

Dans la Figure 4.20, tous les trajets ainsi que les alternatives sont analysés. Les trois seuils comparent la différence entre la vitesse théorique de l'alternative par rapport au trajet ayant le temps le plus court. Un seuil de différence de 3 km/h sera donc plus tolérant qu'un seuil de différence 1 km/h. Il est donc normal que pour la section où il y a 4 à 6 trajets plans B potentiels ce soit le seuil de 3 km/h qui ait un plus haut taux de paires OD. À gauche, pour la section où il n'y a aucun trajet plan B potentiel, c'est le seuil de différence de 1 km/h qui domine, cependant, la tendance s'inverse graduellement avec le seuil de différence de 3 km/h.

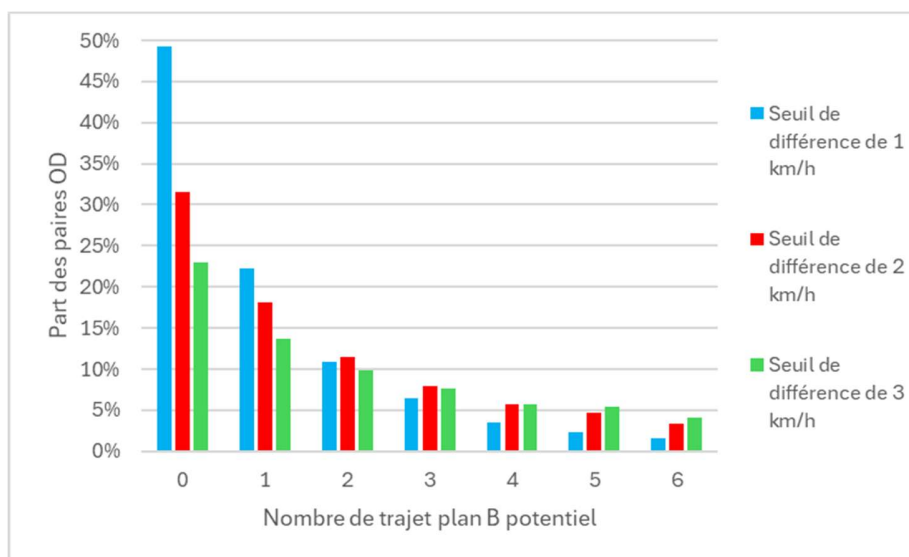


Figure 4.20: Part des paires OD selon le nombre de trajets plan B potentiel pour trois seuils

Dans le Tableau 4.7, tous les trajets ainsi que les alternatives sont analysés. Pour le seuil de différence de 1 km/h, les motifs loisir et magasinage ont le plus de paires OD qui n'ont aucun trajet plan B potentiel. Ceci vient compléter le résultat démontré plus tôt à savoir que les motifs loisir et magasinage sont ceux qui prennent le plus souvent le trajet ayant le temps le plus court. En fait, des déplacements pour ces deux motifs n'ont souvent pas de plan B.

En observant Tableau 4.7, il est possible de remarquer qu'encore une fois, les motifs loisir et magasinage sont ceux qui n'ont le plus souvent aucun trajet plan B potentiel. De plus, les pourcentages ont diminué d'un seuil à l'autre. Plus le seuil de différence de vitesse se détend, plus il y a de plans B potentiels.

En analysant Tableau 4.7, il est possible de constater que les motifs loisir et magasinage sont ceux qui n'ont le plus souvent aucun trajet plan B potentiel. Entre le cas où il n'y a aucun trajet plan B potentiel et le cas où il y a un seul trajet plan B potentiel, les taux ont généralement diminués de la moitié.

Tableau 4.7: Part des paires OD selon le nombre de trajets plan B pour seuil de différence de 1, 2 et 3 km/h

Nombre de plans B	%											
	Travail			Étude			Loisir			Magasinage		
	1 km/h	2 km/h	3 km/h	1 km/h	2 km/h	3 km/h	1 km/h	2 km/h	3 km/h	1 km/h	2 km/h	3 km/h
0	49 %	32 %	24 %	46 %	27 %	19 %	53 %	36 %	27 %	55 %	37 %	26 %
1	22 %	18 %	14 %	21 %	16 %	11 %	22 %	18 %	15 %	21 %	19 %	15 %
2	11 %	11 %	9 %	12 %	11 %	10 %	11 %	12 %	11 %	9 %	12 %	13 %
3	7 %	8 %	7 %	7 %	8 %	7 %	5 %	7 %	7 %	5 %	7 %	8 %

Dans le Tableau 4.8, tous les trajets ainsi que les alternatives sont analysés. En comparant les seuils de 6 km/h et 10 km/h, il est possible de constater que les pourcentages n'ont pas beaucoup changé. C'est seulement pour la section où il n'y a aucun trajet plan B potentiel qu'il y a eu un changement considérable. En effet, pour le seuil de 10 km/h, qui est plus sévère, les pourcentages sont plus élevés, souvent plus que 50 %. Cependant, pour le seuil de 6 km/h, les pourcentages de paires OD n'ayant pas de trajet plan B potentiel ont beaucoup diminué.

Tableau 4.8 : Part des paires OD selon le nombre de trajets plan B pour seuil de 6 et 10 km/h

Nombre de plans B	%							
	Travail		Étude		Loisir		Magasinage	
	6 km/h	10 km/h	6 km/h	10 km/h	6 km/h	10 km/h	6 km/h	10 km/h
0	20 %	46 %	27 %	58 %	36 %	69 %	48 %	83 %
1	10 %	10 %	10 %	8 %	14 %	9 %	15 %	6 %
2	7 %	6 %	6 %	4 %	8 %	5 %	9 %	4 %
3	5 %	4 %	4 %	3 %	7 %	3 %	5 %	1 %

Dans la Figure 4.21, seulement les trajets plus courts choisis sont analysés. Puisque les trajets plus courts choisis sont les plus avantageux, il est intéressant de voir combien de ces trajets PCC ne répondent pas à un seuil de vitesse minimale de 10 km/h. Environ 24 % des trajets PCC de motif

travail ne respectent pas le seuil de vitesse théorique de 10 km/h. Pour le motif étude, le taux de trajets PCC ne respectant pas le seuil de 10 km/h s'élève à environ 37 %. Pour les motifs loisir et magasinage, les taux de trajets PCC ne respectant pas le seuil s'élèvent respectivement à 42 % et 57 %.

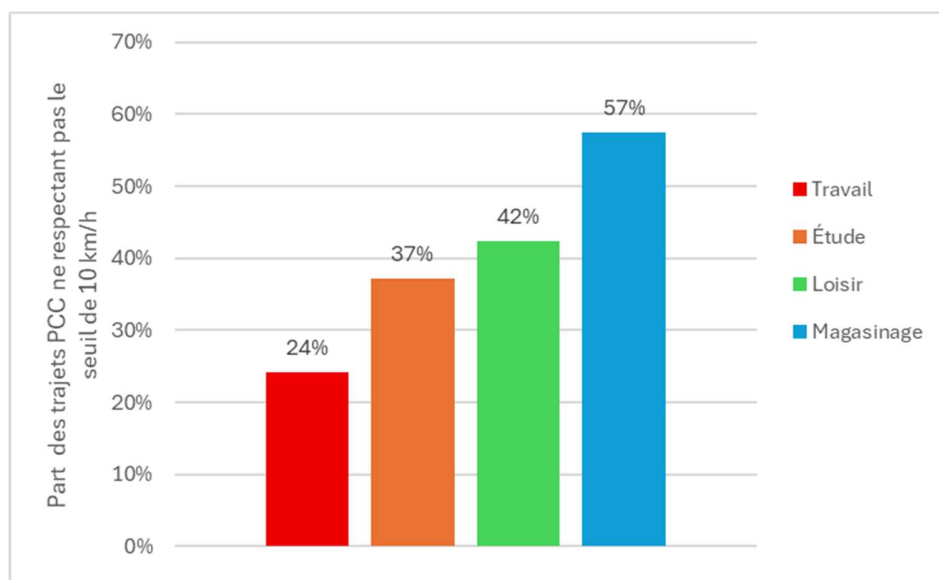


Figure 4.21: Pourcentage des trajets PCC ne respectant pas le seuil de 10 km/h selon le motif

Dans la Figure 4.22, seulement les trajets plus courts choisis sont analysés. Ceci permet d'observer quelle portion des trajets PCC ne respecte pas le seuil minimal de vitesse de 6 km/h. Le seuil de vitesse théorique a baissé à 6 km/h ce qui va permettre d'avoir plus de trajets qui respectent le seuil. Environ 4 % des trajets PCC de motif travail ne respectent pas le seuil de vitesse théorique de 6 km/h. Pour le motif étude, le taux de trajets PCC ne respectant pas le seuil de 6 km/h s'élève à environ 9 %. Pour les motifs loisir et magasinage, les taux de trajets PCC ne respectant pas le seuil s'élèvent respectivement à 10 % et 19 %. Les taux de trajet qui ne respectent pas le seuil de 6 km/h ont beaucoup descendu comparativement au seuil de 10 km/h.

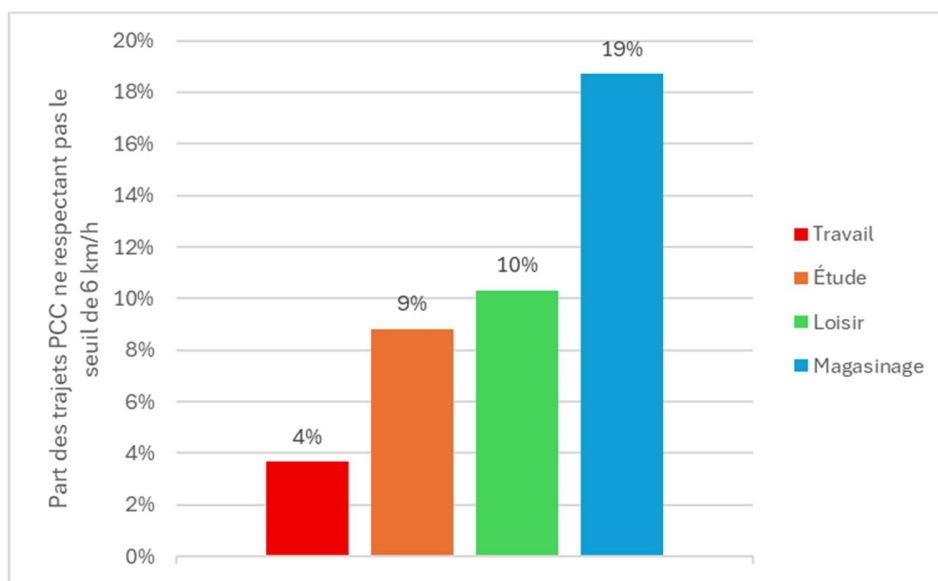


Figure 4.22: Pourcentage des trajets PCC ne respectant pas le seuil de 6 km/h selon le motif

Sur la Figure 4.23, tous les trajets choisis sont étudiés. Les pics des heures de pointe sont bien évidents. Aux heures de pointe, les vitesses théoriques augmentent considérablement. Les vitesses théoriques prennent en compte tout le temps nécessaire pour effectuer un déplacement. Ceci inclut donc les temps de correspondance et les temps d'attente. En dehors des heures de pointe, les fréquences de passage diminuent, ce qui fait augmenter les temps de correspondance et d'attente. En conséquence, ceci fait diminuer les vitesses théoriques. Au contraire, durant les heures de pointe, les fréquences de passage augmentent, les temps de correspondance et d'attente sont plus courts et les vitesses théoriques augmentent. Les courbes de vitesses élevées ont de plus hauts taux de trajet autour des heures de pointe. Les courbes de vitesses faibles ont de plus hauts taux de trajets entre les deux pics des heures de pointe.

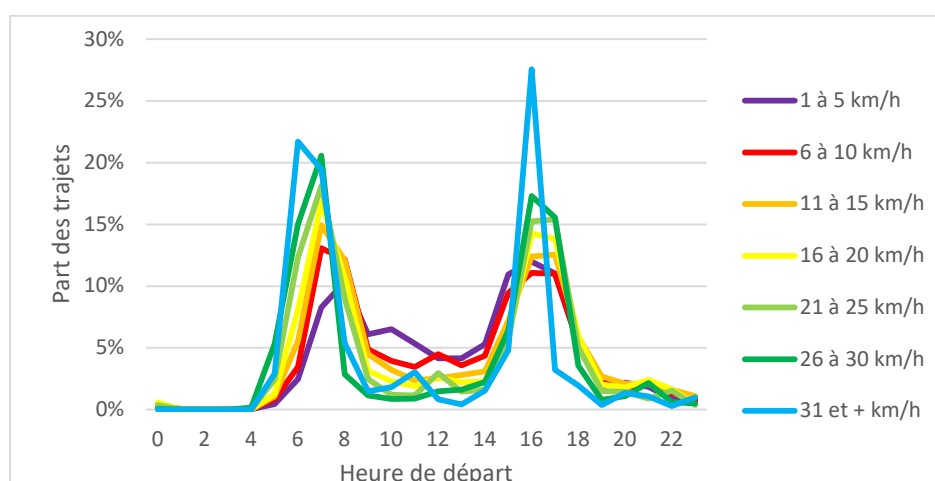


Figure 4.23: Part des trajets selon l'heure de départ et la vitesse théorique

4.1.4 Matrice Origine-Destination

Une analyse spatiale des trajets plus courts choisis (PCC) est aussi effectuée. Les huit régions d'origine ou de destination sont les suivantes :

1. Agglomération de Montréal – Centre-ville
2. Agglomération de Montréal – Centre
3. Agglomération de Montréal – Est
4. Agglomération de Montréal – Ouest
5. Agglomération de Longueuil
6. Laval
7. Couronne Nord
8. Couronne Sud

Dans le Tableau 4.9, les points d'origine et de destination du sous-ensemble PCC sont illustrés dans une matrice OD. Le code de couleur correspond au pourcentage des trajets du groupe PCC. Si la case est rouge, cela indique que le pourcentage de trajets effectués appartenant au groupe PCC est inférieur à 54 %. Si la case est verte, cela indique que le pourcentage de trajets effectués appartenant au groupe PCC est supérieur à 54 %. Si la case est jaune, cela indique que le pourcentage de trajet effectué appartenant au groupe PCC est de 54 %. Les cases blanches sont des cases qui ne contenaient pas assez de trajets pour être représentatives.

En observant la matrice OD, il est possible de remarquer que pour la majorité des paires OD ayant comme origine ou destination la région 1 (Agglomération Montréal – Centre-Ville), un haut pourcentage de trajets plus courts est choisi. Ceci peut être dû à une offre de TC plus développée au centre-ville de Montréal. En effet, puisque le centre-ville attire une grande quantité de personnes, l’offre de TC est variée, fréquente et dessert plusieurs zones.

La région 7 en origine et en destination a aussi un très grand taux de trajets plus courts choisis. Puisque la région 7 représente la Couronne Nord et qu’il y a une moins grande offre de TC, il est possible que ce phénomène se produise en raison du manque d’alternatives, en d’autres mots, en raison du manque de plan B. En effet, quand il n’y a pas beaucoup d’alternatives, le trajet choisi sera par défaut le trajet le plus court.

Pour les régions 3, 4 et 5, le taux de trajet plus court choisi est faible, plus bas que 54 %. Ceci peut démontrer une offre de TC moins développée dans les agglomérations de Montréal Est, Montréal Ouest et Longueuil que dans le centre-ville par exemple.

Tableau 4.9: Matrice OD de la part des trajets PCC

	1	2	3	4	5	6	7	8	Total général
1	64 %	58 %	59 %	56 %	40 %	69 %	73 %	45 %	57 %
2	59 %	53 %	43 %	47 %	46 %	53 %	67 %	60 %	54 %
3	56 %	47 %	55 %	21 %					52 %
4	57 %	50 %	29 %	47 %		38 %		34 %	50 %
5	41 %	46 %			48 %			46 %	45 %
6	63 %	52 %		40 %		54 %	63 %		56 %
7	71 %	76 %				47 %	72 %		71 %
8	40 %	44 %		41 %	51 %			77 %	46 %
Total général	57 %	54 %	51 %	49 %	45 %	57 %	71 %	51 %	54 %

4.1.5 Analyse spatiale

L’analyse spatiale des trajets PCC ayant une vitesse théorique plus basse que 6 km/h et 10 km/h est présentée.

Dans la Figure 4.24, il est possible de remarquer que pour le seuil de vitesse de 6 km/h, une grande partie des trajets PCC ont une distance à vol d’oiseau entre 500 m et 3000 m (74,2 %). Pour le seuil de 10 km/h, la majorité des trajets ont une distance entre 1000 m et 4500 m (61,4 %). Les

distributions des deux seuils de vitesse augmentent rapidement et diminuent peu à peu alors que la distance augmente.

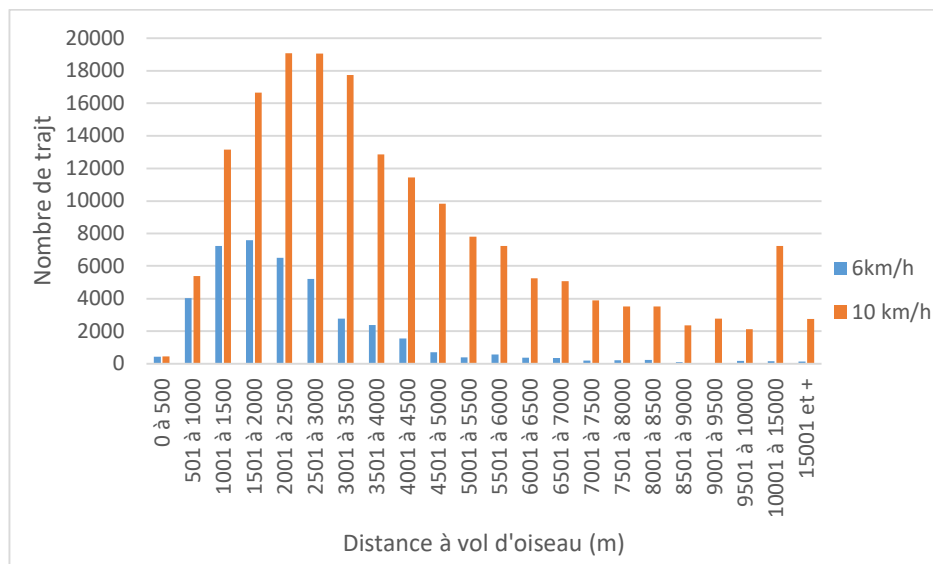


Figure 4.24: Trajet PCC sous les seuils de vitesse théorique de 6 km/h et 10 km/h selon leur distance à vol d'oiseau

La Figure 4.25 permet d'observer le nombre de lignes TC utilisées selon la distance du trajet pour le seuil de 10 km/h. Pour les trajets de plus courte distance, la majorité des trajets utilisent une ou deux lignes de TC. Plus la distance augmente, plus le nombre de lignes utilisées augmente. De plus, puisqu'il y a plus de trajets dans cet ensemble de données, les résultats sont plus variés que pour l'ensemble de données avec le seuil de 6 km/h. En effet, pour les trajets de 20 km et plus, le nombre de lignes utilisées est partagé entre 1, 2, 3 et 4 lignes de TC.

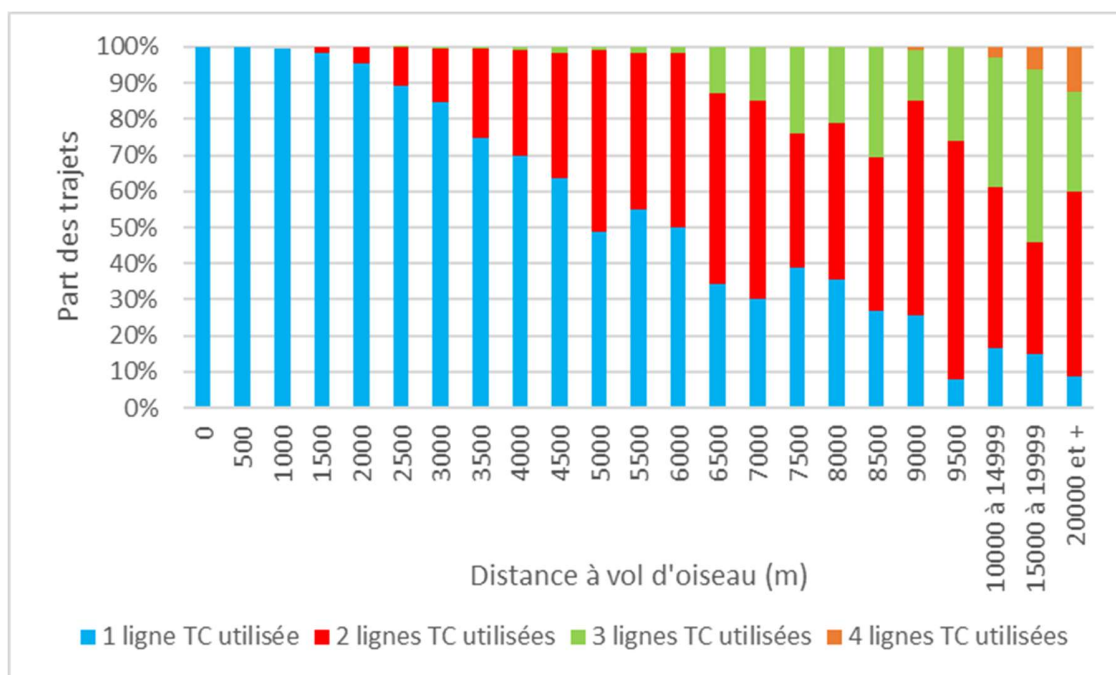


Figure 4.25: Part des trajets PCC ayant une vitesse théorique plus basse que 10 km/h selon leur distance à vol d'oiseau et le nombre de lignes TC utilisées

La Figure 4.26 porte sur les trajets PCC sous un seuil de vitesse de 6 km/h. Évidemment, l'ensemble de données est plus petit que le précédent, ce qui explique que les % soient moins variés. Les mêmes phénomènes que la Figure 4.25 peuvent être observés. En effet, les taux d'utilisation d'une ligne diminuent lorsque les distances augmentent. Les taux d'utilisation de deux lignes augmentent lorsque les distances augmentent, tandis que l'utilisation de trois lignes est présente à la fin de la distribution pour les distances les plus longues.

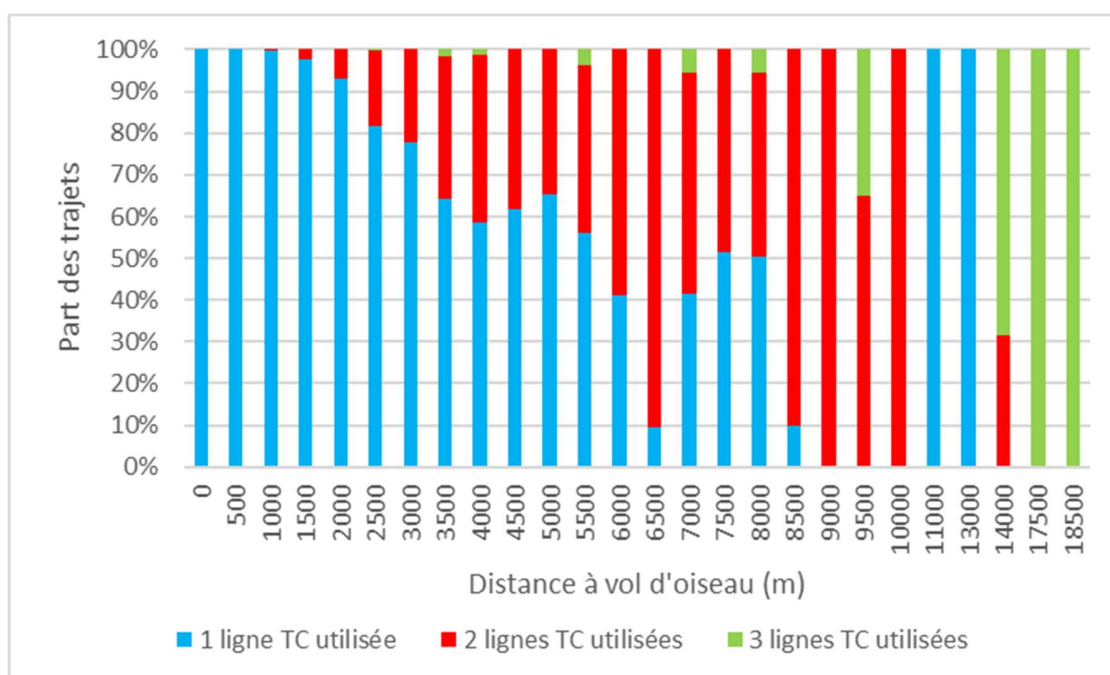


Figure 4.26: Part des trajets PCC ayant une vitesse théorique plus basse que 6 km/h selon leur distance à vol d'oiseau et le nombre de lignes TC utilisées

Par la suite, les deux ensembles de données ont été importés dans QGIS afin d'effectuer une analyse spatiale. Le nombre de lignes utilisées ainsi que la distance à vol d'oiseau sont les deux aspects au centre de cette analyse.

Dans la Figure 4.27, les lignes de désir sous le seuil de 6 km/h sont séparées par un code de couleur. Les lignes de désir bleues indiquent qu'une seule ligne de TC est utilisée. Le rouge indique l'utilisation de deux lignes de TC. Le vert indique l'utilisation de trois lignes de TC. La plupart des trajets utilisant trois lignes de TC sont sur l'île de Montréal. Ceci est probablement dû au fait qu'à Montréal, l'offre de TC contient des modes plus variés, des fréquences plus élevées et une connectivité des lignes plus facile. En banlieue, effectuer plusieurs correspondances peut s'avérer plus compliqué et peut prendre plus de temps.

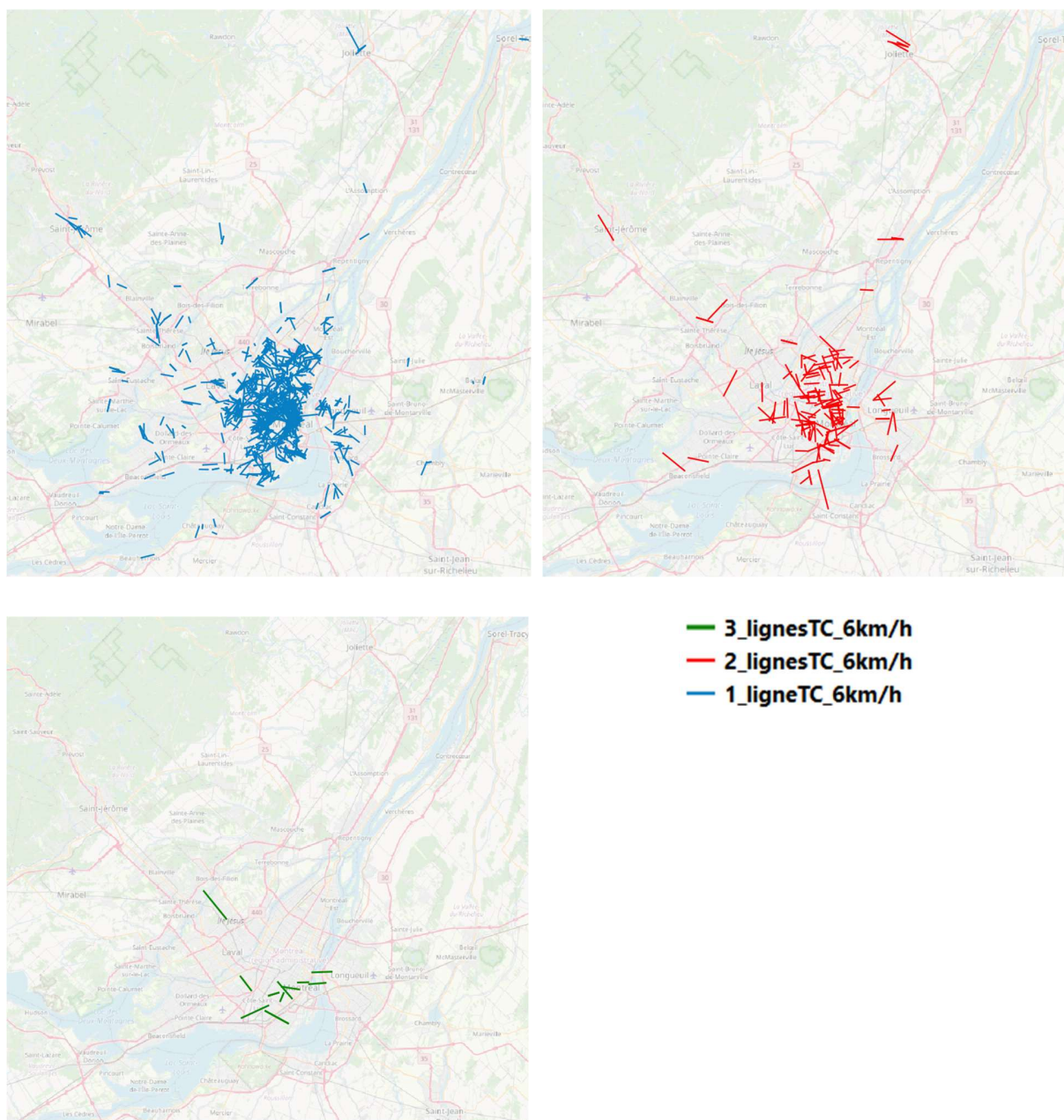


Figure 4.27: Lignes de désir des trajets PCC ayant une vitesse théorique plus basse que 6 km/h selon le nombre de lignes TC utilisées

L'ensemble de données étudié dans la Figure 4.28 contient les lignes de désir des trajets PCC sous le seuil de 10 km/h. Cet ensemble de données contient plus de trajets. Le code de couleur indique que les lignes de désir bleues utilisent qu'une seule ligne de TC. Le rouge indique l'utilisation de deux lignes de TC. Le vert indique l'utilisation de trois lignes de TC. Le jaune indique l'utilisation de quatre lignes de TC. Sur la Figure 4.28, les lignes de désir utilisant trois et quatre lignes de TC sont situées en majorité sur l'île de Montréal. Le phénomène expliqué précédemment est encore plus flagrant. En banlieue, faire de nombreuses correspondances engendre un coût généralisé beaucoup plus élevé. Les conditions de transport sont bien différentes en banlieue, ce qui peut décourager les usagers de faire certains trajets en transport public.

La Figure 4.29 illustre, à l'aide d'un code de couleur, les distances à vol d'oiseau des lignes de désir sous un seuil de 6 km/h. Les lignes de désir des trajets de moins d'un kilomètre sont situées à Montréal et à Laval à proximité des lignes de métro. Les lignes de désir des trajets entre 1 km et 6 km sont situées en majorité sur l'île de Montréal autour des lignes de métro. Les lignes de désir des trajets de 6 km et plus (en noir et en rose) sont éparpillées sur la grande région de Montréal.

La Figure 4.30 est illustrée à l'aide d'un code de couleur. Pour le seuil de 10 km/h, la quantité de lignes de désir a augmenté globalement dans la Figure 4.30. Les lignes de désir des trajets de 12 km et plus sont maintenant concentrées en majorité à Montréal et à Laval. Les lignes de désir des trajets généralement sont situées sur l'île de Montréal, mais les villes telles que Saint-Jérôme, Sainte-Thérèse, Longueuil et Joliette ressortent.

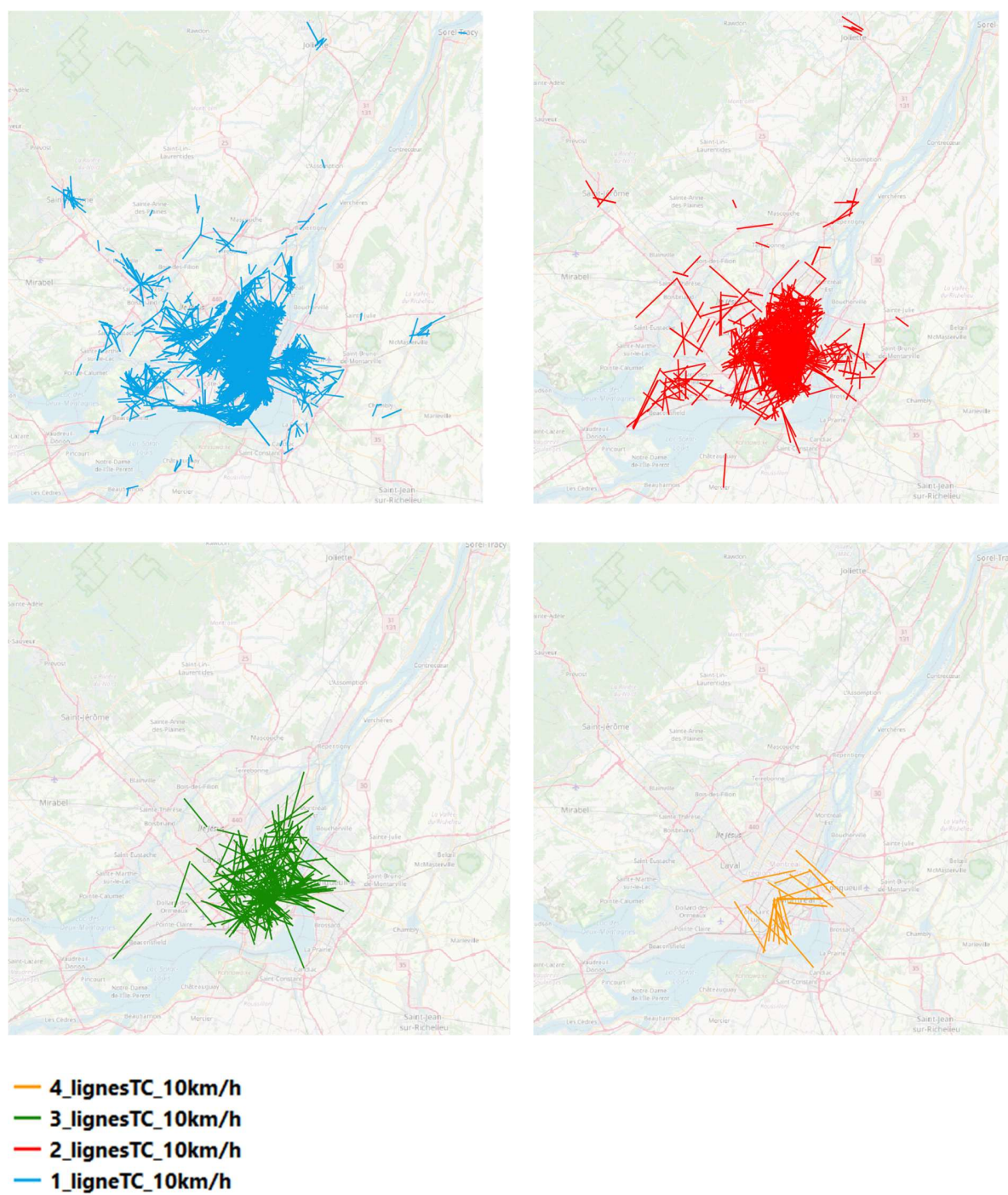


Figure 4.28: Lignes de désir des trajets PCC ayant une vitesse théorique plus basse que 10 km/h avec une ligne TC utilisée

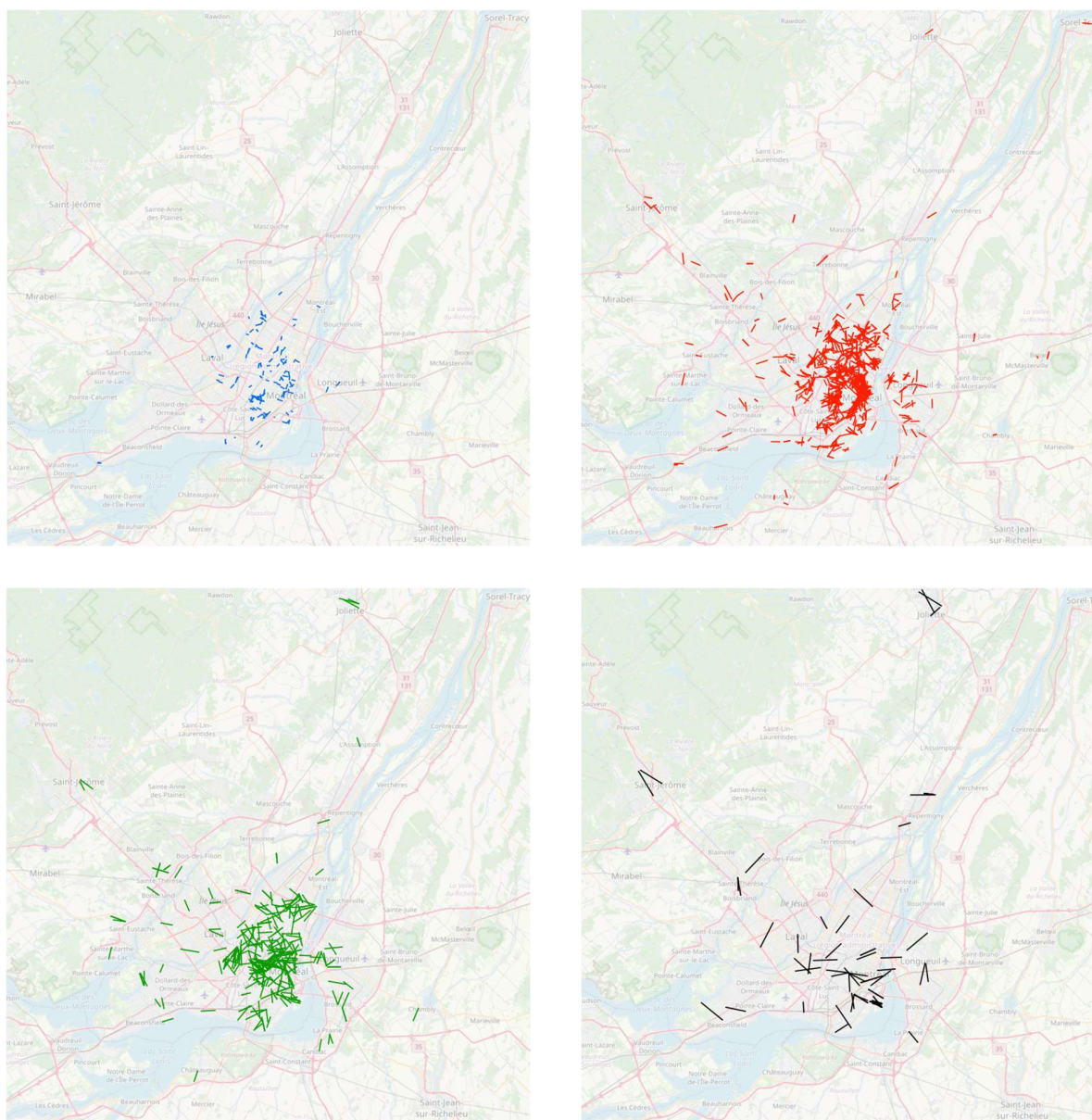


Figure 4.29: Lignes de désir des trajets PCC ayant une vitesse théorique plus basse que 6 km/h selon les distances à vol d'oiseau

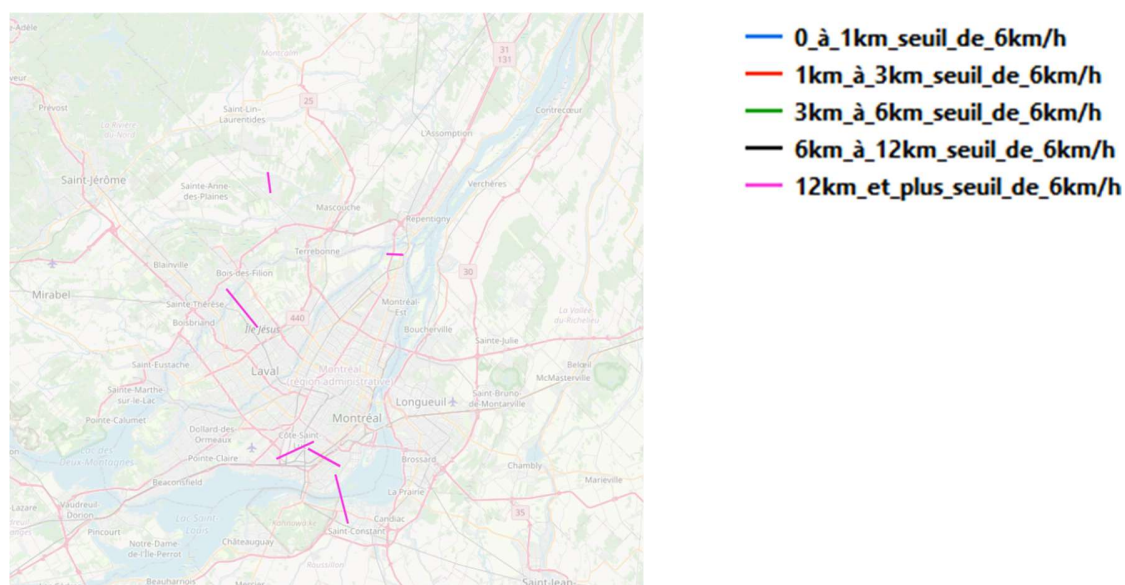


Figure 4.29 : Lignes de désir des trajets PCC ayant une vitesse théorique plus basse que 6 km/h selon les distances à vol d'oiseau (suite)

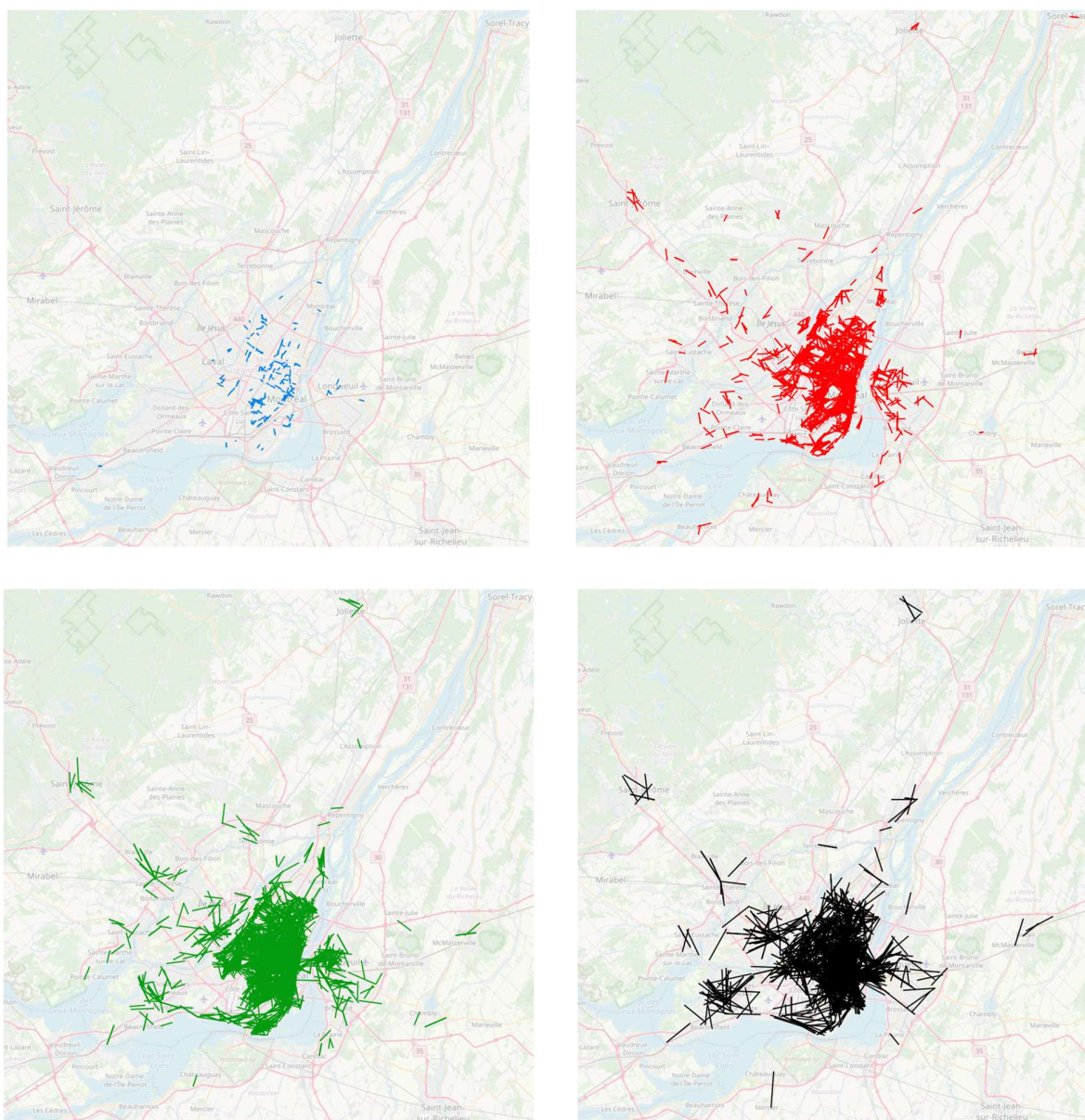


Figure 4.30: Lignes de désir des trajets PCC ayant une vitesse théorique plus basse que 10 km/h selon les distances à vol d'oiseau

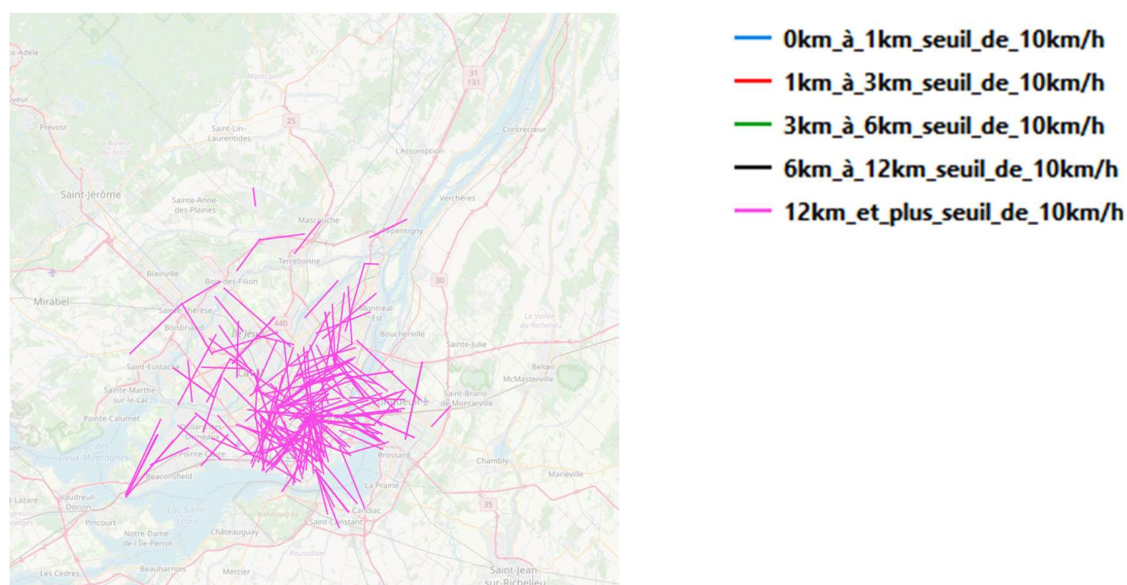


Figure 4.30 : Lignes de désir des trajets PCC ayant une vitesse théorique plus basse que 10 km/h selon les distances à vol d'oiseau (suite)

L'analyse TRACLU pour les trajets plus courts choisis ne respectant pas les deux seuils de vitesse, soit 6 et 10 km/h, est présentée ci-dessous.

Les analyses TRACLU contiennent les trajets PCC sous le seuil de vitesse de 6 km/h dans la Figure 4.31. Ce sous-ensemble représente 7,7 % des trajets PCC. En rouge sont illustrés les segments tandis que les corridors apparaissent en noir. Les corridors sont concentrés seulement sur l'île de Montréal. Plusieurs corridors sont situés autour de la station de métro Berri-UQAM et près de la station de métro Snowdon. En observant la carte, il est possible de remarquer que les lignes de métro représentent l'infrastructure de TC la plus utilisée à Montréal et donc auront plusieurs corridors TRACLU. Les autres corridors représentent des lignes de bus sur des axes populaires.

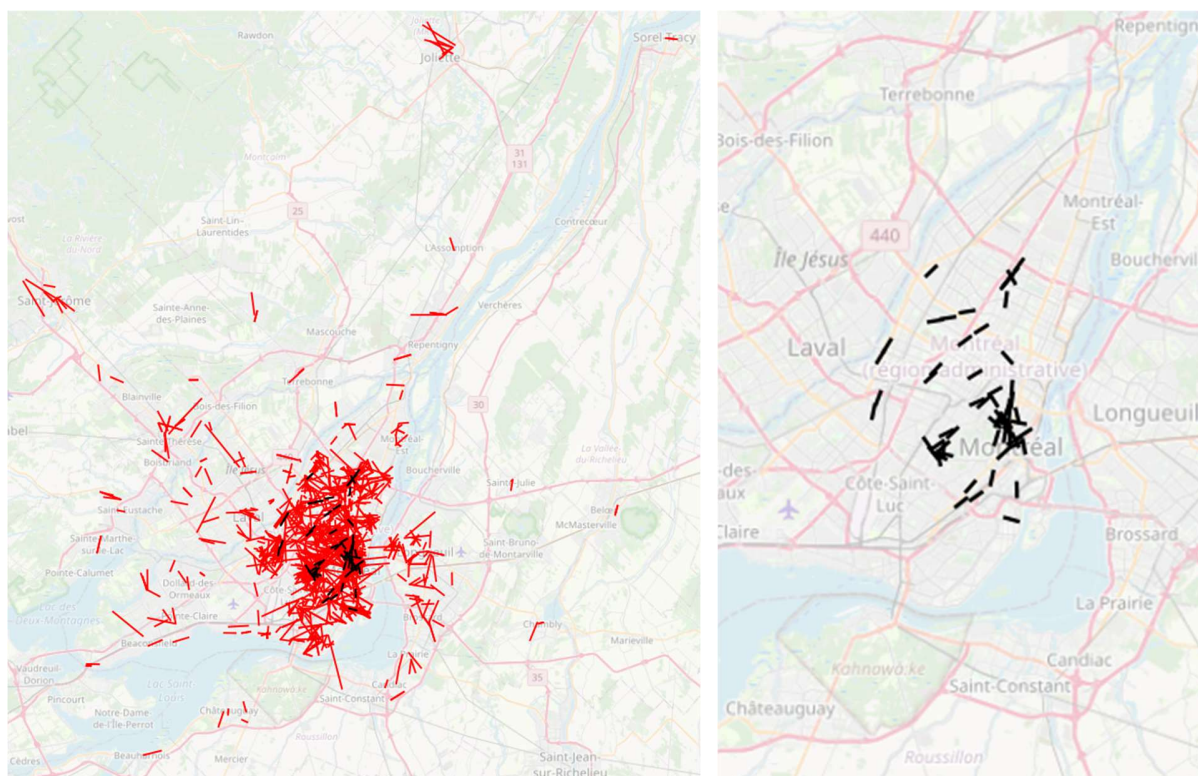


Figure 4.31: Carte des segments et corridors de l'analyse TRACLU pour les trajets PCC ayant des vitesses théoriques plus basses que 6 km/h

Les analyses TRACLU contiennent les trajets PCC sous le seuil de vitesse de 10 km/h dans les Figure 4.32. Ce sous-ensemble représente 34,2 % des trajets PCC. En rouge sont illustrés les segments tandis que les corridors apparaissent en noir. Encore une fois, les corridors sont concentrés seulement sur l'île de Montréal, là où le plus de déplacements en TC sont effectués. Plusieurs corridors sont situés autour de la station de métro Berri-UQAM, suivant le tracé de la ligne orange du métro. D'autres corridors sont situés près de la station de métro Snowdon et de la station Saint-Michel, toutes deux sur la ligne bleue du métro. Des corridors suivent aussi le tracé de la branche Est de la ligne orange du métro, des stations très populaires. Les lignes de métro représentent plusieurs corridors TRACLU car ce sont des infrastructures très importantes du système de transport du grand Montréal. Il est aussi important de mentionner les longs corridors TRACLU au nord de l'île de Montréal. Ces corridors englobent le boulevard Henri Bourassa qui traverse l'île de Montréal d'ouest en est ainsi que la ligne de train Exo en direction de Mascouche. Les autres corridors représentent des lignes de bus dans l'axe est-ouest de l'île de Montréal.

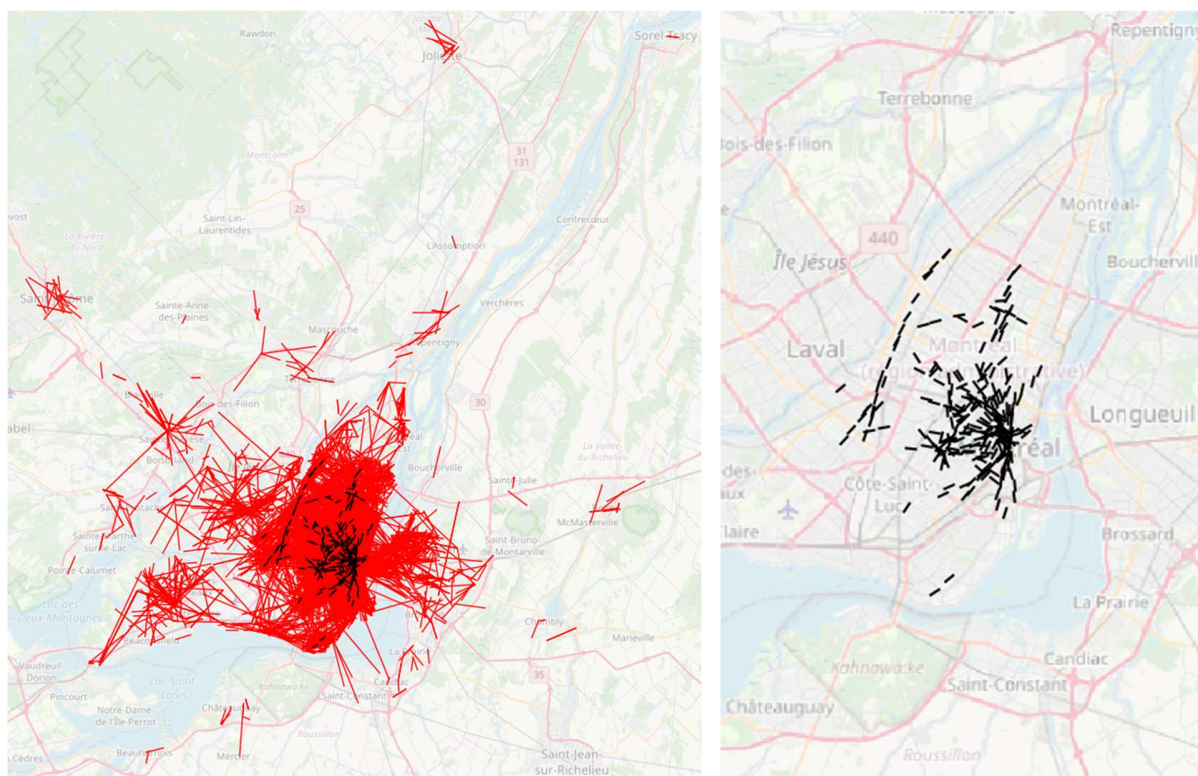


Figure 4.32: Carte des segments et corridors de l'analyse TRACLUSS pour les trajets PCC ayant des vitesses théoriques plus basses que 10 km/h

En comparant les Figure 4.31 et Figure 4.32, il est possible de remarquer que les segments ayant des vitesses plus basses que 10 km/h sont généralement plus longs et que des corridors se sont ajoutés dans l'arrondissement de LaSalle à Montréal et autour du Mont-Royal. En effet, en passant de la Figure 4.31 à la Figure 4.32, on observe une élongation des segments et une multiplication des corridors dans les zones de haute mobilité. De plus, la Figure 4.32 démontre de nouveaux segments dans les arrondissements banlieusards de l'ouest de la ville de Montréal. La Figure 4.32 comporte aussi de nouveaux segments dans les villes de Longueuil et de Laval, dans les zones où il y a des stations de métro qui se relient à Montréal. Dans ces zones, il y a une forte augmentation des segments qui partent de Laval ou Longueuil et traversent la rivière pour se rendre à Montréal, des trajets effectués principalement en métro. Ces deux analyses permettent de constater qu'il y a environ 7,7 % des trajets PCC qui ne respectent pas le seuil de vitesse de 6 km/h et que 34,2 % des trajets PCC ne respectent pas le seuil de vitesse de 10 km/h.

4.2 Analyse des logiques liées au choix de trajet

Le choix de trajet de TC englobe l'analyse des arbres de décision ainsi que l'équation de coût généralisé.

4.2.1 Arbres de décision

Dans les arbres de décision, les facteurs qui ont le plus d'impact et qui sont intégrés sont :

1. la différence du temps en véhicule
2. la différence du temps d'accès
3. la différence du temps de sortie
4. la différence du nombre de correspondances.

Dans les Figure 4.33, Figure 4.34, Figure 4.35, Figure 4.36 et Figure 4.37, les trajets choisis n'ayant pas le temps de parcours le plus court sont comparés à l'alternative ayant le temps le plus court.

L'arbre de décision dans la Figure 4.33 prend en compte tous les motifs (travail, étude, loisir et magasinage) et est créé à l'aide du logiciel RStudio. Le premier embranchement est le nombre de correspondances, ce qui est également le cas pour la représentation des trajets présenté précédemment. La première et la quatrième feuille représentent chacune 13 % des trajets choisis totaux et ont donc un poids significatif. La première feuille indique qu'environ le tiers des trajets choisis, qui ne sont pas le plus court chemin, ont un nombre de correspondances plus faible et un temps de sortie plus élevé ou égal. La quatrième feuille indique que 13 % des trajets choisis ont un nombre de correspondances plus élevé ou égal et un temps en véhicule plus élevé ou égal. La troisième feuille a le poids le plus faible de l'arbre. En effet, ceci indique que 4 % des trajets choisis ont moins de correspondances, un temps de sortie plus court, un temps d'accès plus court et un temps en véhicule qui dure au moins 3,1 minutes en plus que le trajet le plus court.

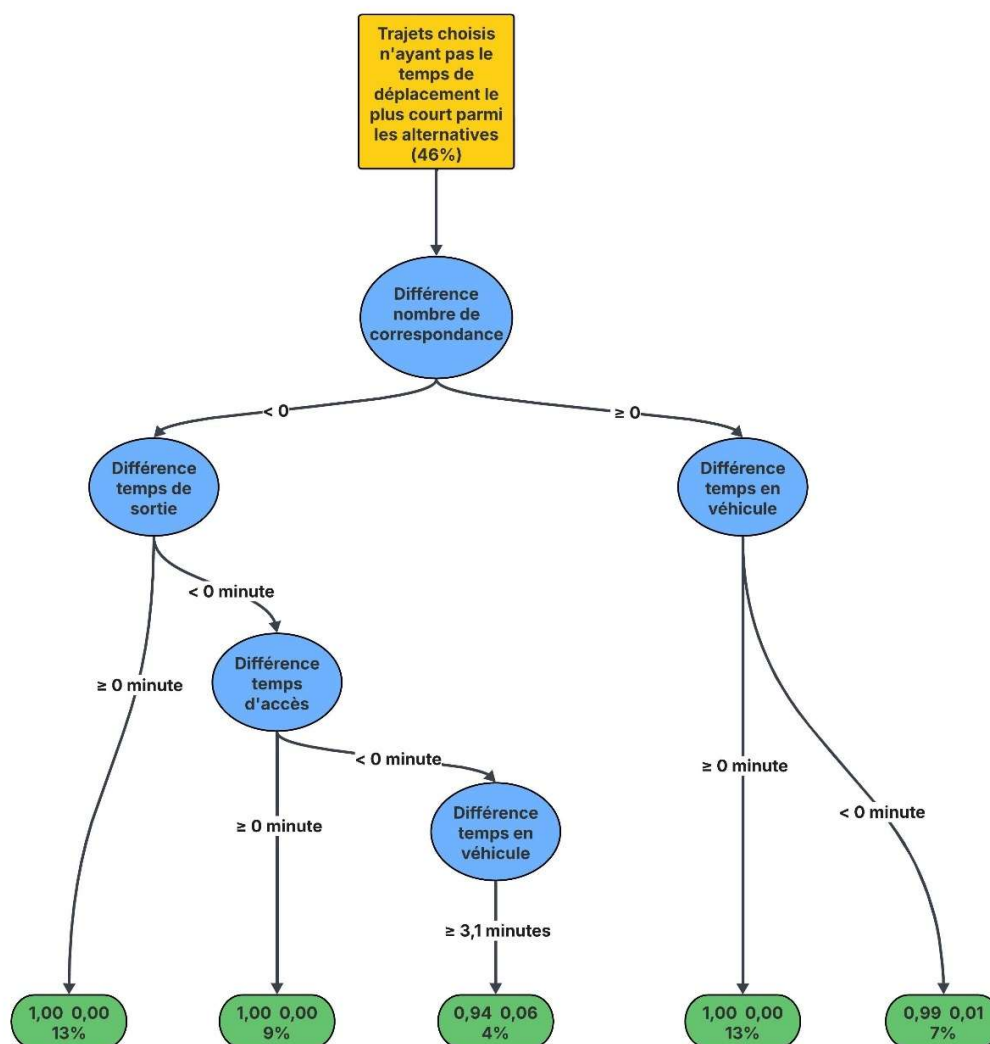


Figure 4.33: Arbre de décision tous motifs

L'arbre de décision dans la Figure 4.34 prend en compte seulement les déplacements pour le travail. Cet arbre est assez similaire au précédent pour tous les motifs. Il y a une augmentation de 4 % du poids de la première feuille. En effet, cette feuille passe de 13 à 17 %. Les trajets choisis n'ayant pas le temps de déplacement le plus court pour le motif travail mettent donc une grande importance sur le nombre de correspondances et le temps de sortie. Pour cette feuille, le nombre de correspondances est plus bas et le temps de sortie est plus élevé ou égal au trajet ayant le temps total le plus court.

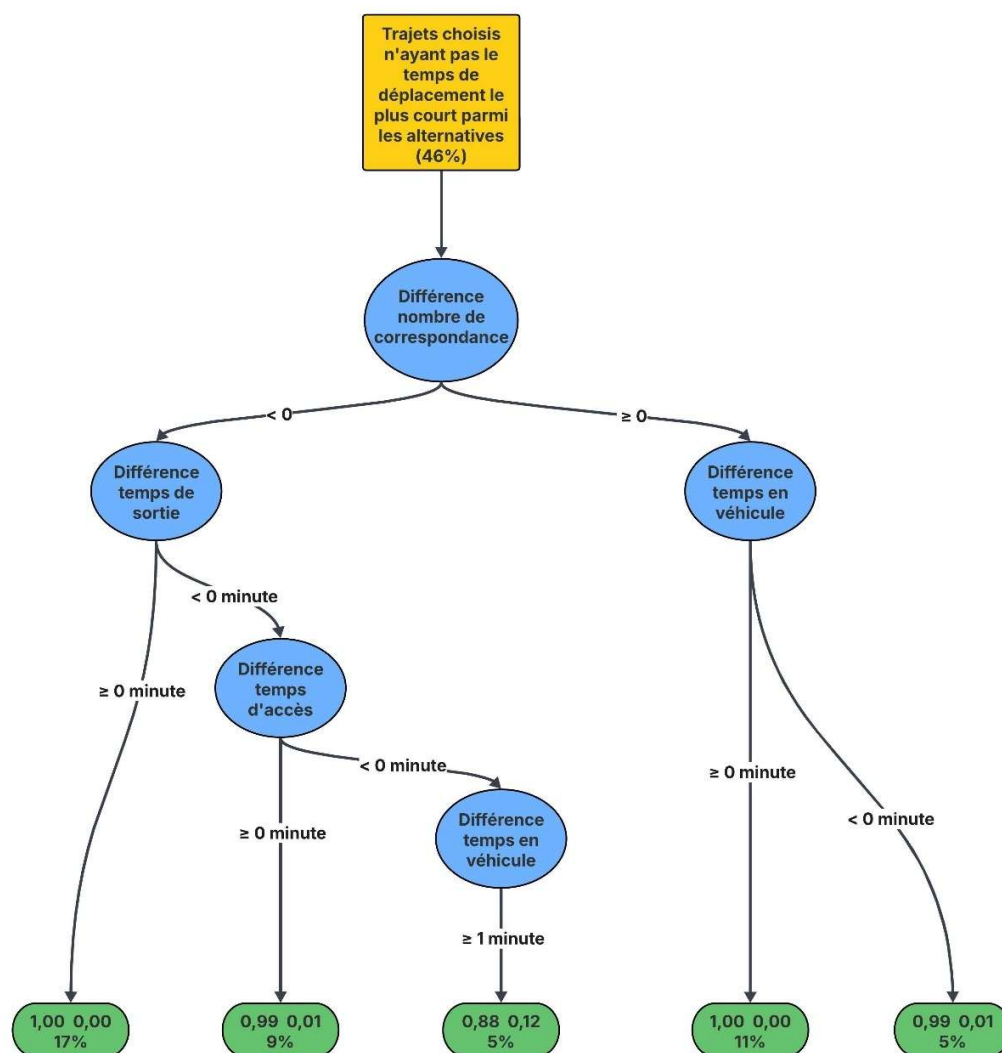


Figure 4.34: Arbre de décision motif travail

L'arbre de décision dans la Figure 4.35 prend seulement en compte le motif étude. Le premier embranchement est le temps en véhicule, ce qui représente la variable qui a le plus grand impact sur l'arbre de décision. Les première et cinquième feuilles ont un poids considérable avec 35 % des trajets choisis totaux, ce qui équivaut à 76 % des trajets choisis n'ayant pas le temps de parcours le plus court. Pour la cinquième feuille, le temps en véhicule est plus court et la feuille a un poids de 20 %. La première feuille ayant un poids de 15 % a un temps en véhicule égal ou plus élevé et un nombre de correspondances égal ou plus élevé.

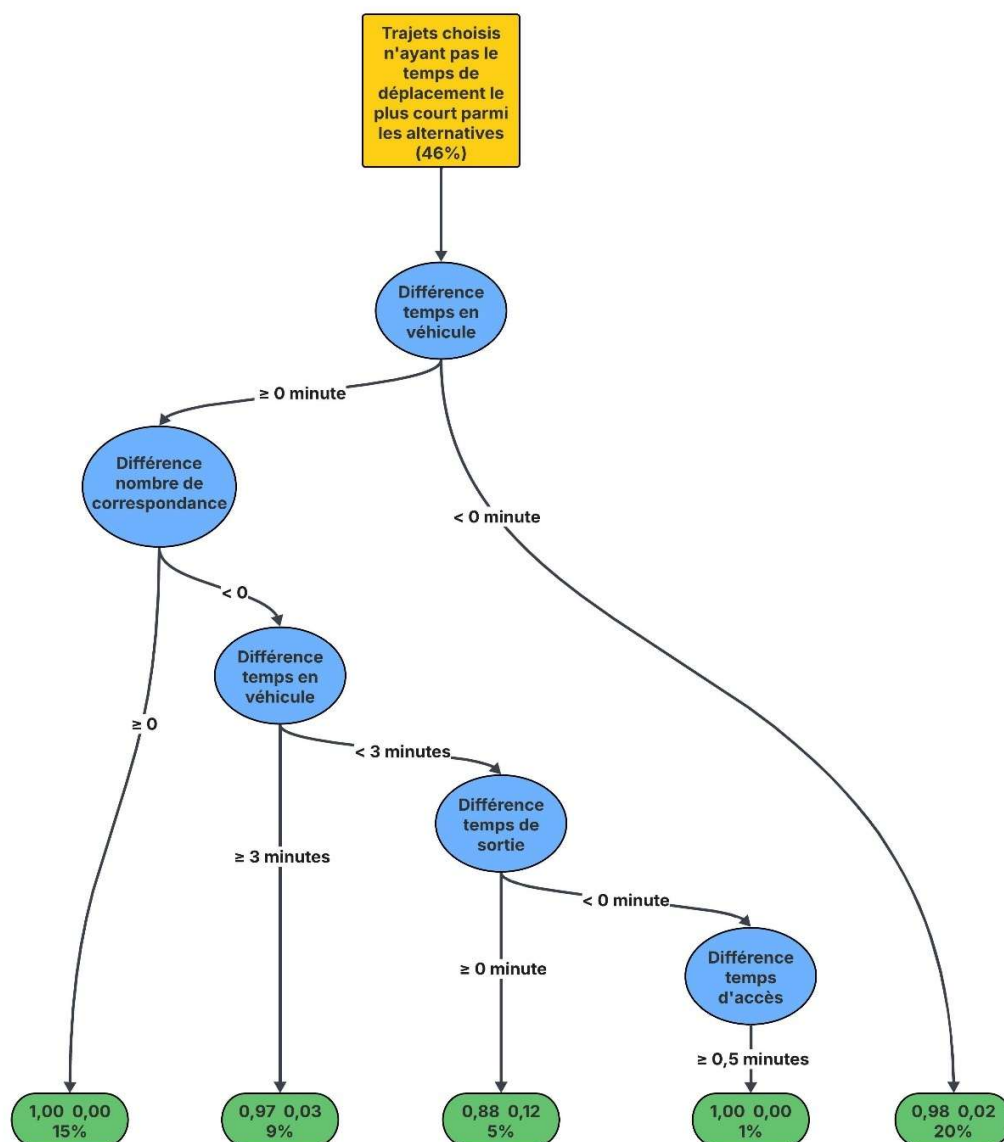


Figure 4.35: Arbre de décision motif étude

L'arbre de décision dans la Figure 4.36 prend seulement en compte le motif loisir. Le premier embranchement est encore une fois le temps en véhicule, ce qui représente la variable qui a le plus grand impact sur l'arbre de décision. Les première et quatrième feuilles ont un poids considérable avec 33 % des trajets choisis totaux, ce qui équivaut à 72 % des trajets choisis n'ayant pas le temps de parcours le plus court. Pour la quatrième feuille, le temps en véhicule est plus court et la feuille a un poids de 19 %. La première feuille ayant un poids de 14 % a un temps en véhicule d'au moins deux minutes de plus que le trajet ayant le temps total le plus court.

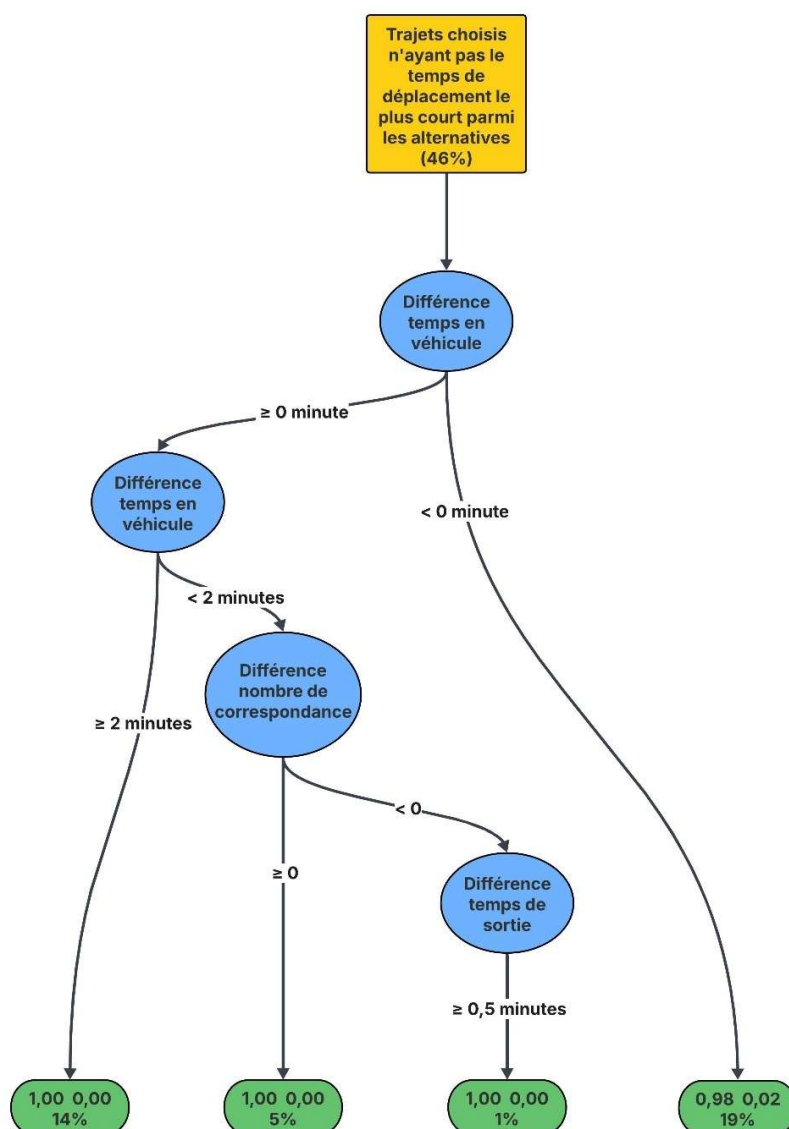


Figure 4.36: Arbre de décision motif loisir

L'arbre de décision dans la Figure 4.37 prend seulement en compte le motif magasinage. Le premier embranchement est encore une fois le temps en véhicule, ce qui représente la variable qui a le plus grand impact sur l'arbre de décision. Les première et troisième feuilles ont un poids considérable avec 39 % des trajets choisis totaux, ce qui équivaut à 85 % des trajets choisis n'ayant pas le temps de parcours le plus court. Pour la troisième feuille, le temps en véhicule est plus élevé ou égal et la feuille a un poids de 22 %. La première feuille ayant un poids de 17 % a un temps en véhicule plus court. La deuxième feuille a un poids près de 0 % donc négligeable.

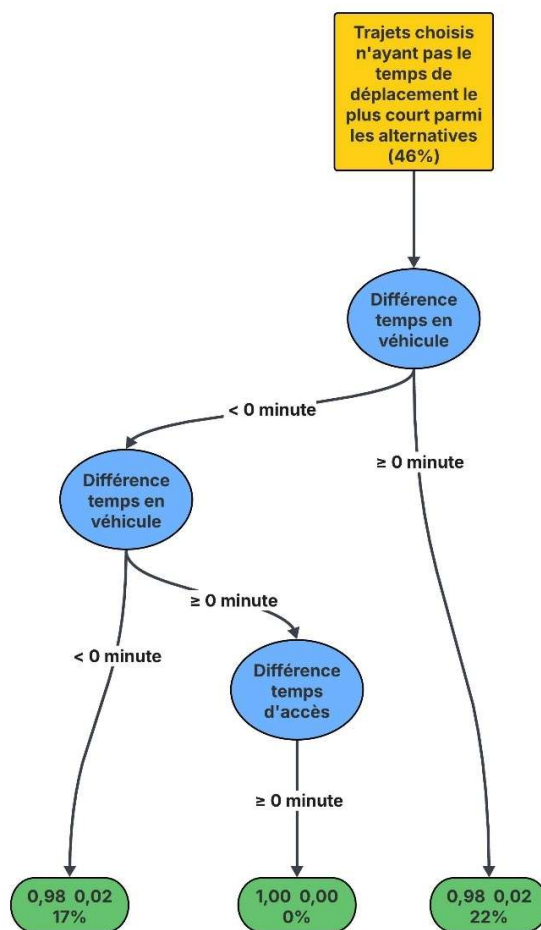


Figure 4.37: Arbre de décision motif magasinage

4.2.2 Équation de coût généralisé

Le temps perçu est représenté à l'aide des fonctions de coût généralisé. La perception du temps peut varier selon les typologies d'utilisateurs et de trajets.

Comme expliqué plus tôt, environ 54 % des trajets choisis sont ceux qui ont le temps le plus court (trajets PCC). Ce pourcentage risque de varier légèrement selon les typologies d'utilisateurs et de trajets. L'objectif est donc de maximiser le taux de réussite de l'équation en choisissant des combinaisons de coefficients adéquats avec la méthode Taguchi. Les coefficients sont liés entre eux et en modifier un va faire varier le taux de succès, c'est pourquoi la méthode Taguchi est intéressante. Un exemple du processus de sélection est présenté en ANNEXE pour le cas "toute la base de données".

Les combinaisons de coefficients finales de l'équation sont présentées dans le Tableau 4.10. Selon la typologie d'utilisateur, c'est la combinaison des coefficients de l'équation de coût généralisé pour les hommes de 15 à 24 ans qui a le taux de succès le plus bas, c'est aussi ce groupe qui a le plus bas taux de trajets PCC. Cependant, c'est la combinaison de coefficients de l'équation de coût généralisé pour le groupe des hommes de 40 à 64 ans qui a le taux de succès le plus élevé. Évidemment, les constats pouvant être tirés sont limités puisque peu de valeurs ont été testées pour chaque paramètre.

Selon la typologie des trajets (motifs), l'équation de coût généralisé ayant le plus haut taux de succès est celle pour le magasinage, c'est aussi le magasinage qui a le plus haut taux de trajet PCC. L'équation de coût généralisé ayant le plus bas taux de succès est celle pour le motif Étude. Les horaires de cours peuvent varier, ainsi les heures auxquelles les étudiants effectuent leur déplacement peuvent grandement différer. En dehors des heures de pointe, la fréquence des lignes de TC est moins élevée et ceci a un impact sur les alternatives de trajets disponibles pour les étudiants.

Pour les typologies de trajet et d'utilisateur, l'utilisation de l'équation de coût généralisé a fait augmenter le taux de succès. En effet, les taux de succès de la méthode Taguchi sont tous plus élevés que les taux de succès des trajets PCC.

Les coefficients pour le temps d'attente sont les mêmes pour tous les segments. La valeur minimale de 1,35 a été choisie pour toutes les combinaisons de coefficients de l'équation. Ceci signifie que le temps d'attente est perçu comme l'équivalent de 135 % du temps en véhicule. Les coefficients pour les correspondances sont aussi tous les mêmes pour tous les segments. La valeur intermédiaire a été choisie, ce qui apporte une pénalité de 11,4 minutes sur les correspondances. Puisque la plage de valeur pour le coefficient de correspondance a une grande étendue (de 3,7 à 18,9), il est normal que la valeur intermédiaire soit la plus adéquate.

Tableau 4.10: Combinaisons de coefficients de l'équation de coût généralisé développées pour différents types de personnes et déplacements

Typologie	Combinaison de coefficients finale				Taux Succès Taguchi (%)	Taux Succès Trajets PCC (%)
	T véhicule	T attente	T marche	Correspondance		
Toute la BD	1	1,35	2,2	11,4	61,92	54,44
0 à 14 ans femme	1	1,35	1,491	11,4	63,16	54,17
0 à 14 ans homme	1	1,35	2,2	11,4	59,78	52,67
15 à 24 ans femme	1	1,35	2,2	11,4	60,63	53,01
15 à 24 ans homme	1	1,35	2,2	11,4	58,57	52,08
25 à 39 ans femme	1	1,35	2,2	11,4	62,82	56,68
25 à 39 ans homme	1	1,35	1,491	11,4	63,39	56,06
40 à 64 ans femme	1	1,35	2,2	11,4	62,93	54,02
40 à 64 ans homme	1	1,35	1,491	11,4	64,26	54,21
65 ans et plus femme	1	1,35	2,77	11,4	61,61	54,85
65 ans et plus homme	1	1,35	2,77	11,4	63,44	60,30
Travail	1	1,35	1,491	11,4	63,72	52,59
Étude	1	1,35	2,2	11,4	59,57	52,48
Loisir	1	1,35	1,491	11,4	62,98	60,15
Magasinage	1	1,35	2,2	11,4	65,84	61,58

Il est intéressant d'analyser la relation de chaque taux de succès de la méthode Taguchi avec le taux de succès des trajets PCC dans la Figure 4.38. En observant le nuage de points, il est possible de remarquer que tous les points sont situés au-dessus de la droite. Cette droite représente le cas où le taux de succès des trajets PCC et de la méthode Taguchi sont égaux. Les taux de succès Taguchi de tous les segments sont donc plus élevés que les taux de succès des trajets PCC (sans l'équation de coût généralisé). L'utilisation de l'équation de coût généralisé a fait augmenter le taux de succès de tous les segments. Les trajets de motif Travail sont ceux qui ont le plus grand gain sur le taux de succès avec l'utilisation de l'équation de coût généralisé. En effet, pour le travail, le gain est de 11,13 % de taux de succès. De plus, le groupe "homme de 15 à 24 ans" a le taux de succès le plus bas, ce qui démontre une difficulté à construire un modèle qui analyse les logiques de choix de ce groupe. Le choix de trajet peut avoir des logiques très différentes au sein du même groupe. De plus, les points des groupes "homme de 15 à 24 ans" et "Magasinage" sont les plus éloignés dans le nuage de point. En effet, c'est pour le motif Magasinage que le taux de succès est le plus élevé.

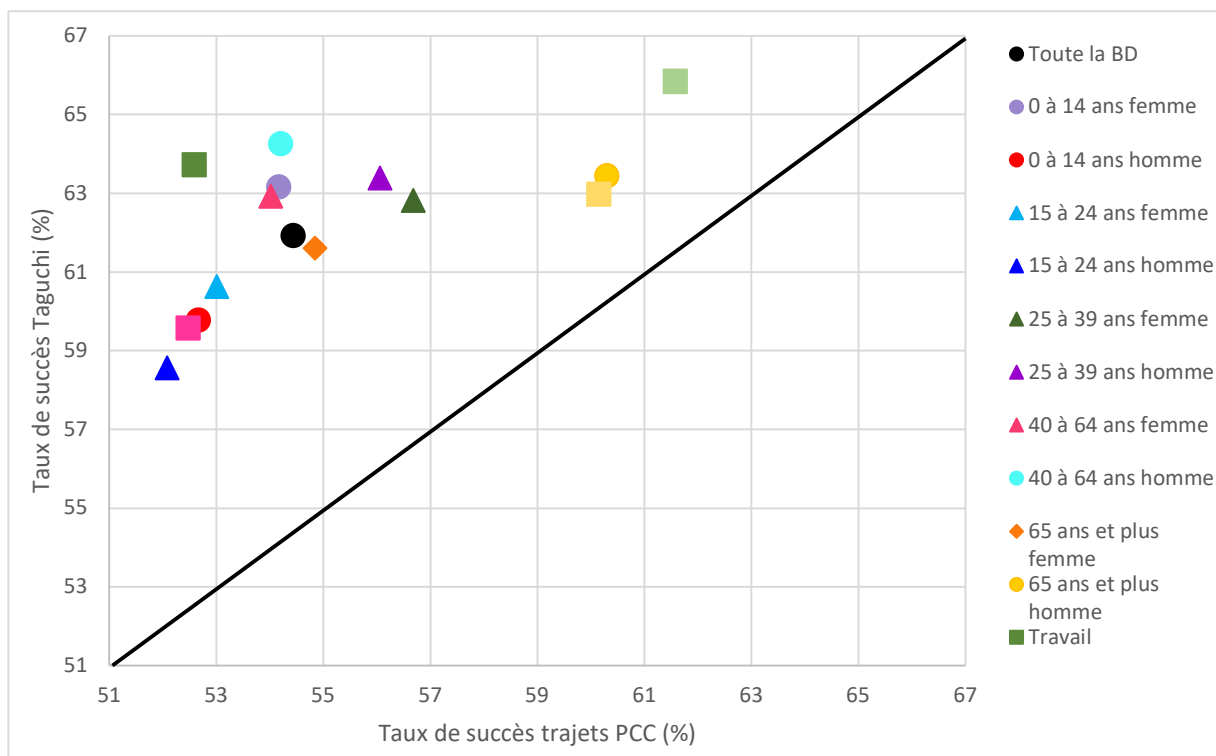


Figure 4.38 : Taux de succès Taguchi selon le taux de succès trajets PCC pour les diverses typologies

4.3 Analyse des indicateurs

Les indicateurs permettent de donner une valeur à la qualité et à la pénibilité liée à la perception du temps. Des graphiques et tableaux vont permettre de visualiser la qualité et la pénibilité globale des alternatives.

4.3.1 Indicateur de détour

La valeur de détour met en relation le temps qu'il faudrait en théorie pour parcourir le trajet d'une paire OD à vol d'oiseau à une vitesse de 6 km/h et de 10 km/h et le temps réellement pris par le trajet utilisé. Comme expliqué précédemment, plus la valeur de l'indicateur est élevée, plus le temps de déplacement est élevé par rapport au trajet à vol d'oiseau. Au contraire, un petit indicateur indique que le trajet prend moins de temps en comparaison au trajet à vol d'oiseau parcouru à 6 km/h ou à 10 km/h.

À partir du Tableau 4.11, avec un seuil de 6 km/h, il est possible de remarquer que 87,6 % des trajets choisis ont des indicateurs de détour plus petit que 1. Ceci indique donc que ces trajets choisis ont des vitesses réelles élevées et prennent moins de temps que les trajets utilisant le référentiel à vol d'oiseau à une vitesse de 6 km/h. En effet, lorsque la vitesse réelle du trajet est plus élevée que la vitesse de 6 km/h qui a été posée dans le calcul du temps théorique référentiel, l'indicateur sera plus petit que 1. Donc, plus la vitesse réelle est élevée, plus l'indicateur est petit. Les indicateurs de 2 et plus représentent 1,5 % des trajets choisis, ceux-ci ont des vitesses réelles très basses.

Tableau 4.11: Part des trajets choisis selon l'indicateur de détour avec le seuil de 6 km/h

Indicateur de détour (6 km/h)	Part des trajets choisis
[0 , 1[	87,6 %
[1 , 2[	10,9 %
2 et +	1,5 %

À partir du Tableau 4.12, avec un seuil de 10 km/h, il est possible de remarquer que 58 % des trajets choisis ont des indicateurs de détour plus petit que 1. Ceci indique donc que ces trajets choisis ont des vitesses réelles élevées et prennent moins de temps que les trajets utilisant le référentiel à vol d'oiseau à une vitesse de 10 km/h. Cette diminution du taux de trajets choisis est attendue puisque le seuil de vitesse minimal est devenu plus restreignant. En effet, lorsque la vitesse réelle du trajet est plus élevée que la vitesse de 10 km/h qui a été posée dans le calcul du temps théorique référentiel, l'indicateur sera plus petit que 1. Donc, plus la vitesse réelle est élevée, plus l'indicateur est petit. Les indicateurs de 3 et plus représentent 2,1 % des trajets choisis, ceux-ci ont des vitesses réelles très basses.

Tableau 4.12 : Part des trajets choisis selon l'indicateur de détour avec le seuil de 10 km/h

Indicateur de détour (10 km/h)	Part des trajets choisis
[0 , 1[	58,0 %
[1 , 2[	35,1 %
[2 , 3[	4,7 %
3 et +	2,1 %

La Figure 4.39, avec le seuil de 6 km/h, permet d'observer la part des trajets et des indicateurs pour chaque motif. Pour tous les motifs, l'indicateur $[0, 1[$ a le taux le plus élevé, ce qui démontre des vitesses généralement plus élevées que le seuil de 6 km/h pour tous les motifs. Cependant, le motif Magasinage démontre un taux d'indicateur de $[1, 2[$ et de 2 et + plus élevé que les autres motifs. Le motif Magasinage contient donc une plus grande quantité de trajets choisis ayant des vitesses plus faibles que le seuil de 6 km/h que les autres motifs. La Figure 4.39 démontre donc que pour le motif Travail, il y a beaucoup de trajets dont les temps de déplacement sont plus courts que les trajets utilisant le référentiel à vol d'oiseau. C'est-à-dire que beaucoup de trajets offrent des temps compétitifs lorsque comparés au référentiel théorique de qualité minimale. Ceci est normal puisque le réseau de transport de Montréal est planifié en particulier pour les trajets Travail-Domicile. Pour le motif Magasinage, les indicateurs élevés démontrent que les temps de déplacements sont supérieurs à ce qui serait attendu si on respectait un seuil de qualité minimum basé sur la distance à vol d'oiseau.

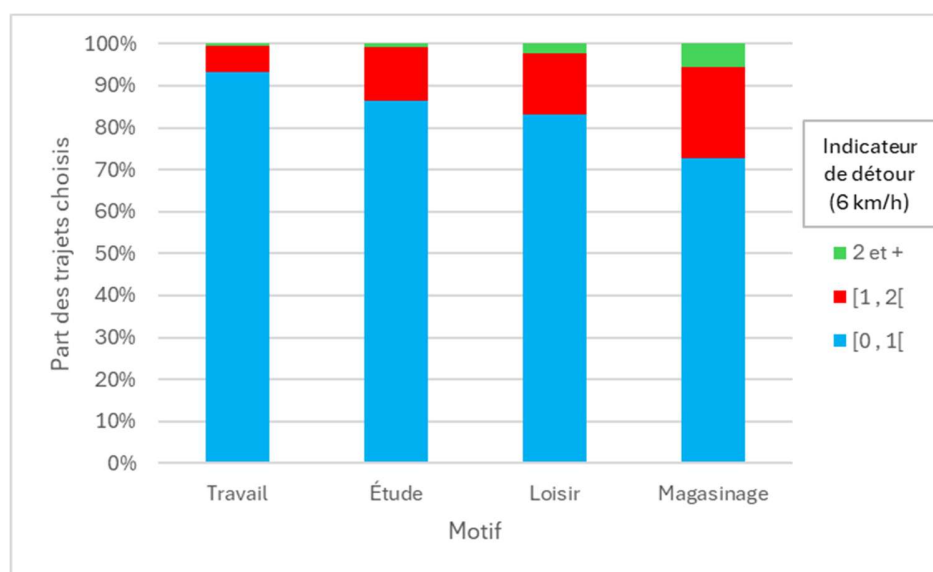


Figure 4.39: Part des trajets choisis selon le motif et l'indicateur de détournement avec le seuil de 6 km/h

La Figure 4.40, avec le seuil de 10 km/h sur la diagonale, permet d'observer la part des trajets et des indicateurs pour chaque motif. Pour tous les motifs Travail, Étude et Loisir, l'indicateur $[0, 1[$ a le taux le plus élevé, ce qui démontre des vitesses généralement plus élevées que le seuil de 10 km/h. Cependant, pour le motif Magasinage, l'indicateur $[1, 2[$ a le taux le plus élevé. Ce motif contient aussi une quantité considérable de trajets avec l'indicateur de 3 et +, ce qui démontre des

détours en temps assez élevés par rapport à une vitesse attendue sur la base de la distance à vol d’oiseau. Le motif Magasinage contient donc une plus grande quantité de trajets choisis ayant des vitesses plus faibles que le seuil de 10 km/h que les autres motifs. La Figure 4.40 démontre donc que pour le motif Travail, il y a environ 68 % des trajets qui ont des temps de déplacement courts en comparaison avec le temps théorique attendu sur les trajets à vol d’oiseau.

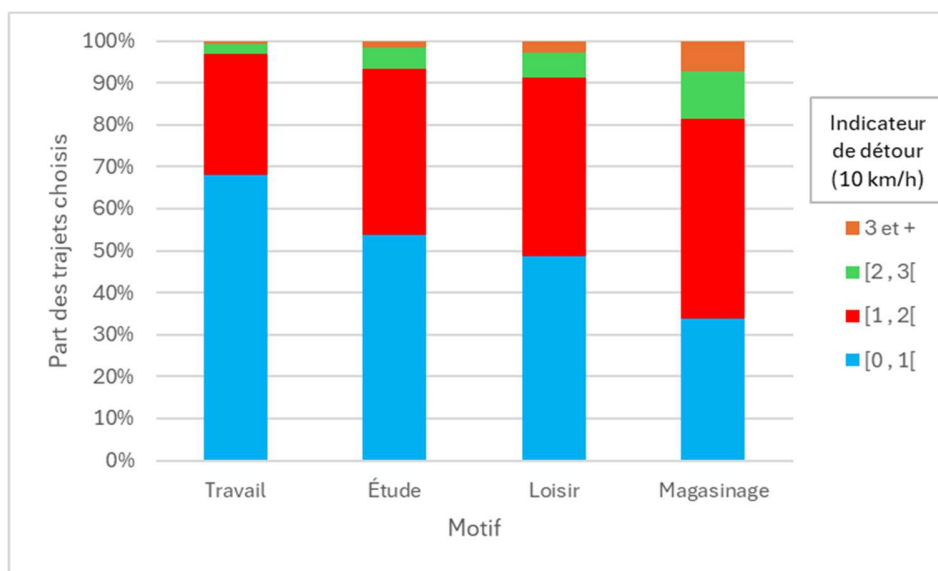


Figure 4.40: Part des trajets choisis selon le motif et l’indicateur de détour avec le seuil de 10 km/h

À partir de la Figure 4.41, avec un seuil de 6 km/h, il est possible de remarquer que pour les trajets de courte distance, soit de 0 à 5 km, les taux d’indicateur de détour de [1, 2[et de 2 et + sont élevés. Ceci signifie donc que les temps de déplacements sont élevés comparativement aux temps attendus sur les trajets à vol d’oiseau. Plus les distances réseau augmentent, plus les indicateurs de détour diminuent.

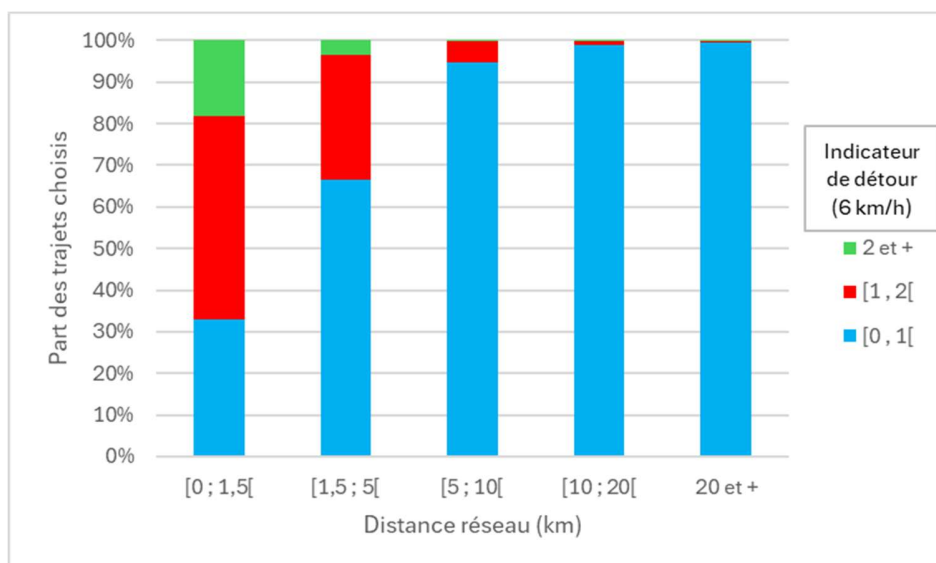


Figure 4.41: Part des trajets choisis selon la distance réseau et l'indicateur de détour avec le seuil de 6 km/h

À partir de la Figure 4.42, avec un seuil de 10 km/h, à première vue, les indicateurs sont généralement plus élevés que pour le seuil de 6 km/h. Il est possible de remarquer que pour les trajets ayant des distances réseau allant de 0 à 5 km, les taux d'indicateur de détour de [1 , 2[, de [2 , 3[et de 3 et + sont élevés. Ceci signifie donc que les temps de déplacements sont élevés comparativement aux temps théoriques sur les trajets à vol d'oiseau. Plus les distances réseau augmentent, plus les indicateurs de détour diminuent. Cela peut indiquer que, proportionnellement, les détours en temps tendent à être moins importants lorsque les distances sont plus longues. Ceci est notamment lié à la structure des trajets en transport en commun qui impliquent des segments d'accès et d'attente qui pénalisent les trajets de courte distance.

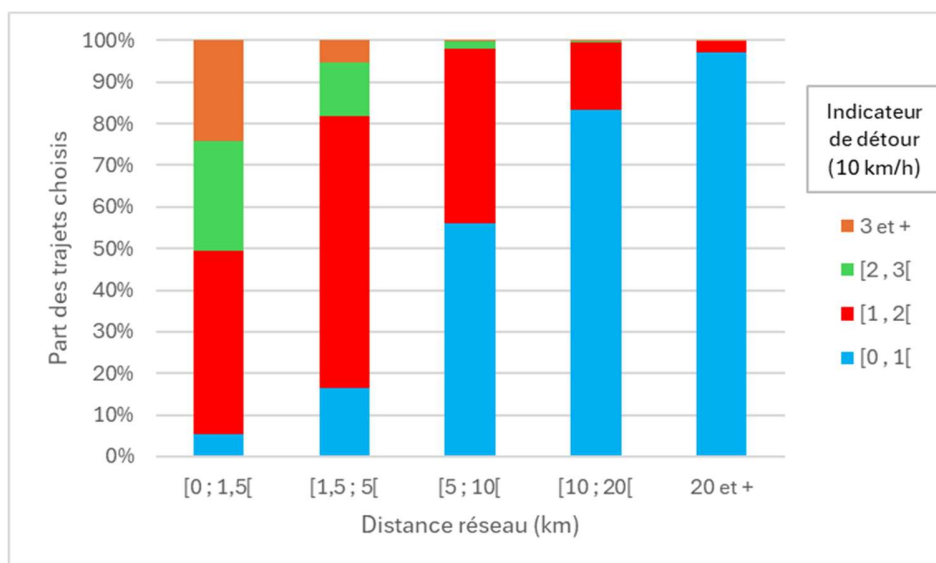


Figure 4.42 : Part des trajets choisis selon la distance réseau et l'indicateur de détournement avec le seuil de 10 km/h

4.3.2 Indicateur de pénibilité perçue

Le calcul de l'indicateur de pénibilité sera effectué sur tous les trajets choisis confondus, sans prendre en compte les typologies établies plus haut.

La pénibilité perçue est calculée en mettant en relation le temps perçu (équation de coût généralisé) et le temps réel d'un trajet. Plus la valeur de l'indicateur est élevée, plus le temps perçu est élevé par rapport au temps réel du trajet.

Comme expliqué plus tôt, les coefficients sont liés entre eux et en modifier un va faire varier le taux de succès. Faire varier les coefficients un par un donne une meilleure compréhension de l'impact de ce coefficient. Pour se faire, l'équation de coût généralisé neutre (coefficient attente=1, coefficient marche=1, coefficient correspondance=0) sera modifiée. Un par un les coefficients sont modifiés, de manière à faire une analyse sur l'impact de chaque coefficient. Puis finalement, la combinaison de coefficients de l'équation de coût généralisé sélectionnée pour tous les trajets sera analysée.

La combinaison de coefficients de l'équation de coût généralisé non pondérée utilisée est :

$$\begin{aligned} \text{Temps perçu} = & 1 * T_{\text{véhicule}} + 1 * T_{\text{attente correspondance}} \\ & + 1 * (T_{\text{accès}} + T_{\text{sortie}} + T_{\text{marche correspondance}}) + 0 * N_{\text{correspondance}} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Les coefficients sélectionnés pour l'équation de coût généralisé de ces trajets sont :

Tableau 4.13 : Coefficients sélectionnés pour l'équation de coût généralisé de tous les trajets de la BD

Coefficient T attente	1,35
Coefficient T marche	2,2
Coefficient correspondance	11,4

Les combinaisons de coefficients de l'équation utilisées pour l'analyse de cet indicateur sont les suivantes :

Tableau 4.14 : Combinaisons de coefficients de l'équation de coût généralisé utilisées pour l'analyse de l'indicateur de pénibilité

	Combinaison de coefficients de l'équation de coût généralisé (toute la BD)			
	T véhicule	T attente	T marche	Correspondance
T attente minimal	1	1,35	1	0
T marche intermédiaire	1	1	2,2	0
Correspondance intermédiaire	1	1	1	11,4
Combinaison sélectionnée	1	1,35	2,2	11,4

4.3.2.1 Combinaison de coefficients de l'équation avec le coefficient d'attente minimal

Tous les trajets choisis par les usagers sont analysés. Dans cette analyse, le temps perçu représente le réel des trajets avec le temps d'attente multiplié par 1,35. Il est important de rappeler que le temps d'attente initial est de 1 minute pour tous les trajets, ceci permet de minimiser l'attente initiale. Dans la combinaison de coefficients de l'équation de coût généralisé, le temps d'attente aux correspondances est celui qui est pris en compte.

À partir du Tableau 4.15, il est possible de remarquer que 46,9 % des trajets choisis ont des indicateurs de pénibilité entre 1 et 1,02. Ceci représente une différence assez faible entre le temps perçu et le temps réel. Il y a 9,7 % des trajets choisis qui ont un indicateur de pénibilité de 1,06 et +. Donc, pour ces trajets le coefficient d'attente minimal fait augmenter le temps perçu de manière

considérable. Pour des trajets de courtes durées, augmenter le temps perçu d'une étape du trajet a un grand impact sur le temps perçu total.

Tableau 4.15 : Part des trajets choisis selon l'indicateur de pénibilité avec le coefficient d'attente minimal

Indicateur de pénibilité (attente min)	Part des trajets choisis
[1 ; 1,02[	46,9 %
[1,02 ; 1,04[	28,9 %
[1,04 ; 1,06[	14,5 %
1,06 et +	9,7 %

En observant la Figure 4.43, il est apparent que les trajets de courte distance, soit moins de 1,5 km, ont des taux élevés d'indicateurs élevés. En effet, pour les trajets de moins de 1,5 km, le taux d'indicateur de 1,02 et + est élevé. Quand la distance augmente, l'indicateur [1 ; 1,02[prend plus de place.

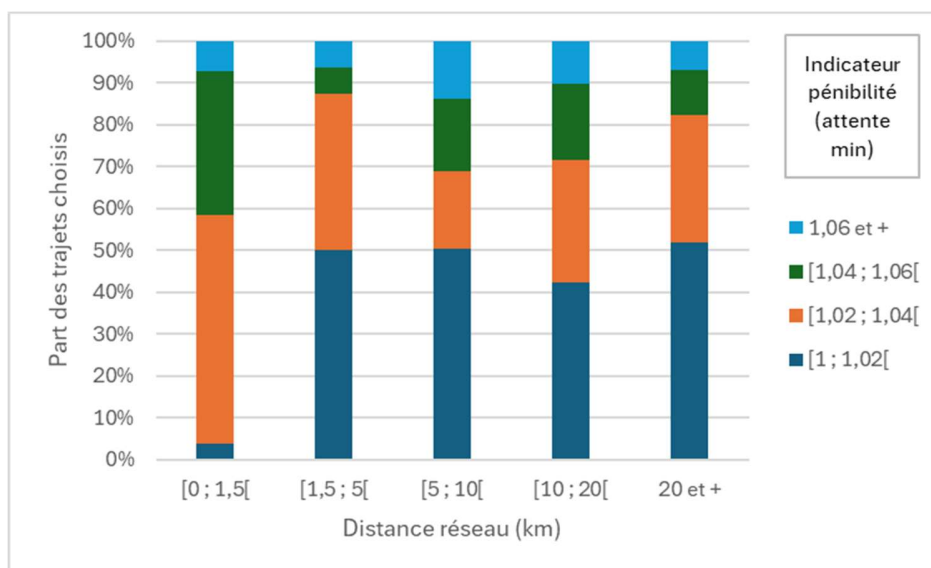


Figure 4.43 : Part des trajets choisis selon la distance réseau et l'indicateur de pénibilité pour le coefficient d'attente minimal

4.3.2.2 Combinaison de coefficients de l'équation avec le coefficient de marche intermédiaire

Tous les trajets choisis par les usagers sont analysés. Dans cette analyse, le temps perçu représente le réel des trajets avec le temps de marche à l'accès, la sortie et durant les correspondances multipliées par 2,2.

À partir du Tableau 4.16, il est possible de remarquer que 14,9 % des trajets choisis ont des indicateurs de pénibilité entre 1 et 1,2. Ceci représente une différence assez faible entre le temps perçu et le temps réel. Il y a 23,7 % des trajets choisis qui ont un indicateur de pénibilité de 1,6 et +. Donc, pour ces trajets le coefficient de marche intermédiaire fait augmenter le temps perçu de manière considérable. Pour des trajets de courtes durées, augmenter le temps perçu d'une étape du trajet de quelques minutes a un grand impact sur le temps perçu total.

Tableau 4.16 : Part des trajets choisis selon l'indicateur de pénibilité avec le coefficient de marche intermédiaire

Indicateur de pénibilité (marche inter.)	Part des trajets choisis
[1 ; 1,2[	14,9 %
[1,2 ; 1,4[	35,5 %
[1,4 ; 1,6[	25,9 %
1,6 et +	23,7 %

En observant la Figure 4.44, il est apparent que l'indicateur 1,6 et + subit une diminution quand la distance augmente, tandis que les indicateurs [1 ; 1,2[et [1,2 ; 1,4[augmentent. Donc l'impact de la pénibilité liée au temps de marche semble moindre pour les trajets de plus longue distance.

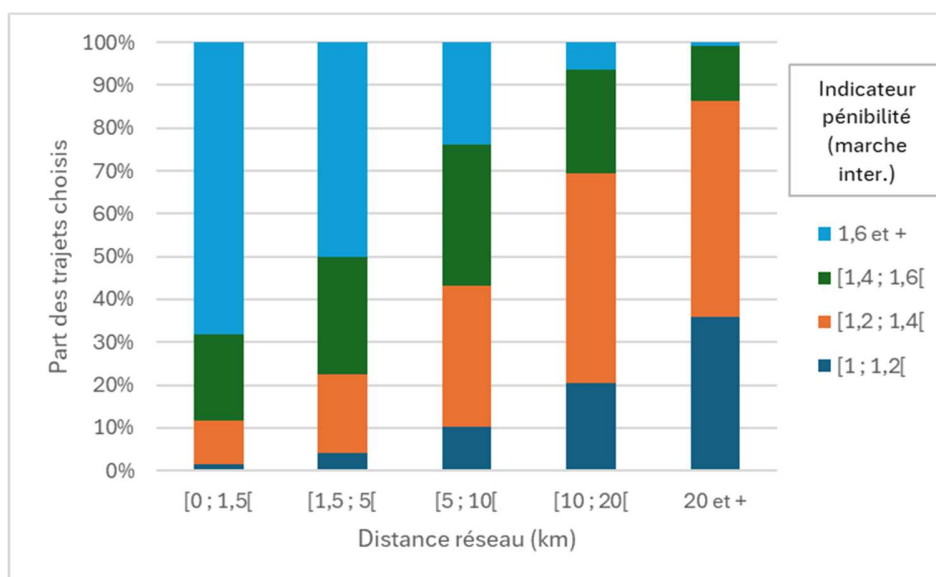


Figure 4.44 : Part des trajets choisis selon la distance réseau et l'indicateur de pénibilité pour le coefficient de marche intermédiaire

4.3.2.3 Combinaison de coefficients de l'équation avec le coefficient de correspondance intermédiaire

Tous les trajets choisis par les usagers sont analysés. Dans cette analyse, le temps perçu représente le réel des trajets avec 11,4 minutes ajoutées pour chaque correspondance.

À partir du Tableau 4.17, il est possible de remarquer que 60,7 % des trajets choisis ont des indicateurs de pénibilité entre 1 et 1,2. Ceci représente une différence assez faible entre le temps

perçu et le temps réel. Il y a 4,4 % des trajets choisis qui ont un indicateur de pénibilité de 1,6 et +. Donc, pour ces trajets le coefficient de correspondance intermédiaire fait augmenter le temps perçu de manière considérable.

Tableau 4.17: Part des trajets choisis selon l'indicateur de pénibilité avec le coefficient de correspondance intermédiaire

Indicateur de pénibilité (corr. inter.)	Part des trajets choisis
[1 ; 1,2[	60,7 %
[1,2 ; 1,4[	22,7 %
[1,4 ; 1,6[	12,3 %
1,6 et +	4,4 %

En observant la Figure 4.45, il est apparent que pour les trajets ayant des distances entre 0 et 1,5 km, il n'y a pas de correspondance à effectuer, donc la pénalité de correspondance n'affecte pas les trajets courts. Plus la distance augmente, plus il est probable qu'il faille effectuer une correspondance et plus le nombre de correspondances risque d'augmenter. Pour des trajets de plus courtes durées, augmenter le temps perçu d'une étape du trajet a un grand impact sur le temps perçu total. Cependant, l'impact de la pénibilité liée aux correspondances semble moindre pour les trajets de plus longue distance.

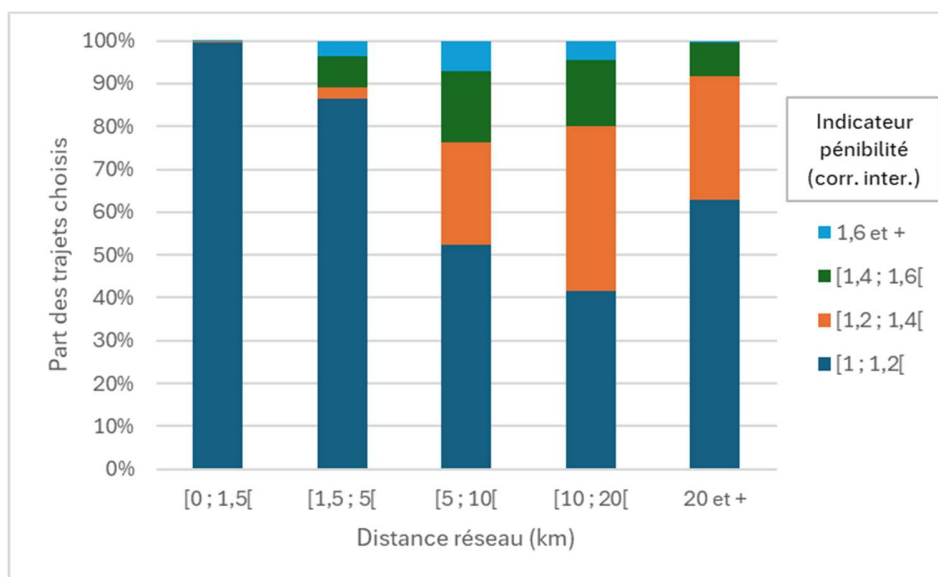


Figure 4.45: Part des trajets choisis selon la distance réseau et l'indicateur de pénibilité pour le coefficient de correspondance intermédiaire

4.3.2.4 Combinaison de coefficients de l'équation sélectionnée pour tous les trajets

Tous les trajets choisis par les usagers sont analysés. Dans cette analyse, le temps perçu est calculé avec la combinaison de coefficients sélectionnée :

$$\begin{aligned} \text{Temps perçu} = & 1 * T_{\text{véhicule}} + 1,35 * T_{\text{attente correspondance}} \\ & + 2,2 * (T_{\text{accès}} + T_{\text{sortie}} + T_{\text{march correspondance}}) + 11,4 * N_{\text{correspondance}} \end{aligned} \quad (4.2)$$

À partir du Tableau 4.18, il est possible de remarquer que 6,4 % des trajets choisis ont des indicateurs de pénibilité entre 1 et 1,25. Ceci représente une différence assez faible entre le temps perçu et le temps réel. Il y a 9,6 % des trajets choisis qui ont un indicateur de pénibilité de 2 et +. Donc, pour environ 10 % des trajets choisis, le temps perçu de leur trajet est au moins le double du temps réel.

Tableau 4.18 : Part des trajets choisis selon l'indicateur de pénibilité avec l'équation choisie

Indicateur de pénibilité (éq. choisie)	Part des trajets choisis
[1 ; 1,25[	6,4 %
[1,25 ; 1,5[	26,5 %
[1,5 ; 1,75[	34,6 %
[1,75 ; 2[	22,9 %
2 et +	9,6 %

En observant la Figure 4.46, il est apparent que les indicateurs de pénibilité des trajets diminuent généralement quand la distance augmente. Les trajets qui ont le plus haut taux d'indicateurs de pénibilité de 2 et + ont des distances entre 0 et 10 km. L'impact de la pénibilité des trajets semble moindre pour les trajets de plus longue distance.

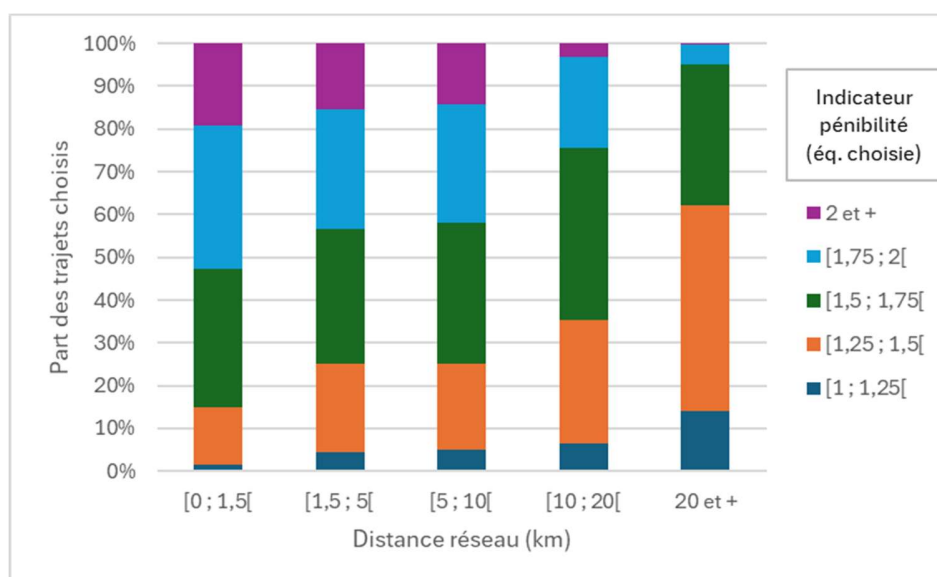


Figure 4.46 : Part des trajets choisis selon la distance réseau et l'indicateur de pénibilité pour l'équation choisie

CHAPITRE 5 CONCLUSION

La présente section amène la conclusion du projet de recherche. Il rappelle les différentes étapes de la méthodologie développée au fil du projet. Les résultats sont synthétisés et les contributions du projet sont précisées. Les limitations méthodologiques ainsi que les perspectives de recherche futures sont présentées.

5.1 Synthèse de la méthode

Tout d'abord, la revue de littérature fait un état des connaissances des facteurs déterminants qui influencent le choix d'un trajet en TC. On y retrouve une analyse approfondie d'éléments tels que les correspondances, le temps d'attente, l'aménagement des infrastructures, le temps d'accès et de sortie ainsi que l'accessibilité. Les études et articles scientifiques recensés permettent d'identifier les valeurs plausibles des coefficients associés à ces facteurs. Ceux-ci servent à quantifier la perception du temps et, éventuellement, à les intégrer dans l'équation de coût généralisé.

Ensuite, la méthodologie explore, sous plusieurs angles, les trajets choisis et non choisis. Une analyse descriptive met en évidence que les motifs Loisir et Magasinage avaient le plus haut taux d'utilisation des trajets les plus courts. Bien que ceci soit étonnant aux premiers abords, ce constat semble lié au manque d'alternatives (absence de plan B).

Pour évaluer la pertinence de ces trajets dits plans B, une analyse des vitesses théoriques a été réalisée. En posant deux seuils de vitesse, soit 6 km/h et 10 km/h, il a été possible de déterminer quels types de trajets ne respectent pas ces vitesses minimales. Une comparaison entre le trajet le plus rapide et la deuxième option la plus rapide a ensuite été effectuée en appliquant des seuils de différence de vitesse allant de 1 à 3 km/h. Ceci a permis d'analyser la qualité des trajets plans B disponibles.

Une matrice origine-destination (OD) a également été construite afin d'observer la répartition géographique des trajets les plus courts choisis. Sachant que, dans l'ensemble de la base de données, 54 % des trajets choisis sont les plus courts, il a été possible d'identifier les paires OD où ce pourcentage se situait au-dessus ou au-dessous de cette moyenne.

Une analyse spatiale combinant l'algorithme TRACUS et la visualisation avec QGIS a été menée pour les trajets ne respectant pas les seuils de vitesse théorique de 6 et 10 km/h. Ainsi, il est possible de localiser les secteurs dans le grand Montréal où les vitesses observées sont très faibles.

Par la suite, les arbres de décision par motif ont été construits à l'aide du logiciel RStudio. Les trajets qui ne sont pas les plus courts mais qui ont tout de même été choisis sont étudiés. Les écarts entre ces trajets et les trajets les plus courts ont été étudiés, plus particulièrement, la différence du temps de véhicule, du temps d'accès et de sortie et du nombre de correspondances. Ces arbres de décision permettent de comprendre pourquoi certains usagers privilégient un trajet qui n'est pas le plus court.

L'équation de coût généralisé a été construite à partir des facteurs les plus déterminants, soit le temps en véhicule, le temps d'attente, le temps d'accès, de sortie et de marche en correspondance et le nombre de correspondances. Les coefficients associés, issus de la littérature scientifique, ont été testés en testant les valeurs minimales et maximales afin d'identifier ceux qui permettaient de mieux prédire le choix des trajets. Diverses combinaisons de coefficients de l'équation sont estimées selon une typologie d'usagers (âge et sexe) et une typologie de trajets (motif de déplacement).

Finalement, deux indicateurs ont été construits : l'indicateur de pénibilité perçue et l'indicateur de détour. L'indicateur de pénibilité perçue utilise le temps perçu calculé à partir de l'équation de coût généralisé. L'indicateur de détour utilise des seuils de vitesse théorique de 6 et 10 km/h, des valeurs provenant d'une présentation de (Morency, 2024).

5.2 Contributions du mémoire

Ce mémoire vise à approfondir la compréhension des facteurs ayant un impact sur le choix de trajet en transport collectif tout en apportant des constats sur la qualité de l'offre dans la grande région de Montréal. Tout d'abord, la revue de littérature rassemble et synthétise les résultats de plusieurs études internationales et locales. Cette section met en évidence les facteurs les plus influents et leur associe des coefficients.

Sur la base des constats, le mémoire propose une méthode de mesure du temps perçu en utilisant une équation de coût généralisé. L'équation tient compte d'une typologie d'usagers et de trajets. Cette segmentation permet d'explorer la perception du temps dans des contextes variés. Le segment de population "homme de 40 à 64 ans" a l'équation de coût généralisé qui obtient le meilleur taux de succès avec 64,26 %. Le mémoire propose aussi l'utilisation des arbres de décision afin d'analyser les logiques liées au choix de trajet. Pour l'arbre de décision du motif Travail, le facteur

le plus important est le nombre de correspondances. Pour le motif Étude, Loisir et Magasinage, le facteur le plus important est le temps en véhicule.

La qualité du réseau est ensuite évaluée à partir des trajets réels et simulés. En effet, la plus grande contribution de ce mémoire et la plus grande partie de l'analyse est consacrée à étudier les trajets choisis et non choisis en considérant les vitesses théoriques, la disponibilité de trajets plans B satisfaisants et une analyse spatiale des performances. En effet, parmi les trajets choisis, 12,4 % ne respectent pas le seuil de vitesse théorique minimal de 6 km/h. Ce sont 42 % des trajets choisis qui ne respectent pas le seuil de vitesse de 10 km/h. De plus, parmi toutes les alternatives possibles de la BD, 62 % des trajets générés pour le motif Magasinage n'atteignent pas une vitesse théorique de 10 km/h.

5.3 Limites du cadre méthodologique

Il est intéressant d'apporter certaines nuances au projet de recherche afin de bien cerner les limites.

Tout d'abord, l'algorithme de calcul de trajets et de génération d'alternatives implanté dans la plateforme Transition présente certaines limites en lien avec la simulation des alternatives de trajet; celles-ci sont présentées en ANNEXE . Dans la base de données initiale, 36,9 % des trajets choisis par les répondants de l'enquête OD ne faisaient pas partie des alternatives simulées. Autrement dit, pour plus d'un tiers des trajets choisis, l'itinéraire réellement emprunté par l'utilisateur ne faisait pas partie des alternatives possibles. Cela peut être dû à la méthodologie implantée, à des enjeux de codification de réseaux (pour l'accès ou le trajet TC) ou à des itinéraires peu plausibles. Les limites de la méthodologie ont donc été repérées afin d'améliorer la précision de l'algorithme de simulation d'alternatives. Après ces corrections, la proportion de trajets correctement simulés devrait être significativement plus élevée. Ceci va permettre de disposer de résultats plus proches de la réalité et d'intégrer un plus grand nombre de trajets dans les prochaines analyses.

Ensuite, les coefficients utilisés dans l'équation de coût généralisé sont tirés de la littérature scientifique et peuvent ne pas parfaitement refléter les perceptions propres au contexte montréalais. En effet, la revue de littérature inclut des études réalisées dans divers pays, tels que les États-Unis, l'Angleterre, l'Espagne ou l'Australie. Ces pays ont des conditions environnementales, sociales et économiques différentes de celles de la grande région de Montréal. Bien que ces données offrent un cadre solide pour amorcer l'analyse, il serait pertinent de faire le calage des coefficients directement avec les données montréalaises.

5.4 Perspectives

Les perspectives offertes par ce projet sont assez nombreuses. La méthodologie a privilégié certains angles d'analyse, ce qui laisse place à plusieurs approfondissements possibles.

Les recherches futures pourraient intégrer un sondage visant à recueillir directement les perceptions du temps des usagers du TC à Montréal. Comme mentionné précédemment, ceci permettrait d'obtenir des données plus représentatives de la réalité observée dans la région d'étude. Dans la revue de littérature, trois méthodes d'enquête ont été détaillées, cependant, il en existe plusieurs autres qui pourraient être explorées. L'intégration d'un sondage dans la méthodologie représenterait une avenue intéressante.

L'analyse des trajets plans B constitue un champ d'études très intéressant qui pourrait être approfondi à l'aide d'analyses plus ciblées. Ces trajets alternatifs jouent un rôle important dans l'évaluation de la qualité de l'offre et une étude plus approfondie de leurs propriétés permettrait d'enrichir la compréhension des logiques de choix.

En ce qui concerne les deux indicateurs qui ont été calculés, ceux-ci n'ont pas été associés à des valeurs seuils. En effet, poser des seuils maximaux sur ces indicateurs permettrait d'aller plus loin dans la réflexion en mesurant la proportion des trajets qui répondent ou non à ces limites.

Enfin, la méthode de calcul des combinaisons de coefficients de l'équation de coût généralisé pourrait prendre plusieurs formes. Le coefficient associé au nombre de correspondances pourrait être affiné en prenant en compte le type de correspondance effectué. Par exemple, les correspondances bus-bus ou d'un métro vers un bus n'ont pas le même impact sur le temps perçu. Le type de correspondance est un élément très important qui pourrait être développé afin d'améliorer la précision des modèles.

RÉFÉRENCES

- Ahmad, F., & Al-Fagih, L. (2024). Travel behaviour and game theory : A review of route choice modelling behaviour. *Journal of Choice Modelling*, 50, 100472. <https://doi.org/10.1016/j.jocm.2024.100472>
- ARTM. (2020, juin 22). *Enquête origine-destination 2018*. <https://www.artm.quebec/planification/enqueteod/>
- Bahbouh, K. (2016). *Corridors de demande : Modélisation et contributions à l'évaluation du niveau de durabilité*. Polytechnique Montréal. <https://publications.polymtl.ca/2433/>
- Bonnel, P. (2004). *Prévoir la demande de transport*. ENTPE. https://www.researchgate.net/publication/5086964_Prevoir_la_Demande_de_Transport
- Bosch, E., Luther, R., & Ihme, K. (2024). *Travel experience in public transport : Experience sampling and cardiac activity data for spatial analysis*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.02792>
- Bourbonnais, P.-L. (2020, juin 16). *Algorithme de génération d'alternatives de trajets de transport collectif*. présenté lors du Colloque annuel de la Chaire Mobilité, Montréal, Canada. [file:///C:/Users/brode/Downloads/AlgorithmeGenerationAlternatives%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/brode/Downloads/AlgorithmeGenerationAlternatives%20(1).pdf)
- Bourbonnais, P.-L., Verreault, H., & Morency, C. (2019, janvier). *Which public transit routing alternatives are worth calculating? A transit lines filtering algorithm to generate alternatives*. Transportation Research Board 98th Annual Meeting, Washington DC, United States. <https://trid.trb.org/view/1572524>

- Bovy, P. H. L., & Hoogendoorn-Lanser, S. (2005). Modelling route choice behaviour in multi-modal transport networks. *Transportation*, 32(4), 341-368. <https://doi.org/10.1007/s11116-004-7963-2>
- Brands, T., De Romph, E., Veitch, T., & Cook, J. (2014). Modelling public transport Route choice, with multiple access and egress modes. *Transportation Research Procedia*, 1(1), 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.07.003>
- Buchunde, S., Saidi, S., & Ataeian, S. (2024). Impact of station design and passengers flow on urban rail dwell time : A systemwide analysis using APC and AVL data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2678(11), 266-280. <https://doi.org/10.1177/03611981241240762>
- Buczowska, S., Coulombel, N., & De Lapparent, M. (2019). A comparison of Euclidean Distance, Travel Times, and Network Distances in Location Choice Mixture Models. *Networks and Spatial Economics*, 19(4), 1215-1248. <https://doi.org/10.1007/s11067-018-9439-5>
- Cascajo, R., Lopez, E., Herrero, F., & Monzon, A. (2019). User perception of transfers in multimodal urban trips : A qualitative study. *International Journal of Sustainable Transportation*, 13(6), 393-406. <https://doi.org/10.1080/15568318.2018.1476632>
- Čelan, M., Klemenčič, M., Mrgole, A. L., & Lep, M. (2017). Bus-stop based real time passenger information system – Case study Maribor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245, 042008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/4/042008>
- Chaire Mobilité. (2020). *Plateforme Transition*. Transition. <https://transition.city/>
- Chaire Mobilité. (2021). *Rapport d'activités 2020*. Polytechnique Montréal. <https://share.polymtl.ca/alfresco/service/api/path/content;cm:content/workspace/SpacesSt>

ore/Company%20Home/Sites/chaire-de-recherche-mobilit-
web/documentLibrary/publications/rapports_annuels/RapportChaireM2_A5_an2020.pdf?
guest=true

- Chang, H.-J., Huang, K.-C., & Wu, C.-H. (2006). Determination of sample size in using central limit theorem for Weibull distribution. *International Journal of Information and Management Sciences*.
https://www.researchgate.net/publication/267021000_Determination_of_sample_size_in_using_central_limit_theorem_for_Weibull_distribution
- Choi, B. C. (2004). Computer assisted telephone interviewing (CATI) for health surveys in public health surveillance : Methodological issues and challenges ahead. *Chronic diseases in Canada (CDIC)*, 25(2). <https://www.canada.ca/en/public-health/services/reports-publications/health-promotion-chronic-disease-prevention-canada-research-policy-practice/vol-25-no-2-2004/computer-assisted-telephone-interviewing-cati-health-surveys-public-health-surveillance.html>
- Chowdhury, S. (2019). Role of gender in the ridership of public transport routes involving transfers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2673(4), 855-863. <https://doi.org/10.1177/0361198119837155>
- Cornet, Y., Lugano, G., Georgouli, C., & Milakis, D. (2022). Worthwhile travel time : A conceptual framework of the perceived value of enjoyment, productivity and fitness while travelling. *Transport Reviews*, 42(5), 580-603. <https://doi.org/10.1080/01441647.2021.1983067>
- Deschaintres, E., Morency, C., & Trépanier, M. (2021). Measuring changes in multimodal travel behavior resulting from transport supply improvement. *Transportation Research Record:*

Journal of the Transportation Research Board, 2675(9), 533-546.
<https://doi.org/10.1177/03611981211003104>

Di, X., & Liu, H. X. (2016). Boundedly rational route choice behavior : A review of models and methodologies. *Transportation Research Part B: Methodological*, 85, 142-179.
<https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.01.002>

Douglas, N. (2008). *Value and demand effect of rail service attributes*. RailCorp.
https://www.researchgate.net/publication/316990013_Value_and_Demand_Effect_of_Rail_Service_Attributes

Douglas, N., & Jones, M. (2013). Estimating transfer penalties and standardised income values of time by stated preference survey. *ARTF 2013 Proceedings*.
https://www.researchgate.net/publication/289414520_Estimating_transfer_penalties_and_standardised_income_values_of_time_by_stated_preference_survey

Douglas, N., & Karpouzis, G. J. (2006, octobre). *Valuing rail service attributes through rating surveys*. Australian Transport Research Forum, Adelaide, Australia.
https://www.researchgate.net/publication/316008297_Valuing_Rail_Service_Attributes_through_Rating_Surveys

Dowling, R. G., Flannery, A., Roupail, N. M., Petritsch, T. A., Landis, B. W., Bonneson, J. A., Ryus, P., Reinke, D. B., Vandehey, M., Transportation Research Board, & National Cooperative Highway Research Program. (2008). *Multimodal level of service analysis for urban streets* (p. 14175). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/14175>

- Espino, R., & Román, C. (2020). Valuation of transfer for bus users- The case of Gran Canaria. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 137, 131-144. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.05.003>
- Evans, J. E., Transportation Research Board, & National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2004). *Traveler response to transportation system changes handbook, third edition : Chapter 9, transit scheduling and frequency* (p. 23433). Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/23433>
- Exo. (2021, octobre 18). *Enquête web de mobilité—Exo souhaite connaitre vos nouvelles habitudes de transport*. Exo. <https://exo.quebec/fr/a-propos/medias-publications/communiqués-presse/enquete-web-de-mobilite-exo-souhaite-connaître-vos-nouvelles-habitudes-de-transport>
- Fan, Y., & Levinson, D. (2016). *Perception of waiting time at transit stops and stations* (No. 9; Transitway Impacts Research Program). University of Minnesota. <https://www.cts.umn.edu/research/project/transit-station-and-stop-design-and-travel-time-perceptions#:~:text=Based%20on%20the%20regression%20results,significantly%20reduce%20perceived%20waiting%20times>.
- Frappier, A. (2015). *Méthode d'évaluation de la diversité et de la qualité des alternatives de déplacement de transport en commun*. Polytechnique Montréal. <https://publications.polymtl.ca/1983/>
- Garcia-Martinez, A., Cascajo, R., Jara-Diaz, S. R., Chowdhury, S., & Monzon, A. (2018). Transfer penalties in multimodal public transport networks. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 114, 52-66. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.01.016>

- Gauthier, M.-A. (2020). *Impact du confort sur le choix des trajets en transport collectif*. Polytechnique Montréal. <https://publications.polymtl.ca/5432/>
- Genç, A., Alkhaledi, K., Sağlam, S., & Bendak, S. (2023). Commuters opinion on public transport services in mega cities : The case of Istanbul buses. *Frontiers in Sustainable Cities*, 5, 1291914. <https://doi.org/10.3389/frsc.2023.1291914>
- González, F., Aprigliano, V., Seriani, S., & Peña, A. (2025). Analyzing public transport wait times and identifying the most affected users in the metropolitan area of Valparaíso, Chile. *Applied Sciences*, 15(11), 5969. <https://doi.org/10.3390/app15115969>
- Gouvernement du Canada. (2025, mars 21). *Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada : Sommaire 2025*. Gouvernement du Canada. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/emissions-gaz-effet-serre/sources-puits-sommaire-2025.html>
- Grisé, E., & El-Geneidy, A. (2019). Transferring matters : Analysis of the influence of transfers on trip satisfaction. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2673(9), 254-265. <https://doi.org/10.1177/0361198119844964>
- Grisson, E., Burkhardt, J.-M., & Gyselinck, V. (2017). How do users choose their routes in public transport? The effect of individual profile and contextual factors. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 51, 24-37. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2017.08.011>
- Hakiminejad, Y., Pantesco, E., & Tavakoli, A. (2025). *Shaping passenger experience : An eye-tracking study of public transportation built environment* (No. arXiv:2501.02641). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.02641>

- Harms, I. M., Burdett, B. R. D., & Charlton, S. G. (2021). The role of route familiarity in traffic participants' behaviour and transport psychology research: A systematic review. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 9, 100331. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100331>
- Harter, R., Battaglia, M. P., Buskirk, T. D., Dillman, D. A., English, N., Fahimi, M., Frankel, M. R., Kennel, T., McMichael, J. P., Brook McPhee, C., Montaquila, J., Yancey, T., & Zukerberg, A. L. (2016). *Address-based sampling*. AAPOR. <https://aapor.org/publications-resources/reports/>
- Hasan, Z. (2021). Optimization of inventory total cost equation considering both shortage and backlogging cost by Taguchi analysis. *Recent Trends in Production Engineering*, 4(1). <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4638502>
- Horowitz, A. J., & Zlosel, D. J. (1981). Transfer penalties : Another look at transit riders' reluctance to transfer. *Transportation*, 10(3), 279-282. <https://doi.org/10.1007/BF00148463>
- Hunt, D. (1990). A logit model of public transport route choice. *ITE Journal*, 60(2), 26-30.
- Jain, J., & Lyons, G. (2008). The gift of travel time. *Journal of Transport Geography*, 16(2), 81-89. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2007.05.001>
- Jeudy, Y. (2019). *Outil d'aide au diagnostic et à la conception des réseaux de transport en commun*. Polytechnique Montréal. <https://publications.polymtl.ca/4000/>
- Kittelson & Associates, Inc., Brinckerhoff, P., KFH Group, Inc., Texas A&M Transportation Institute, & Arup. (2013). *Transit capacity and quality of service manual, third edition*. Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/24766>

- Klinkhardt, C., Kandler, K., Kagerbauer, M., & Vortisch, P. (2025). *Reliability of public transportation systems with autonomous first-/last-mile services in a stated mode choice experiment*.
https://www.researchgate.net/publication/390815882_Reliability_of_Public_Transportation_Systems_with_Autonomous_First-Last-Mile_Services_in_a_Stated_Mode_Choice_Experiment
- Lachapelle, U., & Boisjoly, G. (2023). Breaking down public transit travel time for more accurate transport equity policies : A trip component approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 175, 103756. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103756>
- LACMTA. (2011). *System-wide on-board origin-destination study* (p. 95).
<https://libraryarchives.metro.net/dpgtl/studies/2012-system-wide-on-board-origin-destination-study-draft-final.pdf>
- Lang, G. (2020). Review of route choice based on prospect theory. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 545(1), 012036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/545/1/012036>
- Li, G., Qu, H., & Li, J. (2020). Route choice probability model based on urban rail transit passenger classification. *ICTE 2019*, 532-539. <https://doi.org/10.1061/9780784482742.060>
- Litman, T. (2023). Valuing transit service quality improvements. *Journal of Public Transportation*, 11(2), 43-63. <https://doi.org/10.5038/2375-0901.11.2.3>
- Liu, L., Kar, A., Tokey, A. I., Le, H. T. K., & Miller, H. J. (2023). Disparities in public transit accessibility and usage by people with mobility disabilities : An evaluation using high-

resolution transit data. *Journal of Transport Geography*, 109, 103589.
<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2023.103589>

Liu, Y., Bunker, J., & Ferreira, L. (2010). Transit users' route-choice modelling in transit assignment : A Review. *Transport Reviews*, 30(6), 753-769.
<https://doi.org/10.1080/01441641003744261>

Meng, M., Rau, A., & Mahardhika, H. (2018). Public transport travel time perception : Effects of socioeconomic characteristics, trip characteristics and facility usage. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 114, 24-37.
<https://doi.org/10.1016/j.tr.2018.01.015>

Ministère des transports, de la mobilité durable et de l'électrification des transports. (2017). *Méthodologie des enquêtes origine-destination* (p. 11).
<https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/planification-transports/enquetes-origine-destination/pages/enquetes-origine-destination.aspx>

Morency, C. (2024, mai 4). *Diagnostic de la qualité des itinéraires en transport en commun*. présenté lors du 58e congrès de l'Association québécoise des transports (AQTr), Saint-Hyacinthe, Canada.

Negm, H., De Vos, J., Pot, F., & El-Geneidy, A. (2025). Perceived accessibility : A literature review. *Journal of Transport Geography*, 125, 104212.
<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2025.104212>

Nikolaidou, A., Kopsacheilis, A., Georgiadis, G., Noutsias, T., Politis, I., & Fyrogenis, I. (2023). Factors affecting public transport performance due to the COVID-19 outbreak : A worldwide analysis. *Cities*, 134, 104206. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104206>

- Norgate, S. H., Cooper-Ryan, A. M., Lavin, S., Stonier, C., & Cooper, C. L. (2020). The impact of public transport on the health of work commuters : A systematic review. *Health Psychology Review, 14*(2), 325-344. <https://doi.org/10.1080/17437199.2019.1618723>
- Outwater, M., Sana, B., Ferdous, N., Woodford, B., & Lobb, J. (2014). *Characteristics of premium transit services that affect choice of mode*. Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/22401>
- Parthasarathi, P., Levinson, D., & Hochmair, H. (2013). Network structure and travel time perception. *PLoS ONE, 8*(10), e77718. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077718>
- Pew Research Center. (2025). *Writing survey questions*. Pew Research Center. <https://www.pewresearch.org/writing-survey-questions/>
- Poirier, C. (2021). *Évaluation de la qualité et de la diversité des alternatives de transport en commun* (p. 151). Polytechnique Montréal. <https://publications.polymtl.ca/9733/>
- PTV Group. (2022). *Temps généralisé d'un itinéraire TI*. PTV VISUM. https://cgi.ptvgroup.com/vision-help/VISUM_2021_FRA/Content/1_Benutzermodell_IV/1_5_Widerstand_einer_IV-Route.htm#1_benutzermodell_iv_2033098965_1191500
- Ravalet, E. (2013, janvier 28). *Valeur du temps*. Forum vies mobiles. <https://forumviesmobiles.org/dictionnaire/593/valeur-du-temps>
- Raveau, S., Muñoz, J. C., & De Grange, L. (2011). A topological route choice model for metro. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, 45*(2), 138-147. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.12.004>

- Razo, M., & Gao, S. (2013). A rank-dependent expected utility model for strategic route choice with stated preference data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 27, 117-130. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.08.009>
- Roquigny, Q. (2013). *Évaluation socioéconomique des investissements publics (Tome 2)- Valeurs du temps*. Haut-commissariat à la stratégie et au plan. <https://www.strategie-plan.gouv.fr/publications/evaluation-socioeconomique-investissements-publics-tome-2>
- Société de transport de Montréal. (2025). *État du service*. Société de transport de Montréal. <https://www.stm.info/fr/infos/etat-du-service>
- Statistique Canada. (2015, novembre 27). *Collecte, saisie et codage des données*. Statistique Canada. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/12-539-x/2009001/collection-collecte-fra.htm>
- Statistique Canada. (2025, janvier 17). *Statistiques automobiles*. Statistique Canada. <https://www.statcan.gc.ca/fr/themes-debut/automobiles>
- Sugovic, M., & Witt, J. K. (2013). An older view on distance perception : Older adults perceive walkable extents as farther. *Experimental Brain Research*, 226(3), 383-391. <https://doi.org/10.1007/s00221-013-3447-y>
- Tawfik, A. M., Rakha, H. A., & Miller, S. D. (2010, novembre 9). *An experimental exploration of route choice : Identifying drivers choices and choice patterns, and capturing network evolution*. 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Funchal, Portugal. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2010.5625253>

- Tomhave, B. J., & Khani, A. (2022). Refined choice set generation and the investigation of multi-criteria transit route choice behavior. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 155, 484-500. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.11.005>
- Transit. (2025a). *RTL: bus 8*. Transit. <https://transitapp.com/fr/region/montr%C3%A9al/rtl/bus-8>
- Transit. (2025b). *RTL: bus 28*. Transit. <https://transitapp.com/fr/region/montr%C3%A9al/rtl/bus-28>
- Transit. (2025c). *RTL: bus 88*. Transit. <https://transitapp.com/fr/region/montr%C3%A9al/rtl/bus-88>
- Van Wee, B., Van Cranenburgh, S., & Maat, K. (2019). Substitutability as a spatial concept to evaluate travel alternatives. *Journal of Transport Geography*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.102469>
- Vega, D., Seriani, S., Peña, Á., Minatogawa, V., Aprigliano, V., Arredondo, B., Bastías, I., Rodriguez-Rodriguez, F., Muñoz, C., & Soto, R. (2025). Accessibility dilemma in metro stations: An experimental pilot study based on passengers' emotional experiences. *Sustainability*, 17(7), 3064. <https://doi.org/10.3390/su17073064>
- Vrtic, M., & Axhausen, K. (2003, janvier). *The impact of tilting trains in Switzerland: A route choice model of regional- and long distance public transport trips*. 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC, United States. https://www.researchgate.net/publication/237228794_The_impact_of_tilting_trains_in_Switzerland_a_route_choice_model_of_regional-_and_long_distance_public_transport_trips

- Wang, C.-N., Dang, T.-T., Le, T. Q., & Kewcharoenwong, P. (2020). Transportation optimization models for intermodal networks with fuzzy node capacity, detour factor, and vehicle utilization constraints. *Mathematics*, 8(12), 2109. <https://doi.org/10.3390/math8122109>
- Wang, J., & Rakha, H. (2020). Empirical study of effect of dynamic travel time information on driver route choice behavior. *Sensors*, 20(11), 3257. <https://doi.org/10.3390/s20113257>
- Wardman, M., & Hine, J. (2000). *Costs of interchange : A review of the literature*. The University of Leeds. <https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/2075/>
- Wardman, M., Hine, J., & Stradling, S. (2001, janvier). *Interchange and travel choice volume 1*. https://www.researchgate.net/publication/265320895_Interchange_and_Travel_Choice_Volume_1
- Yap, M., Wong, H., & Cats, O. (2023). Public transport crowding valuation in a post-pandemic era. *Transportation*, 52(1), 287-306. <https://doi.org/10.1007/s11116-023-10420-1>
- Yoo, G.-S. (2015). Transfer penalty estimation with transit trips from smartcard data in Seoul, Korea. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(4), 1108-1116. <https://doi.org/10.1007/s12205-013-1297-6>
- Zalewski, A., Sonenklar, D., Cohen, A., Kressner, J., & Macfarlane, G. (2019). *Public transit rider origin-destination survey methods and technologies* (p. 25428). Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/25428>

ANNEXE A COMMANDES TRACCLUS

Commande TRACCLUS pour le seuil de vitesse de 6 km/h :

```
py C:\Users\brode\Downloads\tracclus_dl-master\Traclus_DL.py
```

```
C:\Users\brode\Downloads\tracclus_dl-master\avant_tracclus_6kmh.txt 800 200 10 800
```

Commande TRACCLUS pour le seuil de vitesse de 10 km/h :

```
py C:\Users\brode\Downloads\tracclus_dl-master\Traclus_DL.py
```

```
C:\Users\brode\Downloads\tracclus_dl-master\avant_tracclus_10kmh.txt 700 500 10 600
```


ANNEXE B LIMITES DE LA MÉTHODE DE GÉNÉRATION D'ALTERNATIVES DANS TRANSITION ET DE LA CODIFICATION DES RÉSEAUX TC

Comme expliqué précédemment, 36,9 % des trajets choisis dans l'enquête OD n'étaient pas représentés dans les alternatives générées par le calculateur de Transition. Il est intéressant de savoir pourquoi la plateforme n'a pas simulé certains trajets choisis et d'identifier si ces enjeux sont liés à la méthode de génération des alternatives ou à la codification des réseaux TC (modalités de codification en format GTFS).

Pour identifier les limites de la méthode de génération des alternatives, la base de données contenant les 36,9 % des trajets est utilisée.

Base de données des trajets déclarés
qui n'apparaissent pas dans les
alternatives simulées par Transition
(36,9% des trajets déclarés)

Figure B.1: Base de données utilisée pour identifier les limites de Transition

Les alternatives ont été analysées, une par une, par rapport au trajet choisi afin de comprendre pourquoi la méthode n'extrait pas tous les trajets possibles. Il est donc question ici de créer une typologie de limites pour caractériser les diverses limites du générateur d'alternatives. Par la suite, il sera possible de résoudre ces limites afin d'extraire plus d'alternatives notamment le trajet choisi.

La typologie des limites de la méthode de génération d'alternatives est présentée ci-dessous.

OD se trouvant entre deux stations de métro d'une même ligne :

Lorsqu'une paire OD est entrée et que l'origine ou la destination se trouve entre deux stations de métro de la même ligne, seule une des deux stations de métro est considérée. La méthodologie va seulement proposer une station de métro puis passer aux autres options en supprimant cette ligne de métro. La problématique est dans la stratégie d'élimination des lignes. Il faudrait plutôt éliminer la station de métro selon la direction plutôt que retirer toute la ligne de métro.

Par exemple, dans la Figure B.2, le calculateur propose de descendre à la station Berri-UQAM mais ne propose pas de descendre à la station Sherbrooke alors que la destination se trouve entre

les deux stations. Comme le trajet déclaré dans l'OD est celui avec une sortie à Sherbrooke, il n'est pas inclus dans les alternatives générées.

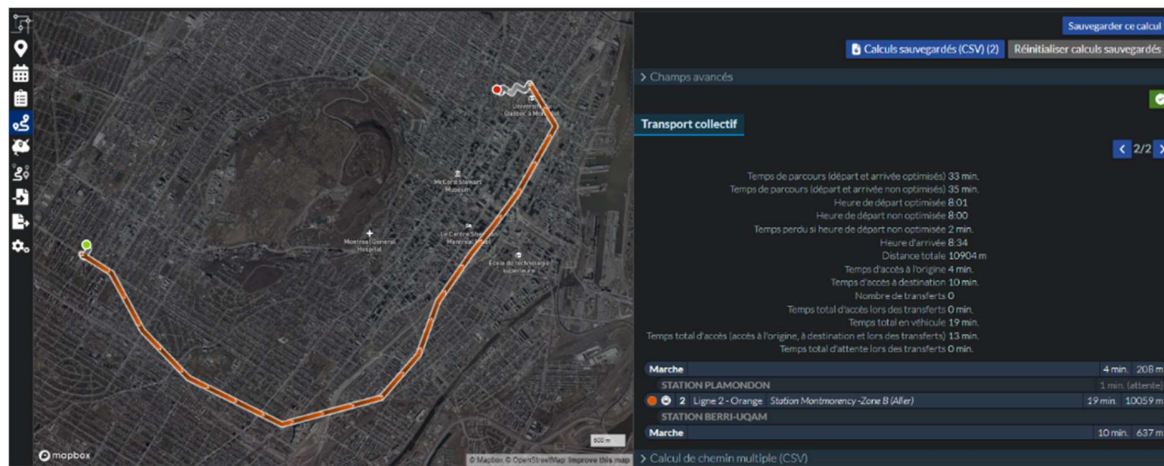


Figure B.2 : Destination se situant entre deux stations de métro (Chaire Mobilité, 2020)

Bus différents passant sur le même axe :

Quand une paire OD est entrée, il arrive parfois que plusieurs options de bus soient possibles mais qu'elles ne soient pas toutes listées. Plus précisément, en arrivant à un terminus de bus, il arrive que plusieurs trajets de bus passent par le même grand axe et que leurs trajets divergent à partir d'un certain endroit. Si la destination est sur cet axe et que plusieurs options de bus sont possibles, le calculateur ne va pas donner toutes les possibilités de bus. Lorsqu'un bus couvre le grand axe, les autres options de bus ne seront pas toutes nommées. Cette situation arrive beaucoup à Longueuil et à Laval.

Par exemple, lorsque la destination se trouve à Longueuil près du terminus Longueuil, le calculateur offre comme option le bus 88, le bus 8 et autre, mais selon le trajet choisi, le bus 28 a été choisi (une option non simulée).

Dans les Figure B.3, Figure B.4 et Figure B.5, il est possible de remarquer que les trois trajets de bus utilisent le même grand tronçon.

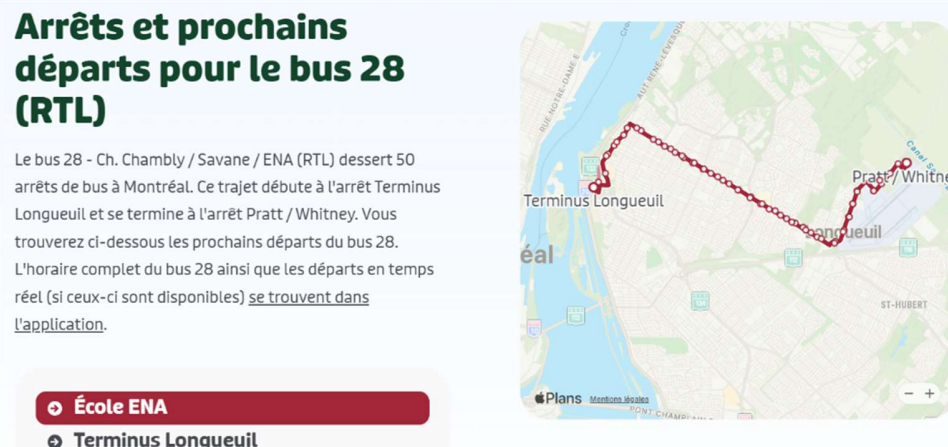


Figure B.3 : Trajet de la ligne de bus 28 de la RTL (Transit, 2025b)



Figure B.4: Trajet de la ligne de bus 88 de la RTL (Transit, 2025c)

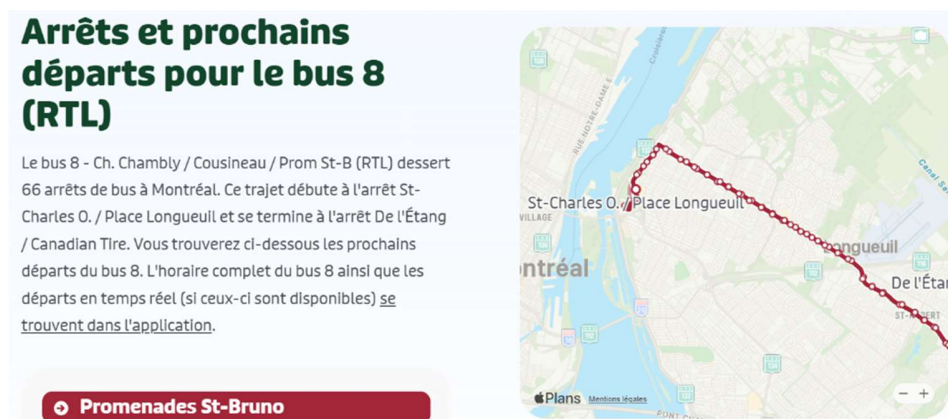


Figure B.5: Trajet de la ligne de bus 8 de la RTL (Transit, 2025a)

Bus répété dans une alternative :

Il est arrivé dans plusieurs trajets proposés que le bus 161 se répète dans une alternative. Voir la Figure B.6.

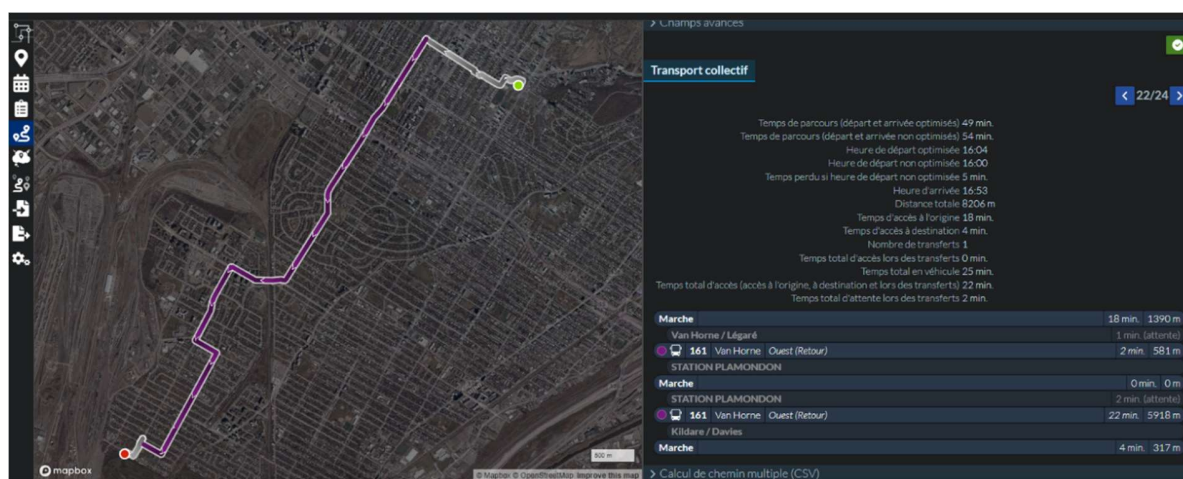


Figure B.6: Répétition de la ligne de bus 161 de la STM (Chaire Mobilité, 2020)

Dans cet exemple de trajet, le bus 161 est nommé deux fois alors que les deux bus vont dans la même direction. La personne doit prendre le bus 161 vers l'ouest, descendre à la station Plamondon et reprendre le bus 161 vers l'ouest à partir du même endroit.

OD se trouvant entre deux lignes de métro :

Il est aussi possible que l'origine ou la destination se trouve entre deux stations de métro qui sont au centre-ville, entre la ligne orange et verte. Par exemple, le calculateur pourrait proposer de marcher vers la ligne verte pour prendre le métro alors qu'il est aussi possible de marcher vers la ligne orange. Dans l'exemple ci-dessous, le calculateur propose de monter à la station Bonaventure et de prendre la ligne orange jusqu'à Plamondon. Cependant, le calculateur ne propose pas de monter à la station Peel alors que l'origine se trouve entre les deux stations comme dans la Figure B.7.

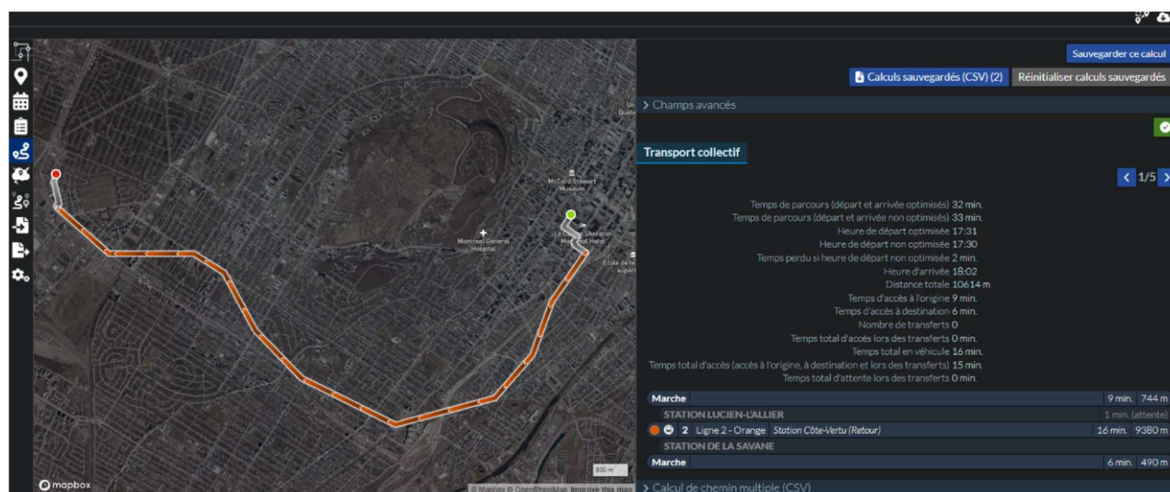


Figure B.7 : Origine ou destination se trouvant entre la ligne verte et la ligne orange du métro de Montréal (Chaire Mobilité, 2020)

Détour causé par la géographie :

Le calculateur propose souvent des trajets en métro simples et les plus directs possible mais il est possible que l'utilisateur utilise le métro ou le bus pour contourner le Mont-Royal et donc rallonger son trajet. Le passager prend un chemin non optimisé qui n'est pas proposé dans les alternatives, mais qui est tout de même possible.

Dans l'exemple de la Figure B.8, le calculateur propose un trajet simple qui utilise le métro ligne orange et ligne bleue.

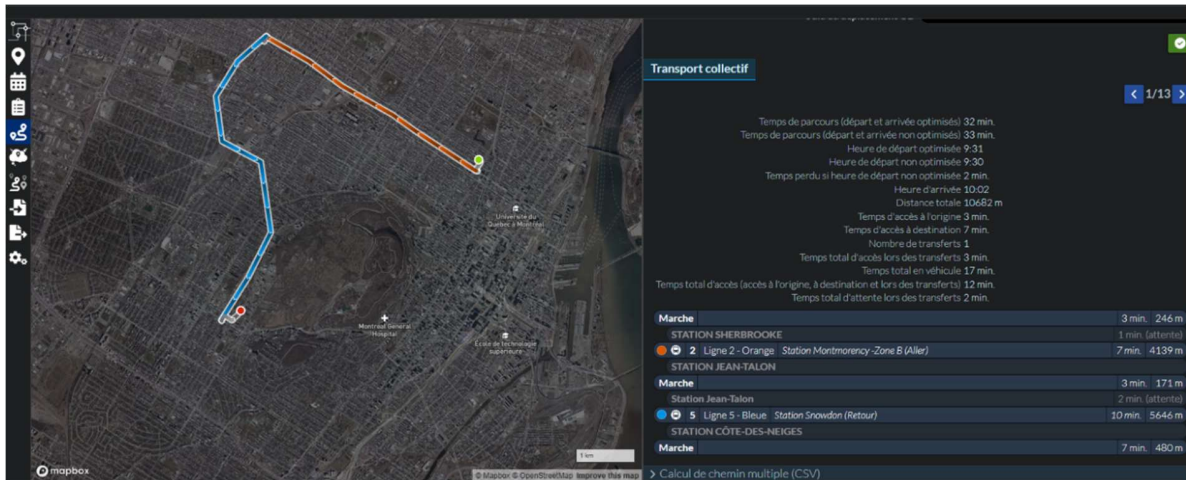


Figure B.8: Exemple de trajet simple (Chaire Mobilité, 2020)

Cependant, selon la Figure B.9, selon le trajet choisi, l'utilisateur a utilisé le chemin suivant: ligne orange de Sherbrooke à Snowdon et ensuite ligne de bus de Snowdon à Côte-des-Neiges, le tout en contournant le Mont-Royal.

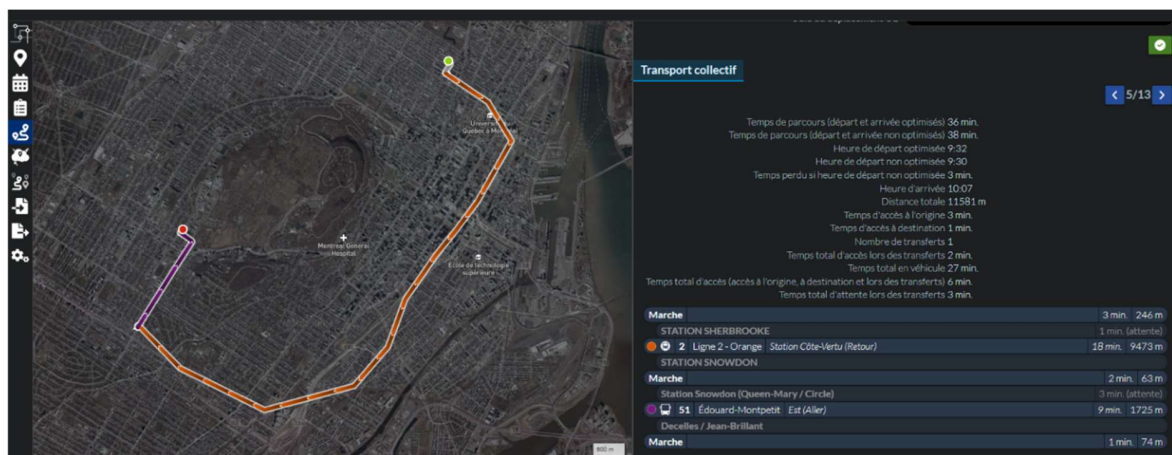


Figure B.9: Exemple de trajet allongé (Chaire Mobilité, 2020)

Ligne de train répétée dans une alternative :

Le calculateur donne parfois des alternatives de trajet où il faut prendre deux fois la même ligne de train dans des directions opposées. En effet, le calculateur propose de prendre le train dans la direction qui s'éloigne de la destination et met une correspondance, ensuite il propose de prendre

le train vers la destination. Ceci ajoute une correspondance et rallonge le temps de déplacement inutilement.

Cette situation arrive beaucoup avec les lignes de train Vaudreuil/Hudson (1100) et Deux-Montagnes (1101) et quelques fois avec les lignes Saint-Jérôme (1103) et Mascouche (1105).

Dans l'exemple de la Figure B.10, le calculateur propose de prendre la ligne de train Deux-Montagnes (1101) en direction nord de la gare Canora (121) jusqu'à la gare Mont-Royal (122) et de reprendre la ligne de Deux-Montagnes en direction sud de la gare Mont-Royal (122) jusqu'à la gare Centrale (120). Ceci peut être dû à un enjeu de codification des GTFS.

lig1AlternativeTransition	lig2AlternativeTransition	lig3AlternativeTransition	lig4AlternativeTransition	lig5AlternativeTransition	metro1AlternativeTransition	metro2AlternativeTransition	metro3AlternativeTransition	metro4AlternativeTransition	gare1AlternativeTransition	gare2AlternativeTransition	gare3AlternativeTransition
1101	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
1101	1101	0	0	0	0	0	0	0	121	120	122

Figure B.10 : Correspondance de train inutile 1

Dans la Figure B.11, voici un autre exemple où le calculateur donne une correspondance inutile qui éloigne de la destination. L'alternative propose de monter à la gare Mont-Royal (122), de faire une correspondance à la gare Montpellier (123) et descendre à la gare Centrale (120).

lig1AlternativeTransition	lig2AlternativeTransition	lig3AlternativeTransition	lig4AlternativeTransition	lig5AlternativeTransition	metro1AlternativeTransition	metro2AlternativeTransition	metro3AlternativeTransition	metro4AlternativeTransition	gare1AlternativeTransition	gare2AlternativeTransition	gare3AlternativeTransition
1101	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
1101	1101	150	0	0	0	0	0	0	122	120	123
1101	1101	427	0	0	0	0	0	0	122	120	123
1101	1101	0	0	0	0	0	0	0	122	120	123

Figure B.11 : Correspondance de train inutile 2

Cette limite peut être due à un problème d'algorithme ou aussi un enjeu de codification des GTFS (codification de l'accès à la gare de train ou de la ligne de train).

Paramètre de temps de marche maximal :

Parfois, le paramètre des temps de marche maximal n'est pas assez élevé. Il arrive quelques fois que l'utilisateur déclare avoir marché pour se rendre à une ligne de métro ou de bus mais que le temps de marche dépasse donc la limite maximale posée. L'alternative n'est donc pas offerte.

Par exemple, si le client déclare avoir marché depuis une certaine intersection jusqu'à une ligne de métro et que le temps d'accès à la marche dépasse le temps max, à ce moment-là, le calculateur ne proposera que des options "bus+métro" et jamais un trajet "métro" uniquement.

Même en augmentant le temps de marche maximal à 20 minutes, il y a encore des trajets choisis qui n'ont pas d'alternatives.

Paramètre du temps d'attente et de déplacement en bus:

Le temps d'attente pour un bus peut faire en sorte que l'alternative ne sera pas offerte. Si le temps d'attente pour le bus et le temps de déplacement dans le bus est plus long que la marche, l'option ne sera pas donnée.

Par exemple, ceci peut arriver si l'utilisateur déclare avoir pris la ligne de bus 18 pour deux arrêts avant de prendre la ligne orange. Si le temps d'attente à l'arrêt de bus est d'une minute et que le temps de parcours en bus est de trois minutes, le calculateur va proposer de marcher trois minutes plutôt que d'ajouter quatre minutes de temps de parcours.

ANNEXE C LISTE DES COEFFICIENTS POSSIBLES DE L'ÉQUATION DE COÛT GÉNÉRALISÉ PROVENANT DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE

Tableau C.1: Liste des valeurs des coefficients à tester pour l'équation de coût généralisé

Facteur	Coefficient	Source
Temps d'attente	1,35	Čelan et al., 2017
	1,413	Outwater et al., 2014
	1,5	Roquigny, 2013
	1,8	Kittelson & Associates, Inc. et al., 2013
	2,1	Kittelson & Associates, Inc. et al., 2013
	2,65	Tomhave & Khani, 2022
Temps d'accès/sortie	1,491	Outwater et al., 2014
	1,65	Tomhave & Khani, 2022
	1,7	Kittelson & Associates, Inc. et al., 2013
	2	Roquigny, 2013
	2,2	Kittelson & Associates, Inc. et al., 2013
	2,77	Tomhave & Khani, 2022
Correspondance (minutes)	3,7	Wardman & Hine, 2000
	3,8	Raveau et al., 2011
	4,5	Wardman et al., 2001
	5,1	Bovy & Hoogendoorn-Lanser, 2005
	5,4	Wardman & Hine, 2000
	6,7	Litman, 2023
	8	Wardman et al., 2001
	11,4	Bovy & Hoogendoorn-Lanser, 2005
	15,2	Garcia-Martinez et al., 2018
	17,7	Garcia-Martinez et al., 2018
	18,9	Vrtic & Axhausen, 2003

ANNEXE D COEFFICIENTS DE L'ÉQUATION DE COÛT GÉNÉRALISÉ SÉLECTIONNÉS POUR CHAQUE SEGMENT

Tableau D.1 : Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour les hommes de 65 ans et plus

Test	Facteurs			Taux succès brut (%)	S/N
	Temps attente	Temps marche	Correspondance		
1	1,35	1,491	3,7	63,99	-3,878
2	1,35	2,2	11,4	64,31	-3,834
3	1,35	2,77	18,9	63,52	-3,942
4	2,1	1,491	11,4	61,24	-4,259
5	2,1	2,2	18,9	61,71	-4,193
6	2,1	2,77	3,7	61,95	-4,159
7	2,65	1,491	18,9	60,06	-4,428
8	2,65	2,2	3,7	62,19	-4,126
9	2,65	2,77	11,4	63,21	-3,984

Tableau D.2 : Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour les femmes de 65 ans et plus

Test	Facteurs			Taux succès brut (%)	S/N
	Temps attente	Temps marche	Correspondance		
1	1,35	1,491	3,7	60,32	-4,391
2	1,35	2,2	11,4	61,42	-4,234
3	1,35	2,77	18,9	61,66	-4,200
4	2,1	1,491	11,4	58,30	-4,687
5	2,1	2,2	18,9	59,40	-4,524
6	2,1	2,77	3,7	59,26	-4,545
7	2,65	1,491	18,9	56,72	-4,925
8	2,65	2,2	3,7	59,69	-4,482
9	2,65	2,77	11,4	61,37	-4,241

Tableau D.3: Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour les femmes de 40 à 64 ans

Test	Facteurs			Taux succès brut (%)	S/N
	Temps attente	Temps marche	Correspondance		
1	1,35	1,491	3,7	60,96	-4,299
2	1,35	2,2	11,4	62,93	-4,023
3	1,35	2,77	18,9	62,27	-4,114
4	2,1	1,491	11,4	61,83	-4,176
5	2,1	2,2	18,9	61,58	-4,211
6	2,1	2,77	3,7	55,75	-5,075
7	2,65	1,491	18,9	59,94	-4,446
8	2,65	2,2	3,7	58,87	-4,602
9	2,65	2,77	11,4	60,95	-4,301

Tableau D.4: Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour les hommes de 40 à 64 ans

Test	Facteurs			Taux succès brut (%)	S/N
	Temps attente	Temps marche	Correspondance		
1	1,35	1,491	3,7	61,88	-4,169
2	1,35	2,2	11,4	62,50	-4,082
3	1,35	2,77	18,9	61,83	-4,176
4	2,1	1,491	11,4	63,44	-3,953
5	2,1	2,2	18,9	62,61	-4,067
6	2,1	2,77	3,7	55,51	-5,113
7	2,65	1,491	18,9	61,29	-4,252
8	2,65	2,2	3,7	58,32	-4,684
9	2,65	2,77	11,4	60,25	-4,401

Tableau D.5: Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour les hommes de 25 à 39 ans

Test	Facteurs			Taux succès brut (%)	S/N
	Temps attente	Temps marche	Correspondance		
1	1,35	1,491	3,7	61,76	-4,186
2	1,35	2,2	11,4	62,89	-4,028
3	1,35	2,77	18,9	61,84	-4,175
4	2,1	1,491	11,4	61,74	-4,189
5	2,1	2,2	18,9	60,91	-4,306
6	2,1	2,77	3,7	54,00	-5,352
7	2,65	1,491	18,9	59,36	-4,530
8	2,65	2,2	3,7	57,83	-4,757
9	2,65	2,77	11,4	60,06	-4,428

Tableau D.6 : Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour les femmes de 25 à 39 ans

Test	Facteurs			Taux succès brut (%)	S/N
	Temps attente	Temps marche	Correspondance		
1	1,35	1,491	3,7	62,15	-4,131
2	1,35	2,2	11,4	62,82	-4,038
3	1,35	2,77	18,9	61,77	-4,184
4	2,1	1,491	11,4	61,22	-4,262
5	2,1	2,2	18,9	60,92	-4,305
6	2,1	2,77	3,7	57,13	-4,863
7	2,65	1,491	18,9	58,33	-4,682
8	2,65	2,2	3,7	59,93	-4,447
9	2,65	2,77	11,4	61,03	-4,289

Tableau D.7: Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour les femmes de 15 à 24 ans

Test	Facteurs			Taux succès brut (%)	S/N
	Temps attente	Temps marche	Correspondance		
1	1,35	1,491	3,7	59,49	-4,511
2	1,35	2,2	11,4	60,63	-4,346
3	1,35	2,77	18,9	60,21	-4,407
4	2,1	1,491	11,4	58,82	-4,609
5	2,1	2,2	18,9	59,49	-4,511
6	2,1	2,77	3,7	54,36	-5,294
7	2,65	1,491	18,9	57,31	-4,835
8	2,65	2,2	3,7	57,26	-4,843
9	2,65	2,77	11,4	58,36	-4,678

Tableau D8 : Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour les hommes de 15 à 24 ans

Test	Facteurs			Taux succès brut (%)	S/N
	Temps attente	Temps marche	Correspondance		
1	1,35	1,491	3,7	57,83	-4,757
2	1,35	2,2	11,4	58,57	-4,646
3	1,35	2,77	18,9	58,32	-4,684
4	2,1	1,491	11,4	57,90	-4,746
5	2,1	2,2	18,9	58,69	-4,629
6	2,1	2,77	3,7	52,90	-5,531
7	2,65	1,491	18,9	55,97	-5,041
8	2,65	2,2	3,7	55,50	-5,114
9	2,65	2,77	11,4	57,23	-4,848

Tableau D.9 : Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour les hommes de 0 à 14 ans

Test	Facteurs			Taux succès brut (%)	S/N
	Temps attente	Temps marche	Correspondance		
1	1,35	1,491	3,7	58,65	-4,635
2	1,35	2,2	11,4	59,78	-4,469
3	1,35	2,77	18,9	58,93	-4,593
4	2,1	1,491	11,4	58,19	-4,703
5	2,1	2,2	18,9	58,47	-4,661
6	2,1	2,77	3,7	53,41	-5,448
7	2,65	1,491	18,9	56,69	-4,930
8	2,65	2,2	3,7	56,41	-4,973
9	2,65	2,77	11,4	57,90	-4,746

Tableau D.10 : Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour les femmes de 0 à 14 ans

Test	Facteurs			Taux succès brut (%)	S/N
	Temps attente	Temps marche	Correspondance		
1	1,35	1,491	3,7	62,69	-4,056
2	1,35	2,2	11,4	63,16	-3,991
3	1,35	2,77	18,9	61,74	-4,189
4	2,1	1,491	11,4	61,74	-4,189
5	2,1	2,2	18,9	61,65	-4,201
6	2,1	2,77	3,7	56,44	-4,968
7	2,65	1,491	18,9	60,32	-4,391
8	2,65	2,2	3,7	59,56	-4,501
9	2,65	2,77	11,4	60,42	-4,376

Tableau D.11: Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour le travail

Test	Facteurs			Taux succès brut (%)	S/N
	Temps attente	Temps marche	Correspondance		
1	1,35	1,491	3,7	61,27	-4,255
2	1,35	2,2	11,4	62,78	-4,044
3	1,35	2,77	18,9	61,85	-4,173
4	2,1	1,491	11,4	62,46	-4,088
5	2,1	2,2	18,9	61,97	-4,156
6	2,1	2,77	3,7	54,45	-5,280
7	2,65	1,491	18,9	60,16	-4,414
8	2,65	2,2	3,7	57,96	-4,737
9	2,65	2,77	11,4	60,24	-4,402

Tableau D.12: Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour l'étude

Test	Facteurs			Taux succès brut (%)	S/N
	Temps attente	Temps marche	Correspondance		
1	1,35	1,491	3,7	59,01	-4,581
2	1,35	2,2	11,4	59,57	-4,499
3	1,35	2,77	18,9	59,22	-4,551
4	2,1	1,491	11,4	58,79	-4,614
5	2,1	2,2	18,9	59,09	-4,570
6	2,1	2,77	3,7	53,46	-5,439
7	2,65	1,491	18,9	56,71	-4,927
8	2,65	2,2	3,7	56,26	-4,996
9	2,65	2,77	11,4	57,53	-4,802

Tableau D.13: Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour le loisir

Test	Facteurs			Taux succès brut (%)	S/N
	Temps attente	Temps marche	Correspondance		
1	1,35	1,491	3,7	63,54	-3,939
2	1,35	2,2	11,4	63,92	-3,887
3	1,35	2,77	18,9	63,40	-3,958
4	2,1	1,491	11,4	62,24	-4,119
5	2,1	2,2	18,9	61,07	-4,283
6	2,1	2,77	3,7	58,93	-4,593
7	2,65	1,491	18,9	60,56	-4,356
8	2,65	2,2	3,7	61,07	-4,283
9	2,65	2,77	11,4	62,28	-4,113

Tableau D.14: Combinaisons tests de la méthode Taguchi pour le magasinage

Test	Facteurs			Taux succès brut (%)	S/N
	Temps attente	Temps marche	Correspondance		
1	1,35	1,491	3,7	65,57	-3,666
2	1,35	2,2	11,4	65,84	-3,630
3	1,35	2,77	18,9	65,64	-3,657
4	2,1	1,491	11,4	63,17	-3,990
5	2,1	2,2	18,9	63,90	-3,890
6	2,1	2,77	3,7	63,24	-3,980
7	2,65	1,491	18,9	61,70	-4,194
8	2,65	2,2	3,7	64,64	-3,790
9	2,65	2,77	11,4	64,71	-3,781

ANNEXE E TESTS STATISTIQUES POUR ASSURER LA DIFFÉRENCES SIGNIFICATIVES DES SOUS-ENSEMBLES DE TRAJETS PCC, PPCC ET PCPC

Différence du temps de déplacement des trois sous-ensembles :

Les temps de déplacement des trois sous-ensembles ne suivent pas des distributions normales tel que déduit par la Figure 4.11, en effet, les distributions sont très asymétriques. Le test global Kruskal-Wallis sera donc utilisé afin de démontrer la différence des trois sous-ensembles (plutôt que l'ANOVA).

Les hypothèses du test Kruskal-Wallis sont les suivantes:

H_0 : les trois groupes ont la même distribution de temps de déplacement.

H_1 : au moins une distribution est différente.

Si $p < 0,05$, l'hypothèse nulle est rejetée.

Les résultats du test Kruskal-Wallis démontrent que $p < 2,2 \times 10^{-16}$, donc au moins un des groupes est significativement différent des autres en termes de temps de déplacement.

Ensuite, le test post-hoc de Dunn (avec correction de Bonferroni) est effectué pour identifier les paires de groupes présentant des différences significatives. Si $p < 0,05$, il y a une différence significative entre les deux groupes.

Les comparaisons post-hoc de Dunn indiquent que les différences de temps de déplacement moyen sont significatives entre tous les groupes (PCPC vs PCC : $Z = -43,46$ et $p \text{ ajusté} < 0.0001$; PPCC vs PCC : $Z = -60,5$ et $p \text{ ajusté} < 0.0001$; PPCC vs PCPC : $Z = -17,83$ et $p \text{ ajusté} \approx 1,16 \times 10^{-70}$). Ainsi, le temps de déplacement diffère de manière significative entre tous les groupes.

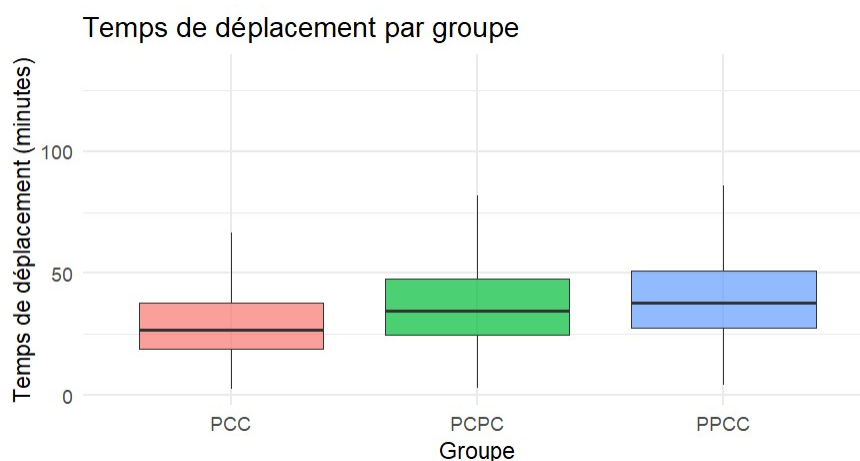


Figure E.1: Différence entre les trois sous-ensembles pour le temps de déplacement

Différence du nombre de correspondance des trois sous-ensembles :

En observant la Figure 4.12, il est possible de remarquer que le nombre de correspondances est une variable discrète donc le test du khi-carré est utilisé afin de démontrer la différence des trois sous-ensembles.

Les hypothèses du test du khi-carré sont les suivantes:

H_0 : les trois groupes ont la même distribution du nombre de correspondance.

H_1 : au moins une distribution est différente.

Si $p < 0,05$, l'hypothèse nulle est rejetée.

Les résultats du test du khi-carré démontrent que $p < 2,2 \times 10^{-16}$, donc les distributions du nombre de correspondances des trois groupes sont significativement différentes.

Différence du temps d'accès des trois sous-ensembles :

Les temps d'accès des trois sous-ensembles ne suivent pas des distributions normales tel que déduit par la Figure 4.13, en effet, les distributions sont très asymétriques. Le test global Kruskal-Wallis est donc utilisé afin de démontrer la différence des trois sous-ensembles (plutôt que l'ANOVA) et est présenté en ANNEXE .

Les hypothèses du test Kruskal-Wallis sont les suivantes:

H_0 : les trois groupes ont la même distribution de temps d'accès.

H_1 : au moins une distribution est différente.

Si $p < 0,05$, l'hypothèse nulle est rejetée.

Les résultats du test Kruskal-Wallis démontrent que $p < 2,2 \times 10^{-16}$, donc au moins un des groupes est significativement différent des autres en termes de temps d'accès.

Ensuite, le test post-hoc de Dunn (avec correction de Bonferroni) est effectué pour identifier les paires de groupes présentant des différences significatives. Si $p < 0,05$, il y a une différence significative entre les deux groupes.

Les comparaisons post-hoc de Dunn indiquent que les différences de temps d'accès moyen sont significatives entre tous les groupes (PCPC vs PCC : $Z = 0,95$ et $p \text{ ajusté} = 1$; PPCC vs PCC : $Z = -38,5$ et $p \text{ ajusté} < 0,001$; PPCC vs PCPC : $Z = 36,9$ et $p \text{ ajusté} \approx 4,21 \times 10^{-298}$). Ainsi, le temps d'accès du groupe PCC est significativement différent des deux autres. Les groupes PCC et PCPC ne sont pas significativement différents.

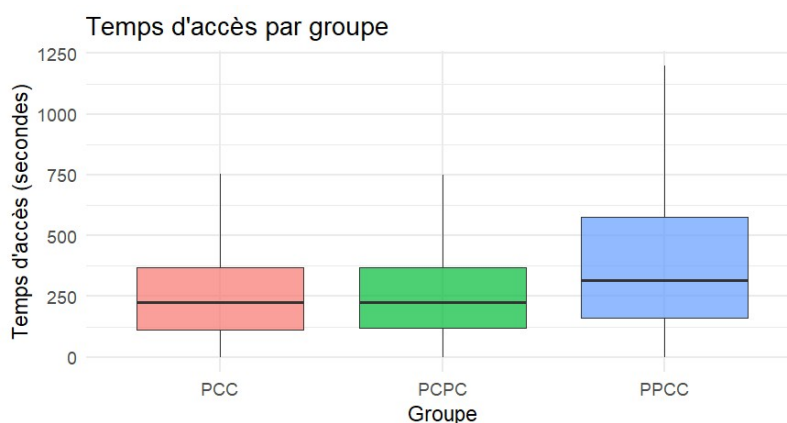


Figure E.2 : Différence entre les trois sous-ensembles pour le temps d'accès

Différence du temps de sortie des trois sous-ensembles :

Les temps de sortie des trois sous-ensembles ne suivent pas des distributions normales tel que déduit par la Figure 4.14, en effet, les distributions sont très asymétriques. Le test global Kruskal-

Wallis est donc utilisé afin de démontrer la différence des trois sous-ensembles (plutôt que l'ANOVA).

Les hypothèses du test Kruskal-Wallis sont les suivantes:

H_0 : les trois groupes ont la même distribution de temps de sortie.

H_1 : au moins une distribution est différente.

Si $p < 0,05$, l'hypothèse nulle est rejetée.

Les résultats du test Kruskal-Wallis démontrent que $p < 2,2 \times 10^{-16}$, donc au moins un des groupes est significativement différent des autres en termes de temps de sortie.

Ensuite, le test post-hoc de Dunn (avec correction de Bonferroni) est effectué pour identifier les paires de groupes présentant des différences significatives. Si $p < 0,05$, il y a une différence significative entre les deux groupes.

Les comparaisons post-hoc de Dunn indiquent que les différences de temps de sortie moyen sont significatives entre tous les groupes (PCPC vs PCC : $Z = -0,576$ et $p \text{ ajusté} = 1$; PPCC vs PCC : $Z = 42,8$ et $p \text{ ajusté} < 0,001$; PPCC vs PCPC : $Z = 42,5$ et $p \text{ ajusté} < 0,001$). Ainsi, le temps de sortie du groupe PCC est significativement différent des deux autres. Les groupes PCC et PCPC ne sont pas significativement différents.

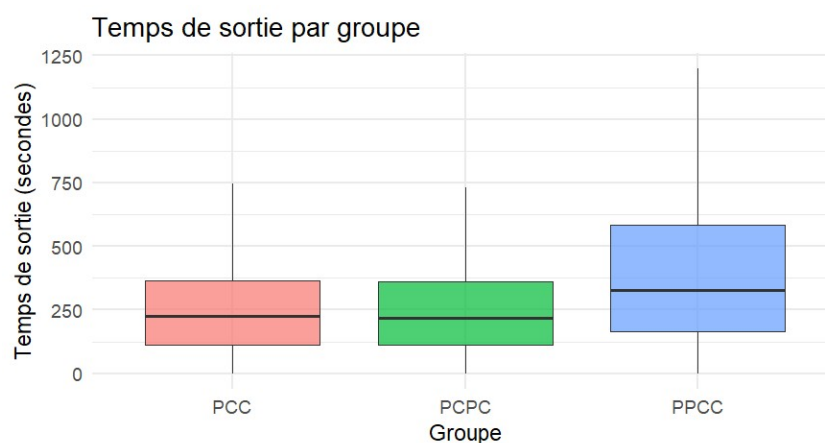


Figure E.3: Différence entre les trois sous-ensembles pour le temps de sortie

Différence de la vitesse des trois sous-ensembles :

En observant la Figure 4.15, il est possible de remarquer que la vitesse est une variable discrète donc le test du khi-carré est utilisé afin de démontrer la différence des trois sous-ensembles.

Les hypothèses du test du khi-carré sont les suivantes:

H_0 : les trois groupes ont la même distribution du nombre de correspondance.

H_1 : au moins une distribution est différente.

Si $p < 0,05$, l'hypothèse nulle est rejetée.

Les résultats du test du khi-carré démontrent que $p < 2,2 \times 10^{-16}$, donc les distributions du nombre de correspondances des trois groupes sont significativement différentes.

Différence du temps d'attente en correspondance des trois sous-ensembles :

Les temps d'attente en correspondance des trois sous-ensembles ne suivent pas des distributions normales tel que déduit par la Figure 4.16, en effet, les distributions sont très asymétriques. Le test global Kruskal-Wallis est donc utilisé afin de démontrer la différence des trois sous-ensembles (plutôt que l'ANOVA).

Les hypothèses du test Kruskal-Wallis sont les suivantes:

H_0 : les trois groupes ont la même distribution de temps d'attente en correspondance.

H_1 : au moins une distribution est différente.

Si $p < 0,05$, l'hypothèse nulle est rejetée.

Les résultats du test Kruskal-Wallis démontrent que $p < 2,2 \times 10^{-16}$, donc au moins un des groupes est significativement différent des autres en termes de temps d'attente en correspondance.

Ensuite, le test post-hoc de Dunn (avec correction de Bonferroni) est effectué pour identifier les paires de groupes présentant des différences significatives. Si $p < 0,05$, il y a une différence significative entre les deux groupes.

Les comparaisons post-hoc de Dunn indiquent que les différences de temps d'attente en correspondance moyen sont significatives entre tous les groupes (PCPC vs PCC : $Z=76,9$ et p ajusté $< 0,001$; PPCC vs PCC : $Z=23,8$ et p ajusté $\approx 1,11 \times 10^{-124}$; PPCC vs PCPC : $Z=-50,2$ et p ajusté $<$

0,001). Ainsi, le temps d'attente en correspondance des trois groupes est significativement différent.

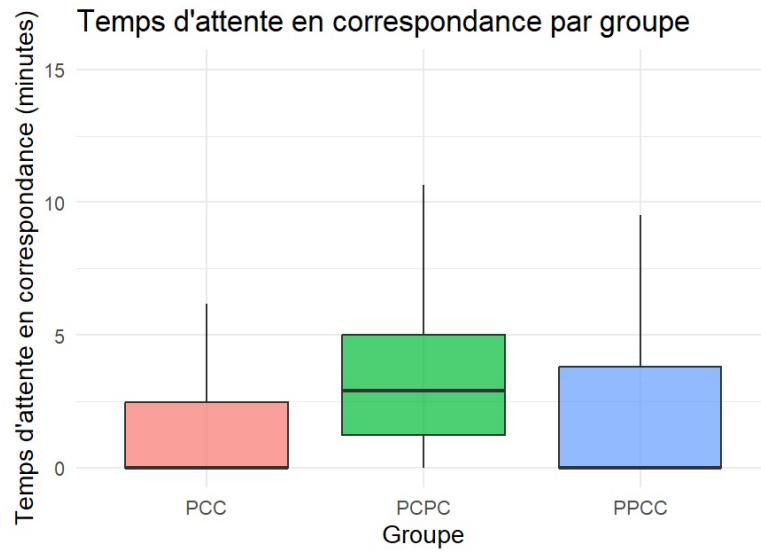


Figure E.4: Différence entre les trois sous-ensembles pour le temps d'attente en correspondance

ANNEXE F EXEMPLE DES ÉTAPES DE SÉLECTION DES COEFFICIENTS DE L'ÉQUATION DE COÛT GÉNÉRALISÉ POUR TOUTE LA BASE DE DONNÉES

Les Tableau F., Tableau F.2 et Tableau F.3 démontrent, pour toute la base de données, les étapes effectuées pour obtenir les coefficients de l'équation de coût généralisé qui maximisent le taux de succès avec la méthode Taguchi.

Tableau F.1: Combinaisons tests de la méthode Taguchi (toute la base de données)

Test	Facteurs			Taux succès brut (%)	S/N
	Temps attente	Temps marche	Correspondance		
1	1,35	1,491	3,7	60,86	-4,313
2	1,35	2,2	11,4	61,93	-4,162
3	1,35	2,77	18,9	61,26	-4,256
4	2,1	1,491	11,4	60,80	-4,322
5	2,1	2,2	18,9	60,76	-4,328
6	2,1	2,77	3,7	55,58	-5,102
7	2,65	1,491	18,9	58,79	-4,614
8	2,65	2,2	3,7	58,33	-4,682
9	2,65	2,77	11,4	59,99	-4,438

Tableau F.2: Moyennes des S/N pour chaque facteur et chaque niveau (toute la base de données)

Niveau	Tests concernés	Temps attente
1	1,2,3	-4,244
2	4,5,6	-4,584
3	7,8,9	-4,578
Niveau	Tests concernés	Temps marche
1	1,4,7	-4,416
2	2,5,8	-4,391
3	3,6,9	-4,599
Niveau	Tests concernés	Correspondance
1	1,6,8	-4,699
2	2,4,9	-4,307
3	3,5,7	-4,399

Tableau F.3: Combinaison de coefficients de l'équation de coût généralisé sélectionnée (toute la base de données)

Facteurs			Taux succès Taguchi (%)	Taux succès trajets PCC (%)
Temps attente	Temps marche	Correspondance		
1,35	2,2	11,4	61,92	54,44