

Titre: Outil de planification de tournées de transport à la demande pour la desserte de gares de train de banlieue
Title:

Auteur: Shirwa Mahdi
Author:

Date: 2021

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Mahdi, S. (2021). Outil de planification de tournées de transport à la demande pour la desserte de gares de train de banlieue [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/9083/>
Citation:

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

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/9083/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Martin Trépanier, & Lijun Sun
Advisors:

Programme: Maîtrise recherche en génie industriel
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Outil de planification de tournées de transport à la demande pour la desserte
de gares de train de banlieue**

SHIRWA MAHDI

Département de mathématique et de génie industriel

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

Génie industriel

Juin 2021

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Outil de planification de tournées de transport à la demande pour la desserte de gares de train de banlieue

présenté par **Shirwa MAHDI**

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

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

Maha BEN ALI, présidente

Martin TRÉPANIÉ, membre et directeur de recherche

Lijun SUN, membre et codirecteur de recherche

Hamzeh ALIZADEH, membre

DÉDICACE

À mes parents, ma famille et mes amis qui m'ont soutenu...

au cours de mes années d'études.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier premièrement mes directeurs de recherche, les professeurs Martin Trépanier et Lijun Sun, pour leur assistance, leur soutien et leurs conseils tout au long de cette maîtrise recherche à l'École Polytechnique de Montréal.

Je remercie également Maha Ben Ali et Hamzeh Alizadeh d'avoir accepté d'être respectivement présidente et membre du jury pour ce mémoire. Je les remercie pour le temps qu'ils ont consacré à l'étude de ce projet.

Je remercie Exo, et particulièrement François Turcotte-Goulet et Hamzeh Alizadeh, pour leur investissement dans cette étude. L'intérêt qu'ils ont porté à ce projet et les données qu'ils ont fournies ont permis sa réalisation. Mes remerciements vont aussi pour le financement obtenu par le biais de l'organisme MITACS.

Finalement, j'aimerais également remercier mon frère Osman Mahdi pour son support moral tout au long du projet.

RÉSUMÉ

L'accès aux transports publics a toujours été une préoccupation; mais plus récemment, l'intérêt s'est accru pour la rationalisation de la "chaîne" de déplacements, qui comprend le voyage vers et depuis les stations ou les arrêts désignés par les différents modes de transport (Givoni & Rietveld, 2007). Le gouvernement du Québec a confirmé des objectifs très ambitieux à horizon 2030 pour la réduction des émissions de GES (-37,5%) et de la consommation d'hydrocarbures (-40%). Pour atteindre leurs objectifs, plusieurs projets sont mis en place comme l'exploration du potentiel de transport collectif flexible comme le *microtransit*.

Ce mémoire étudie le potentiel de *microtransit* dans le réseau de transport métropolitain de Montréal géré par la compagnie Exo. L'organisme Exo a débuté ses activités le 1er juin 2017 et englobe sous sa charge l'agence métropolitaine de transport (AMT) et 14 organismes de transport locaux. Dans ce contexte, nous cherchons par ce mémoire à faciliter Exo à choisir la meilleure stratégie pour implémenter ce nouveau service complémentaire à leur offre de transport.

Nous avons développé un algorithme itératif inspiré de l'algorithme de « *Recherche taboue* », une métaheuristique employant des méthodes de recherche locale utilisées pour l'optimisation mathématique. Cet algorithme est ensuite utilisé pour répondre aux questions assujetties au projet comme la taille optimale de la flotte véhicule pour répondre à la demande d'une gare prédéterminée. Les résultats de ce mémoire sont encourageants pour la clientèle utilisant le service de train pour se rendre ou quitter leur domicile. Nous concluons que le potentiel de *microtransit* est présent avec 60% des usagers se situant dans un rayon de 2,5 km de la gare de départ.

De plus, nous avons développé un tableau de bord visant à donner la liberté au gestionnaire d'effectuer des tests sur les usagers. Les différentes variables dans ce site web correspondent à la taille des véhicules, de la flotte, du temps de trajets maximum du véhicule de desserte, la catégorie de client choisie comme le ramassage de client se déplaçant avec leur véhicule personnel, la gare et l'heure de départ du train.

ABSTRACT

Access to public transport has always been a concern; but more recently, interest has grown in rationalizing the "chain" of trips, which includes travel to and from designated stations or stops by different modes of transport (Givoni & Rietveld, 2007). The Quebec government has confirmed very ambitious targets for the reduction of GHG emissions (-37.5%) and hydrocarbon consumption (-40%) by 2030. To reach their objectives, several projects are being implemented such as the exploration of the potential of flexible public transportation such as *microtransit*.

This paper studies the potential of *microtransit* in the Montreal metropolitan transportation network managed by Exo. Exo began operations on June 1, 2017 and includes the Metropolitan Transportation Agency (MTA) and 14 local transit agencies. In this context, we aim to facilitate Exo to choose the best strategy to implement this new service complementary to their transportation offer.

We have developed an iterative algorithm inspired by the *Taboo Search* algorithm, a metaheuristic employing local search methods used for mathematical optimization. This algorithm is then used to answer the project question such as the optimal size of the vehicle fleet to meet the demand for a predetermined station. The results of this thesis are encouraging for customers using the train service to travel to and from their homes. We conclude that the potential for *microtransit* is present with 60% of the users being within 2.5 km of the departure station.

In addition, we have developed a dashboard to give the manager the freedom to test the users. The different variables in this website correspond to the size of the vehicles, the fleet, the maximum travel time of the vehicle, the category of customer chosen as the collection of customers moving with their personal vehicle, the station, and the time of the departure of the train.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES.....	XII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XV
LISTE DES ANNEXES.....	XVI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	3
2.1 Microtransit	3
2.2 Premier et dernier kilomètre.....	6
2.3 VRPTW.....	9
2.4 Recherche Taboue	11
2.5 Conclusion.....	12
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE.....	13
3.1 Collecte et analyse de données.....	14
3.1.1 Cas d'étude.....	14
3.1.2 Préparation de la base de données.....	15
3.2 Formulation du problème mathématique de transport à la demande	16
3.2.1 Définition du problème	17
3.3 Algorithme général pour le VRPTW	19

3.3.1	Initialisation.....	20
3.3.2	Génération de la population initiale	21
3.3.3	Évaluation du voisinage	22
3.3.4	Intensification et diversification.....	24
3.4	Indicateur de performances	25
CHAPITRE 4 ANALYSE DES DONNÉES		28
4.1	Analyse descriptive	28
4.2	Données spatio-temporelles	30
4.3	Analyse probabiliste du temps d'avance	35
CHAPITRE 5 EXPÉRIMENTATIONS ET RÉSULTATS		38
5.1	Initialisations des paramètres du problème d'optimisation.....	38
5.2	Analyse de l'impact des différentes sections de la fonction objectives	39
5.2.1	Description des différentes fonctions objectifs	39
5.2.2	Initialisation des paramètres.....	41
5.2.3	Analyse sur un échantillonnage de client allant vers la gare.....	41
5.2.4	Analyse sur un échantillonnage de client quittant la gare	44
5.2.5	Conclusion.....	46
5.3	Analyse de la variation de la fonction objective	46
5.3.1	Initialisation des paramètres.....	46
5.3.2	Analyse des résultats	47
5.3.3	Conclusion.....	49
5.4	Plan d'expérience sur la taille de la flotte et la capacité des véhicules	50
5.4.1	Initialisation des paramètres.....	50
5.4.2	Analyse des résultats	51

5.4.3	Conclusion.....	53
5.5	Automatisation du choix de la gare faite par le système.....	54
5.5.1	Initialisation des paramètres.....	54
5.5.2	Analyse des résultats des clients arrivant à la gare (matinée).....	55
5.5.3	Analyse des résultats des clients quittant la gare(après-midi).....	57
5.5.4	Conclusion.....	58
5.6	Analyse des tournées en fonction du mode de choix	59
5.6.1	Initialisation des paramètres.....	59
5.6.2	Analyse des tournées des clients allant vers la gare (matinée)	60
5.6.3	Analyse des tournées des clients quittant la gare (après-midi)	61
5.6.4	Conclusion.....	62
CHAPITRE 6 OUTIL INTERACTIF DE CONFECTION DE TOURNÉES		63
6.1	Structure de la base de données.....	63
6.2	Présentation de l'interface web	64
6.2.1	Page de démarrage	64
6.2.2	Interface de confection de tournées.....	65
CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		68
7.1	Synthèse des résultats.....	68
7.2	Limitation et perspectives	70
RÉFÉRENCES.....		71
ANNEXES.....		74

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1: Caractéristiques de la base de données	15
Tableau 3.2 : Répartition des colonnes de la base de données brute	15
Tableau 3.3 : Caractéristique des colonnes utilisées pour le projet	16
Tableau 3.4 : Tableau explicatif des variables de la fonction objectif	18
Tableau 3.5 : Tableau explicatif des variables de la fonction objectif	19
Tableau 4.1 : Tableau présentant la typologie des gares	31
Tableau 4.2 : Tableau représentatif du temps d'avance de la liste des clients se rendant à la gare	35
Tableau 4.3 : Tableau représentatif de l'analyse de corrélation entre les variables	36
Tableau 4.4 : Tableau représentatif du test de Kolmogorov-Smirnov	37
Tableau 5.1 : Paramètres fixés pour l'algorithme de recherche taboue	39
Tableau 5.2 : Extrait de la tournée de véhicule des deux premières fonctions objectifs de la gare Delson pour le départ à 07h31.....	42
Tableau 5.3 : Extrait de la tournée de véhicule de la troisième fonction objectif de la gare Delson pour le départ à 07h31	42
Tableau 5.4 : Extrait de la tournée de véhicule de la première fonction objectif de la gare Saint- Constant pour le départ à 06h45.....	43
Tableau 5.5 : Extrait de la tournée de véhicule des deux dernières fonctions objectifs de la gare Saint-Constant pour le départ à 06h45. Enfin, le tableau ci-dessous présente un résumé des indicateurs de performances ; on peut voir une amélioration significative de la solution en passant de la fonction objectif minimisant la somme des distances et celle qui englobe les autres sections.	43
Tableau 5.6 : Sommaire des indicateurs de performance des échantillons de client allant vers la gare	44
Tableau 5.7 : Extrait de la tournée de véhicule de la première fonction objectif de la gare Saint- Constant à 16h26	44

Tableau 5.8 : Extrait de la tournée de véhicule des deux dernières fonctions objectifs de la gare Saint-Constant à 16h26	45
Tableau 5.9 : Sommaire des indicateurs de performances des échantillons de client quittant la gare	45
Tableau 5.10 : Plan d'expérience	51
Tableau 5.11 : Tableau représentatif des nombres de clients changeant de gare (1)	55
Tableau 5.12 : Tableau représentatif des nombres de clients changeant de gare (2)	56
Tableau 5.13 : Extrait de la tournée de véhicule de la gare Saint-Constant pour le départ 07h36 (version initiale)	56
Tableau 5.14 : Extrait de la tournée de véhicule de la gare Saint-Constant pour le départ 07h36 (modification).....	56
Tableau 5.15 : Tableau représentatif des nombres de clients changeant de gare (3)	57
Tableau 5.16 : Liste de client réassigné dans une gare secondaire	57
Tableau 5.17 : Tableau représentatif des nombres de clients changeant de gare (4)	58
Tableau 5.18 : Sommaire des indicateurs de performances pour la gare Saint-Constant pour le départ à 07h05	60
Tableau 5.19 : Sommaire des indicateurs de performances pour la gare Sainte-Catherine pour le départ à 08h11	61
Tableau 5.20 : Sommaire des indicateurs de performances pour la gare Sainte-Catherine pour le départ de 16h22	61
Tableau 5.21 : Sommaire des indicateurs de performances pour la gare Saint-Constant pour le départ de 16h47	62
Tableau 6.1 : Tableau explicatif des colonnes des données de l'interface.....	66

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Schéma représentant les technologies de transport partagé (Shaheen,2020).....	4
Figure 3.1 : Organigramme de la méthodologie	13
Figure 3.2 : Ligne de Train "Exo4"	14
Figure 3.3 : Représentation de la problématique d'optimisation.....	19
Figure 3.4 : Pseudo-code de l'algorithme tabou	21
Figure 3.5 : Pseudo-code de la solution initiale	22
Figure 3.6 : Représentation de l'échange entre 2 clients d'itinéraires différents	23
Figure 3.7 : Représentation de l'ajout d'un client dans un véhicule non rempli.....	23
Figure 3.8 : Représentation du changement de l'itinéraire d'un véhicule spécifique	24
Figure 3.9 : Pseudocode de l'intensification.....	24
Figure 3.10 : Pseudocode de la diversification	25
Figure 4.1 : Histogramme représentant la liste des modes à l'origine(Gare Sainte-Catherine/ Gare Saint-Constant / Gare Delson).....	28
Figure 4.2 : Histogramme du nombre de clients par titre de transport.....	29
Figure 4.3 : Histogramme présentant le nombre de clients par motif de déplacement à l'origine .	29
Figure 4.4 : Histogramme présentant le nombre de clients par motif de déplacement à la destination	30
Figure 4.5 : Répartition spatiale des clients	32
Figure 4.6 : Figure représentant le nombre de clients par l'heure de déplacement	33
Figure 4.7 : Histogramme représentant le nombre de clients en fonction de leur distance de la gare et par le mode de déplacement (vers la gare)	34
Figure 4.8 : Histogramme représentant le nombre de clients en fonction de leur distance de la gare et par le mode de déplacement (de la gare)	34
Figure 4.9 : Courbe présentant la distribution versus les données empiriques	37

Figure 5.1 : Schéma représentatif des expérimentations et résultats comparatifs.....	38
Figure 5.2 : Première fonction objectif	40
Figure 5.3 : Seconde Fonction objectif	40
Figure 5.4 : Troisième fonction objectif.....	40
Figure 5.5 : Variation de la fonction objectif pour la gare Sainte-Catherine pour 07h09.....	47
Figure 5.6 : Variation de la fonction objectif pour la gare Saint-Constant pour 07h36.....	48
Figure 5.7 : Variation de la fonction objectif pour la gare Delson pour 16h26	48
Figure 5.8 : Variation de la fonction objectif pour la gare Sainte-Catherine pour 16h43.....	49
Figure 5.9 : Histogrammes présentant les indicateurs de performances pour les clients de la gare Saint-Constant pour le train de 07h36.....	52
Figure 5.10 : Histogramme présentant les indicateurs de performances pour les clients de la gare Sainte-Catherine pour le départ de 16h43	53
Figure 6.1: Modèle relationnel de données	63
Figure 6.2 : Interface de démarrage	65
Figure 6.3 : Tableau de bord	67
Figure 6.4 : Cartographie de la tournée du 5 ^e véhicule de la gare Sainte-Catherine pour le départ de 16h43.....	67
Figure A 1 : Histogramme représentant la liste des clients des gares pour les départ quittant la gare (Gare Sainte-Catherine/ Gare Saint-Constant / Gare Delson).....	74
Figure A 2: Histogramme représentant la liste des clients des gares pour les départs allant à la gare(Gare Sainte-Catherine/ Gare Saint-Constant / Gare Delson).....	74
Figure A 3 : Tableau représentatif des variables pour chaque distribution analysée	75
Figure A 4 : Histogramme et Graphique de chaque distributions.....	75
Figure A 5 : Graphique de probabilité de chaque distribution ajustée.....	76
Figure A 6 : Graphique de probabilité de chaque distribution ajustée(2)	76

Figure B 1 : Histogramme présentant les indicateurs de performances dans l'analyse des section de la fonction objective pour la gare Delson pour le départ de 07h31.....	77
Figure B 2 : Histogramme présentant les indicateurs de performances dans l'analyse des sections de la fonction objective pour la gare Saint-Constant pour le départ de 6h45	77
Figure B 3 : Histogramme présentant les indicateurs de performances dans l'analyse des sections de la fonction objective pour la gare Saint-Constant pour le départ de 16H05	78

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

FLML	<i>First and Last Mile Problem</i> , problème du premier et dernier kilomètre (mille)
MIP	<i>Mixed-integer Programing</i> , programmation en nombres entiers
VRP	<i>Vehicule Routing Problem</i> , problème de tournée de véhicules
VRPTW	<i>Vehicule Routing Problem with Time Windows</i> , problème de tournée de véhicules avec fenêtres de temps
PRP	<i>Pollution Routing Problem</i> , Problème de tournée impliquant le cout environnemental
CPLEX	Logiciel d'optimisation
CVRP	<i>Capacitated Vehicule Routing Problem</i>
AIC	Critère d'information Akaike
BIC	Critère d'information Bayesian
AD	Statistique de qualité d'ajustement Anderson-Darling

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Figure et tableaux reliés au chapitre 4 : Analyse des données.....	74
Annexe B : Figure et tableaux reliés au chapitre 5 : Expérimentation et Résultats	77

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Du point de vue des systèmes de transport, la connectivité des systèmes multimodaux et l'accès aux transports publics font partie des variables clés qui contribuent à la mesure de l'accessibilité. L'accès aux transports publics a toujours été une préoccupation ; mais plus récemment, l'intérêt s'est accru pour la rationalisation de la "chaîne" de déplacements, qui comprend le voyage vers et depuis les stations ou les arrêts désignés par les différents modes de transport (Givoni & Rietveld, 2007).

Bien que le partage ne soit pas un concept nouveau, des modèles économiques basés sur le partage ou la consommation collaborative des ressources ont émergé au cours des deux dernières décennies. La confiance générée par les réseaux sociaux en ligne et la prolifération de la technologie mobile basée sur le GPS ont été citées comme des facteurs ayant permis des transactions ancrées dans l'économie du partage (Hickman, 2011). Cette nouvelle forme de partage des ressources est présente dans de nombreux secteurs, notamment l'hébergement (p. ex., Airbnb), la main-d'œuvre (p. ex., TaskRabbit, Handy), l'équipement, la nourriture et le transport (p. ex., Communauto, Lyft).

Le gouvernement du Québec a confirmé des objectifs très ambitieux à horizon 2030 pour la réduction des émissions de GES (-37,5%) et de la consommation d'hydrocarbures (-40%). Pour atteindre leurs objectifs, plusieurs projets sont mis en place comme l'exploration du potentiel de transport collectif flexible comme le *microtransit*. Le *microtransit* consiste en un système interactif fonctionnant avec des véhicules plus petits que le bus et avec un niveau de flexibilité de parcours variables.

Dans la région métropolitaine de Montréal, le *microtransit* pourrait permettre de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 174,2 kt d'équivalent dioxyde de carbone ("CO₂e") sur cinq ans (soit 3,8 % des émissions dues au transport personnel) en ne captant que 5 % des déplacements en voiture personnelle avec un parc mixte de micro-transport (CRE-Montreal, 2017). En examinant le territoire de l'actuelle Ville de Montréal ainsi que de la région métropolitaine de recensement (RMR), tel que définie par Statistiques Canada, on s'aperçoit que 60% de la population réside à l'extérieur de l'île de Montréal. D'après le rapport du *microtransit*, les gares se situant à l'extérieur de la ville de Montréal présentent des signes similaires. En effet, elles sont situées dans des milieux

où la voiture est le mode de transport primordial et avec des stationnements qui sont généralement pleins. Certaines stations, comme celle de Saint-Constant, desservent une population rapprochée de la gare et offrent une plus grande variété de modes de transport pour y accéder.

Ce mémoire étudie le potentiel de *microtransit* pour le réseau de transport métropolitain de Montréal géré par la compagnie Exo. L'objectif principal est d'évaluer les possibilités d'implanter des technologies et des processus liés au *microtransit*, en particulier pour « le premier et dernier kilomètre » depuis et vers les gares de train de banlieue. Le but est de développer un outil d'analyse définissant les caractéristiques influençant le choix de la stratégie dans l'implantation de ce service. Par conséquent, les objectifs spécifiques de ce mémoire sont les suivants :

- L'analyse des enquêtes de déplacement des usagers du réseau Exo pour faire ressortir des indicateurs de performances permettant de caractériser les stations de trains et le comportement modal des usagers.
- La création d'un outil information utilisant un algorithme de jumelage et dédié à la construction de tournées de *microtransit* pour desservir les usagers selon leur heure de départ et leur proximité par rapport à la station de train utilisée.
- L'évaluation de plusieurs scénarios de *microtransit* en se basant sur les indicateurs de performances identifiés.

Ce mémoire est structuré de la manière suivante ; dans le chapitre 2, une revue de littérature présente les études faites sur le *microtransit* et spécifiquement sur la problématique du « premier et dernier kilomètre ». Ensuite, au chapitre 3, la méthodologie de recherche est abordée, avec une description des données brutes et une présentation de l'outil interface développé. Au chapitre 4, nous détaillons notre analyse de ces données ; puis le chapitre 5 présente le résultat du plan d'expérience et des scénarios de *microtransit* appliqué aux gares de la ligne 4 d'Exo située sur la rive sud de Montréal.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

L'objectif de ce projet est d'évaluer les potentialités de l'utilisation des technologies et des processus liés au *microtransit* sur le réseau d'Exo. Nous avons organisé notre revue de littérature pour cerner la problématique du "premier et dernier kilomètre" (*first mile, last mile*, FMLM) en détaillant sa représentation mathématique et son application. En premier, nous débiterons par les recherches associées à la définition du problème de *microtransit* et ensuite par celles du FMLM. En second, nous alignerons notre analyse sur les articles représentant les variantes du problème mathématique et enfin par ceux utilisant la métaheuristique utilisée pour notre projet.

2.1 Microtransit

Le *microtransit* représente un service de transport collectif à la demande axé sur la technologie en intégrant un horaire et trajet flexible (Shaheen, Cohen et Zohdy, 2016a). Plusieurs modes de transport relatifs au *microtransit* existent, comme le service de navette privé pour les compagnies ou le transport adapté pour les personnes handicapées. Dans ce mémoire, nous traitons du problème de *microtransit* public, pour la population générale.

Dans leur ouvrage, Shaheen et al. (2016a) présente les caractéristiques de ce service :

- déviation d'itinéraire (les véhicules peuvent dévier à l'intérieur d'une zone pour répondre aux demandes de transport);
- déviation de point (les véhicules fournissant un service en fonction de la demande desservent un nombre limité d'arrêts sans itinéraire fixe entre ces points);
- correspondances en fonction de la demande (les véhicules opèrent dans une zone géographique en fonction de la demande, avec une ou plusieurs correspondances à itinéraire fixe);
- requête d'arrêts (les passagers peuvent demander des arrêts non programmés sur un itinéraire prédéfini);
- itinéraires de zone (les véhicules circulent dans un corridor dont le tracé est souvent déterminé en fonction des indications des utilisateurs, avec des heures de départ et d'arrivée fixes à un ou plusieurs points d'arrivée).

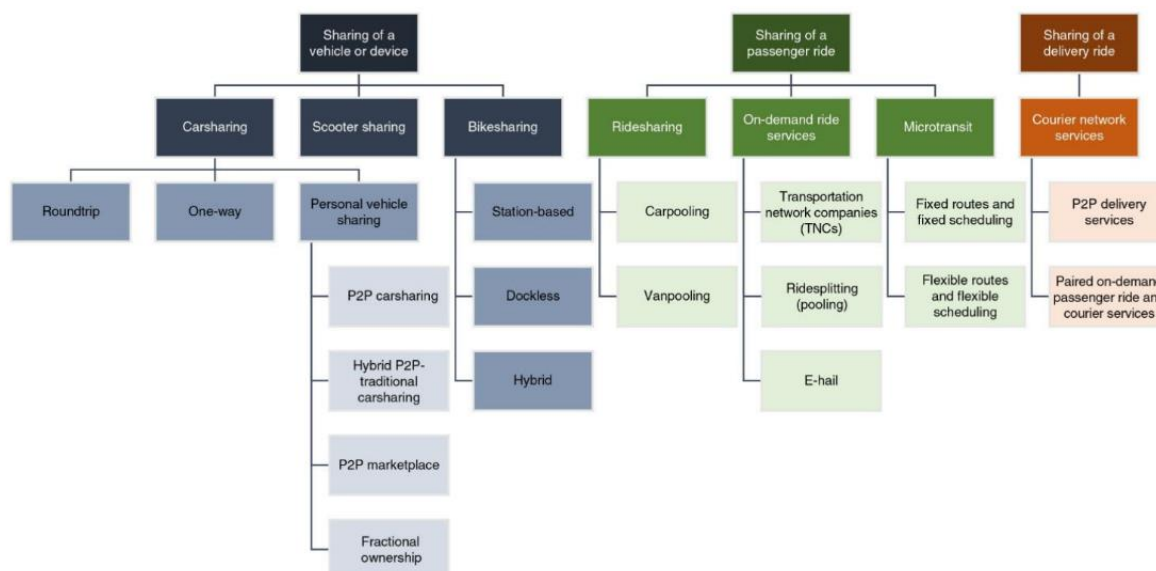


Figure 2.1 : Schéma représentant les technologies de transport partagé (Shaheen, 2020)

Shaheen et al présente aussi un schéma résumant les différentes technologies du transport partage ; dans notre mémoire, nous nous intéressons à la section concernant le « partage de trajet de passager » correspondant la partie verte du schéma et plus précisément la sous-section de microtransit .

Le rapport de *microtransit* de “MaRS” (CRE-Montréal 2017) nous présente une autre définition de la notion du microtransit et effectue une analyse des émissions de gaz à effet de serre sur le déploiement de ce service dans le Grand Toronto et le Grand Montréal. Il définit le *microtransit* comme “des offres de transport partagées entre le secteur public et le secteur privé qui proposent des itinéraires et des horaires fixes ou alloués de façon dynamique en réponse à la demande individuelle ou globale des consommateurs”. Les auteurs classent ses avantages potentiels dans trois catégories :

- les applications mobiles avec la géolocalisation de l'utilisateur et des véhicules et la possibilité de générer énormément d'informations pour mieux comprendre les besoins des utilisateurs;
- la flexibilité des trajets avec la possibilité de modifier le trajet de manière dynamique;

- la flexibilité des véhicules avec la possibilité d'utiliser des véhicules plus petits et son intégration plus facile dans les quartiers résidentiels.

Les auteurs concluent leur analyse en déterminant les facteurs importants permettant l'adoption du microtransit, comme la connectivité avec les autres modes de transports et des incitatifs comme le prix attractif par rapport à la voiture personnelle ou le taxi.

Buenk et al. (2019) s'intéressent à l'évaluation de la durabilité des systèmes de *microtransit*. Ils présentent une analyse exhaustive des publications sur le *microtransit* et utilisent une approche AHP pour évaluer la récurrence de thèmes comme le transport public ou l'impact environnemental. Dans leur analyse de 71 articles, ils arrivent à la conclusion que la majorité des articles se trouvent dans les thèmes comme l'encadrement, la planification ou la politique. Seulement 20% des publications présentent des outils d'aide à la décision.

Shaheen et al. (2016) reviennent sur l'existence de systèmes de *microtransit* déployés dans plusieurs pays. Ces systèmes se caractérisent par des configurations différentes :

- Partenariat public-privé : Dans la ville de Kansas City, la compagnie Bridj opère le projet Ride KC avec les autorités de transport de la ville. Ce projet offre un service de trajets à la demande dans 2 quartiers de la ville (le centre-ville et les environs du centre médical) ; les conclusions sont positives avec 67% de la clientèle intéressée par ce service s'il s'élargit et un tiers des répondants indiquent que la flexibilité de ce service est une motivation à l'utiliser.
- Service mobilité combinée : Dans la ville de Gothembourg en Suède, Ubigo est un modèle combinant les différents services de la mobilité (comme le transport en commun, le covoiturage, le taxi, le vélo) dans un unique système. En effet, avec un prix fixe, le client peut utiliser ces différents services sur une application unique. Ce modèle est considéré par plusieurs compagnies, comme la STM (CRE-Montreal, 2017).
- Entreprise Privée : Le service de microtransit Via (opérant notamment à Arlington, Chicago, New York) permet au client de demander une course dans une zone délimitée à partir de minibus ou navettes de 10 à 14 places.

Les progrès technologiques font évoluer les services de transport partagé. Les applications de « téléphonie intelligente » simplifient les affectations entre les clients et les services. En particulier, les véhicules automatisés (VA) peuvent réduire les coûts opérationnels et les obstacles logistiques au déplacement des passagers et du fret sans intervention ou contrôle humain (Shaheen et al., 2017). Sessa et al. (2015) émettent l'hypothèse que les taxis traditionnels dans les zones urbaines pourraient être le premier mode de transport à être remplacé par des véhicules automatisés partagés. En revanche, les auteurs ne s'attendent pas à ce que les petites villes et les zones rurales connaissent des changements notables dans l'utilisation des transports publics existants (réseaux de transports publics et voies d'accès limités). Greenblatt et Saxena (2015) ont constaté qu'une flotte de véhicules électriques automatisés partagés avec un "bon dimensionnement" des véhicules par trajet, en combinaison avec un réseau électrique à faible émission de carbone en 2030, pourrait réduire les émissions de GES par kilomètre de 63 à 82% par rapport aux véhicules hybrides privés en 2030. Shaheen et al. (2018) concluent l'article en indiquant que le véhicule autonome peut apporter une augmentation de la moyenne d'occupation par véhicule (dû à une augmentation de la flotte de véhicule partagée) ou de la réduction de l'occupation par véhicule (dû à l'augmentation de "zéro occupant véhicule").

2.2 Premier et dernier kilomètre

Le problème du « premier et dernier kilomètre » qu'on appellera FLML (*first mile, last mile*) a été tiré à l'origine des télécommunications. Dans ce domaine, le FMLM est la dernière étape (ou la première étape) pour le consommateur. Dans les années 1970 et 1980, alors que la télévision par câble se déployait à travers les États-Unis, les câblodistributeurs ont dû câbler individuellement chaque foyer, à un coût énorme, mais nécessaire (King, 2016). Le problème du FMLM a connu son importance dans les transports en commun. En effet, ce trajet est un élément essentiel pour rendre les transports en commun attrayants : la qualité de l'environnement d'attente, le niveau des tarifs, la fréquence des services et les équipements à bord des véhicules (Tilahun et al., 2016).

Le rapport du TCRP (2016) énonce que le *microtransit* et le covoiturage à sens unique peuvent améliorer l'accès aux transports en commun, et les agences peuvent mener des actions de sensibilisation ciblées pour informer les résidents sur les solutions du FLML.

La représentation de la problématique du FLML se fait de plusieurs façons. Plusieurs chercheurs utilisent la simulation multiagent pour analyser l'impact des différents scénarios. Les auteurs Zellner et al. (2016) ont construit un modèle basé sur les agents en utilisant Netlogo, qui représente les agents de banlieue choisissant un mode qui minimise la désutilité de leur voyage, les variables composant leur fonction d'utilité étant le coût monétaire, le temps et la sécurité. Dans cette analyse, ils concluent que l'utilisation de navette autonome avec des incitatifs comme l'augmentation du coût de stationnement permettent la réduction de la conduite personnelle dans des zones à faible densité avec très peu d'alternatives de transport.

Tilahun et al. (2016) présentent une analyse du rôle du « dernier kilomètre » dans les décisions des habitants en matière de choix modal, tout en tenant compte des variables liées au trajet, à l'environnement bâti et aux décideurs par le biais d'un modèle de choix discret. En contrôlant séparément l'accessibilité des transports en commun au niveau de l'origine et de la destination, les auteurs montrent que l'amélioration de l'accessibilité de la destination stimule considérablement l'utilisation des transports en commun dans une plus large mesure que l'augmentation de l'accessibilité au niveau de l'origine. Leur solution est justifiée par une fonction de désutilité comprenant les caractéristiques personnels du répondant comme le revenu du ménage, les informations socio-démographique et des caractéristiques externe au répondant comme le niveau de criminalité auquel une personne serait exposée en choisissant le mode m à proximité de l'origine.

Dans son article, Venter (2020) propose une approche pour évaluer la qualité globale de l'environnement du FLML, en tenant compte de tous les aspects pertinents du point de vue du passager. Il en ressort 19 attributs qualitatifs, regroupés dans sept catégories pour représenter le potentiel de mode :

- Sécurité personnelle contre la criminalité pendant l'attente et la marche vers les transports publics : surveillance par caméras ou éclairage des trottoirs et des arrêts de bus.
- Confort des zones d'attentes : zones d'attentes couvertes pour les intempéries ou présence du wifi dans ces zones.
- Facilité à trouver des informations : affichage sur les retards et les arrivées des bus avec des tableaux de bord ou applications.

- Sécurité contre les accidents de la circulation pendant l'attente et la marche : passages piétons près des zones d'attentes.
- Confort et qualité des trottoirs : environnement propre et plaisant sur les voies d'accès.
- Durée et distance du voyage d'accès : distance de marche courte entre l'origine et la destination ou réduction du temps d'attente pour le transport en commun.
- Coût du voyage d'accès : coût associé pour le transport en commun.

Dans leur article, Chen et al. (2018) s'intéressent à définir le coût relatif à un service permettant de répondre au *last mile service* dont un des paramètres importants est le temps d'attente du passager. Les auteurs estiment que le temps d'attente w_j suit une loi normale. Dans cette hypothèse, le passager attend plus longtemps si plus de passagers utilisent le service ou si le nombre de passagers requis est incertain. L'idée clé de cet algorithme est de décomposer le problème d'optimisation du concepteur du LMTS (« *last mile transportation system* ») en un problème d'optimisation à deux couches : un qui résout le nombre de véhicules à chaque station avec un prix total fixe et une capacité de véhicule fixe ; et l'autre optimisant les décisions couplant le prix et la capacité des véhicules.

Liang et al. (2016) appliquent un modèle mathématique sur des véhicules électriques autonomes pour permettre l'accès aux gares pour le « dernier kilomètre ». Ils apportent des points intéressants pour notre analyse. En effet, leur analyse se divise en deux schémas : 1) une flotte libre, dont le choix revient à l'opérateur de servir le client ou 2) une flotte répondant à toute la clientèle du réseau métropolitain. Ils concluent que le premier schéma permet de cibler des zones urbaines et des trajets susceptibles de réduire l'effet négatif du manque de taxis tout en maximisant leur profit.

En analysant les applications du FLML, nous avons pu identifier un modèle mathématique s'approchant de notre problématique posée sur ce projet. Dans cette prochaine section, nous analyserons le modèle de type « Vehicle Routing Problem with Time Windows », communément appelé VRPTW.

2.3 VRPTW

Dantzig & Ramser (1959) ont été les premiers à introduire le "*Truck Dispatching Problem*", en modélisant le comportement d'une flotte de camions homogènes pour répondre à la demande en pétrole d'un certain nombre de stations-service à partir d'un point central et avec une distance minimale parcourue. Cinq ans plus tard, Clarke & Wright (1964) ont généralisé ce problème à un problème d'optimisation linéaire que l'on rencontre couramment dans le domaine de la logistique et du transport, appelé le problème de tournées des véhicules (VRP).

Dans les problèmes de tournées de véhicules, un ensemble d'itinéraires est conçu afin de répondre aux demandes des clients. La littérature dans ce domaine traite de situations présentant diverses caractéristiques opérationnelles, telles que le mode de distribution (enlèvement et/ou livraison), la nature du service (transport de produits/personnes ou prestation de services), les heures de visite limitées des clients, les limites de capacité des véhicules, la durée maximale d'acheminement. L'objectif d'une solution peut être énoncé comme celui de minimiser les coûts totaux fixes et variables, tels que la taille de la flotte et la distance totale des circuits.

Les problèmes d'acheminement des véhicules sont de nature combinatoire et présentent des difficultés inhérentes (le problème classique d'acheminement des véhicules et la plupart de ses variantes sont de type NP-hard, comme le soulignent Lenstra et Rinnooy-Kan (1981)).

Braekers et al. (2016) classent la littérature sur les problèmes de type VRP en fonction de leur caractéristique. Dans cet article, on remarque que les problèmes de type « CVRP » (*Capacited Vehicle Routing Problem*) sont présents dans 90,52% des articles et ceux de type « VRPTW » sont présents dans 37,92% des articles.

Ce mémoire porte sur une variante du problème de trajet des véhicules avec fenêtres de temps (VRPTW) qui permet d'affecter un certain nombre de véhicules à chaque trajet afin de réduire les temps de service. Cette variante est particulièrement pertinente pour les situations où les temps de service sont longs (qui dépendent de la quantité demandée) par rapport au temps de déplacement et elle est dérivée d'applications de la vie réelle dans lesquelles les demandes quotidiennes doivent être livrées le même jour, pour lesquels l'opération totale ne peut pas toujours être effectuée dans le temps de parcours maximum et où les infractions à ce dernier sont hautement indésirables. Les méthodes de résolution se classent en deux grandes catégories: les méthodes exactes se concentrent

habituellement sur la minimisation de la distance totale parcourue et les méthodes heuristiques cherchent en premier à minimiser le nombre de véhicules utilisés, puis la distance totale parcourue.

Dans le livre « *Vehicule Routing Problem, Methods and Application* », Desaulniers et al. (2014) présentent une classification en trois familles de méthode exactes : « *Branch-and-Cut-and-Price* », « *Branch-and-Cut* » et « Réduction du partitionnement des ensembles ». La première famille est une méthodologie de pointe pour résoudre une grande variété de problèmes contraignants de tournées de véhicules et d'ordonnancement d'équipages. Elle correspond à un « *Branch and Bound* » dans lequel les relaxations linéaires sont résolues par génération de colonnes. La seconde famille « *Branch and Cut* » est aussi populaire pour résoudre les problèmes d'optimisations combinatoires. Elle consiste à l'ajout de plan coupants dans une procédure de « *Branch and Bound* ». La troisième famille développée par Baldacci et al. (2014) consiste à une procédure efficiente de réduire la taille du modèle de partitionnement de l'ensemble VRPTW. Le modèle de partitionnement réduit est ensuite résolu à l'aide d'un solver MIP comme CPLEX.

Dans le même ouvrage, les auteurs décrivent les heuristiques comme des méthodes qui donnent souvent des solutions de bonne qualité en un temps de traitement rapide. Au cours de la dernière décennie, les recherches sur les méthodes heuristiques pour le VRPTW se sont concentrées sur les métaheuristiques et peu de recherches ont été menées sur la construction heuristique. Dans ces méthodes, les voisinages représentent un sous-ensemble d'une solution de la problématique. Ces voisinages se classent en deux catégories : intra route et inter route. La première catégorie représente les modifications de l'itinéraire à l'intérieur d'une route et l'autre représente des modifications de la solution dans une ou plusieurs routes.

Pour répondre à notre projet, nous avons choisi d'implémenter une métaheuristique pour résoudre notre problème de type VRPTW. Dans cette prochaine section, nous détaillerons les articles sur cette métaheuristique appelée « recherche taboue ».

2.4 Recherche Taboue

Dans le cadre de notre projet, nous avons choisi d'implanter un modèle inspiré des métaheuristique et spécifiquement la recherche taboue (*tabou search*, « TS »). TS, proposé pour la première fois en 1986 par Fred Glover, a été inventé parce qu'un large éventail de problèmes d'optimisation combinatoire difficiles devant être abordés dans un délai pratique. La recherche taboue selon Glover, est une métaheuristique qui guide une heuristique locale pour explorer l'espace de solution au-delà de l'optimalité locale.

Laporte et al. (2000) ont publié une étude sur les heuristiques pour le PRP (« Pollution-Routing Problem »). Dans cette enquête, ils mentionnent 6 mises en œuvre réussies de la recherche taboue de 1993 à 1998, dont la méthode Taburoute de Gendreau et al. (1994) ou une nouvelle structure de quartier et une méthode d'amélioration locale de Xu et Kelly (1996).

Dans leur ouvrage, Gendreau et al. (2008) définissent la recherche taboue comme :

‘ ‘Tabu Search (TS) est une métaheuristique basée sur la recherche locale où, à chaque itération, la meilleure solution dans le voisinage de la solution actuelle est sélectionnée comme nouvelle solution actuelle, même si elle entraîne une augmentation du coût de la solution. Par ce mécanisme, la méthode peut ainsi échapper à de mauvaises optimalités locales. La mémoire à court terme, connue sous le nom de liste de tabous, stocke les solutions récemment visitées (ou les attributs des solutions récemment visitées) pour éviter les cycles à court terme. La recherche s'arrête après un nombre fixe d'itérations ou après un certain nombre d'itérations consécutives sans amélioration de la solution la plus connue.’ ’

Braysi et al. (2014) présentent une analyse sur les différentes approches de la recherche taboue par rapport au problème du type VRPTW. Ils concluent que les algorithmes suivants présentent les meilleures performances :

- Gehring et Homberger (2001) : combinaison de la recherche taboue avec un algorithme évolutif.
- Cordeau et al. (2001.b) : recherche taboue laissant la possibilité d'explorer les solutions infaisables qui seront pénalisées dans la fonction objective.
- Taillard et al. (1997) : recherche taboue permettant le retard du client en ajoutant une pénalité dans la fonction objective.
- Chiang et Russel (1997) : recherche taboue réactive qui dynamise la taille de la liste taboue pour éviter les cycles ainsi que les chemins trop contraignants.

2.5 Conclusion

Au cours de cette revue de littérature, nous avons abordé les différentes problématiques relatives à notre sujet. Ainsi, nous avons vu l'importance de l'implantation du *microtransit* dans le « premier et dernier kilomètre ». La représentation mathématique de ce problème est celle du VRPTW, consistant à fabriquer des tournées de véhicule avec une fenêtre temporelle et une capacité spécifique du véhicule et de la flotte. Pour résoudre ce problème mathématique, l'usage d'une métaheuristique semble un choix cohérent pour notre projet. La contribution de ce mémoire est d'arriver d'appliquer ses approches en l'appliquant spécifiquement au problème posé par le réseau d'Exo. De plus, nous appuyons notre analyse sur un outil d'aide à la décision permettant au gestionnaire de l'ajouter dans leur stratégie.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Dans ce chapitre, nous présentons la démarche mise en place pour analyser le potentiel d'incorporer le *microtransit*. La figure 3.1 présente les différentes étapes. Comme on peut le voir dans l'organigramme ci-dessous, dans la première phase, les données provenant de la compagnie Exo ont été analysé pour ensuite être modélisé dans une tournée de véhicule par l'intermédiaire d'un algorithme d'optimisation. Cette tournée est évaluée par des indicateurs de performances. La solution finale est testée dans différents scénarios et sur un plan d'expérience. De plus, dans le cadre de ce projet, nous avons développé un outil interactif qui permet de tester différentes configurations de tournées. Cet outil est présenté au chapitre 6.

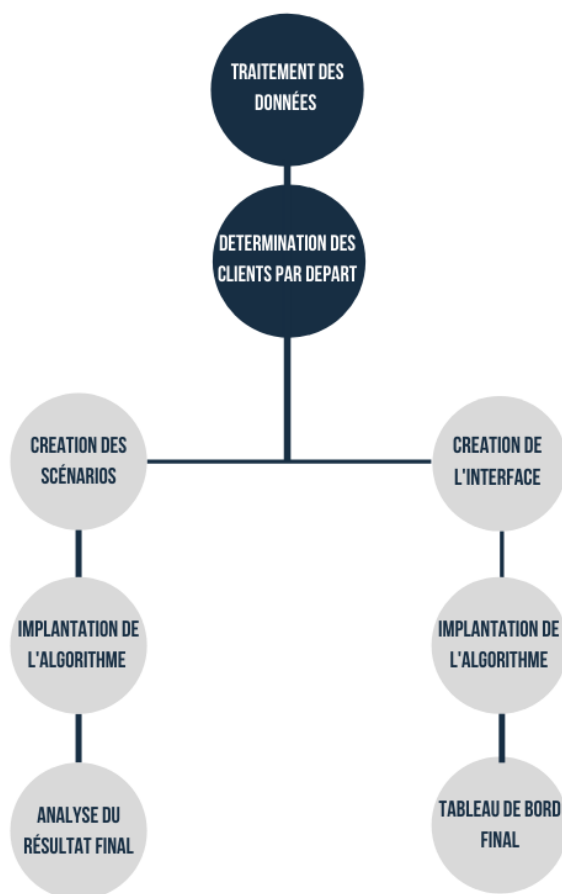


Figure 3.1 : Organigramme de la méthodologie

3.1 Collecte et analyse de données

Dans le cadre de ce projet, l'analyse de la base données fournie par Exo est primordiale. En effet, il a fallu étudier l'ensemble des champs qui la compose et définir leur importance envers la question de recherche. Il est nécessaire de conserver le maximum de données sur la clientèle du réseau Exo pour analyser leurs implications sur la finalité de la problématique.

3.1.1 Cas d'étude

Les données sur les habitudes de déplacements proviennent d'une enquête origine-destination effectuée par les responsables d'Exo en 2018. Elle a été réalisée directement aux stations de train, ce qui accentue la fiabilité et la précision de ces données. Le fichier, reçu dans le format Excel, est séparé en trois feuilles : la première représente les données principales de chaque client (anonymes), les seconde et troisième feuilles sont le dictionnaire de données détaillant les colonnes de la base de données en présentant leurs caractéristiques et leur codification. Cette base de données contient 1620 enregistrements, représentant chacune les caractéristiques du client et de son itinéraire. Elle correspond au client de la ligne Montréal/Delson-Candiac ; cette ligne est composée de 9 stations et notre analyse se porte sur les clients des trois stations suivantes : « Sainte-Catherine, Saint-Constant et Candia » Le tableau 3.1 présente un récapitulatif de ces informations brutes. Plusieurs enregistrements présentent des données de localisation manquantes ne permettant pas de les utiliser dans le cadre de ce projet (147 enregistrements).



Figure 3.2 : Ligne de Train "Exo4"

En analysant chaque colonne, on remarque la répétition dans des formats différents de la même caractéristique du client. Le tableau 3.2 permet de l'observer avec par exemple l'utilisation de 32 colonnes pour présenter les modalités de transport (16 pour origine et 16 pour destination). Ces colonnes présentent une modalité de transport (marche, vélo, auto-conducteur, auto-passager, taxi, transport collectif et autre) et une colonne résumant cette information en donnant un numéro par type de modalité.

Tableau 3.1: Caractéristiques de la base de données

<i>Caractéristique</i>	<i>Total</i>
Lignes	1620
Colonnes	150
Nombre de cellules	243000
Cellules non vides	225663
Nombre de cellules vides	17337

Tableau 3.2 : Répartition des colonnes de la base de données brute

<i>Sujet</i>	<i>Description</i>	<i>Nombre de colonnes consacrées</i>
Description du client	Age , Sexe , niveau d'étude	28
Autre information sur le déplacement	Raison non-utilisation ou mode alternatif si non utilisation	51
Caractéristiques du sondage	Langue du sondage...	7
Origine du déplacement	Adresse, Heure du déplacement	16
Modalité de transport	Marche, Vélo, Auto-conducteur	32
Destination du déplacement	Adresse, Heure du déplacement	16
Total		150

À ce stade, il est nécessaire de concentrer le travail sur les caractéristiques nécessaires pour l'analyse finale.

3.1.2 Préparation de la base de données

Comme vu précédemment, le projet nécessite des données spatio-temporelles, la description du client et son moyen de déplacement pour quitter ou arriver à la gare. Comme on peut le voir dans le tableau ci-dessous, nous avons sélectionné 15 colonnes représentant de manière générale les caractéristiques nécessaires pour le projet. De plus, les informations ont été séparées en deux tables

de données représentant la clientèle utilisant le service de train en matinée et ceux qui l'utilisent en fin de journée. On retrouve des doublons dans ces deux tables dus à 84% de la clientèle qui utilise le train de façon pendulaire.

Tableau 3.3 : Caractéristique des colonnes utilisées pour le projet

<i>Colonne</i>	<i>Type de donnée</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Écart-type</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
Heure de départ	Heure et Minute	2 colonnes			
Heure du retour	Heure et Minute	2 colonnes			
Coordonnées	MTM zone 8, EPSG:2950	N/A	N/A	N/A	N/A
Gare sélectionnée	Réseau Exo	N/A	N/A	N/A	N/A
Age	Année	38	12	8	75
Sexe	N/A	H : 38 % F : 62 %			
Utilisation de la voiture personnelle	N/A	Oui : 85% Non : 15%			
Choix du mode vers train ¹	Numéro d'identification	Figure 3.2			
Choix du mode vers domicile ¹	Numéro d'identification	Figure 3.2			
Motif de déplacement ²	Numéro d'identification	Figure 3.1			
Début d'utilisation du service	Mois	52.4	54.2	0	324
Pondération	Facteur de multiplication	1.26	0.07	1	1.46

3.2 Formulation du problème mathématique de transport à la demande

À la suite de l'analyse des données, nous tenterons d'incorporer ces clients entre eux pour former une tournée de véhicule prenant en compte leurs caractéristiques spatio-temporelles. Pour ce faire,

¹ Automobile, Covoiturage, Bus, Marche et autres

² Domicile, Travail, Loisirs et autres

nous présenterons la formulation mathématique du problème et ensuite son inclusion dans un algorithme tiré d'une métaheuristique pour répondre à la problématique.

3.2.1 Définition du problème

Soit $G = (N, A)$ un graphe direct avec $N_0 = \{1, \dots, n\}$ présentant l'ensemble des clients situés à n différentes localisations et $N = N_0 \cup \{1, \dots, g\}$ l'ensemble prenant en compte la localisation des stations de train. L'ensemble A des arcs entre les clients comprend également les arcs qui vont de la gare aux clients et du client vers la gare.

Le projet s'associe à un problème de type VRPTW, une extension du « *Capacited VRP* » avec l'ajout d'une contrainte pour que chaque client i soit servi dans une fenêtre temporelle spécifique $[a_i, b_i]$. Dans notre situation, a_i représente distinctement pour les clients l'utilisation pour aller à la gare au début du service prédéfini par notre système et pour les clients se rendant à leur domicile, l'heure d'arrivée du train à leur arrêt prédéfini. La variable b_i représente l'heure du départ du train à la gare pour les utilisateurs se rendant à la gare et pour les clients se rendant à leur domicile, ceci est défini par notre système. Les deux valeurs définies par notre système ou par les gestionnaires sont nécessaires, car ils permettent de cadrer le temps de trajet du véhicule partagé ; pour notre projet, ce temps est représenté par le temps moyen d'attente entre deux départs dans une gare. Une notion importante dans cette modélisation est l'importance de quantifier l'impact de ce nouveau trajet partagé sur le client i . En effet, en utilisant la donnée représentant l'heure de départ du client i pour la destination de leur gare, nous pouvons mesurer le temps gagné par le client i pour partir de chez lui. Par exemple, l'utilisateur venant à la gare avec sa voiture aura alors un trajet à une vitesse prédéfinie et l'ajout d'une durée de stationnement. Ainsi, ce départ est souvent synonyme d'un temps d'attente élevé à la gare pour avoir une place de stationnement et aussi anticiper la congestion. De ce fait, nous comparons le gain ou la perte par rapport à notre valeur temporelle du ramassage du client i dans notre service de véhicule de partage. Cette valeur positive ou négative sera multipliée par des frais relatifs ; l'idée globale de cet ajout est de respecter la fenêtre temporelle initiale du client. Pour permettre à notre système de servir le plus de clients possible, nous avons ajouté un gain relié à l'ajout d'un client i au service de *microtransit*.

La fonction objective est de minimiser le coût total des trajets, tout en respectant les contraintes opérationnelles suivantes :

- 1- Un client i peut être servi une seule fois, quel que soit le véhicule k .
- 2- Un client h présent dans un véhicule k ne peut avoir qu'un seul arc d'origine et qu'un seul arc de départ.
- 3- Le véhicule k ne peut pas dépasser sa capacité maximale.

Tableau 3.4 : Tableau explicatif des variables de la fonction objectif

Paramètres	Définition
$D_{i,j}$	distance entre le client i et le client j
q_k	nombre de places utilisées par véhicule k
θ	coût de la place non utilisée
T_i	heure prévue du départ du client i dans son trajet initial
λ_i	heure prévue de ramassage du client i dans le véhicule
γ	coût relatif au sentiment de changement d'heure de départ/ramassage
C	Le cout relie à l'achat et l'utilisation d'un véhicule
T	Le nombre de place maximale par véhicule
G	Le gain relié à la présence du client dans le service
N_0	La liste des clients sans compter les stations de train
N	La liste des clients en comptant les stations de train
V	La liste des véhicule égale à la taille de la flotte

$$\begin{aligned}
& \underset{i \in N_0, j \in N, k \in V}{\text{minimize}} && \sum \sum \sum x_{i,j,k} * D_{i,j} + v_k * C + (T - q_k) * \theta \\
& && + (T_i \pm \Lambda_i) * \gamma * y_{i,k} - z_i * G \\
s. c &&& \sum_{i \in N} x_{i,j,k} = 1 && \forall k \in V(1) \\
&&& \sum_{i \in N} x_{i,h,k} - \sum_{j \in N} x_{h,j,k} = 0 && \forall h \in N_0, \forall k \in V(2) \\
&&& \sum_{i \in N} x_{i,j,k} \leq CapVehicule && \forall k \in V(3) \\
&&& a_k \leq t_{i,k} \leq b_k && \forall k \in V, \forall i \in N(4) \\
&&& x_{i,j,k}, v_k, y_{i,k} \in \{0,1\}
\end{aligned}$$

Figure 3.3 : Représentation de la problématique d'optimisation

Tableau 3.5 : Tableau explicatif des variables de la fonction objectif

Variables	Définition
$x_{i,j,k}$	Variable booléenne représentant le trajet du client i vers le client j dans le véhicule k
$y_{i,k}$	Variable booléenne indiquant que le client i utilise un véhicule k
v_k	Variable booléenne indiquant si le véhicule k est utilisé dans notre système
z_i	Variable indiquant si le client i utilise le service de véhicule partagé

3.3 Algorithme général pour le VRPTW

Pour résoudre ce problème, l'algorithme mis en place est celui de la « recherche taboue » inspiré du TABUROUTE de Gendreau et al. (1994), très efficace dans les situations de type CVRP. De plus, en nous appuyant sur ces différents algorithmes trouvés dans la littérature (Braysy and Gendreau, 2005b, a), nous avons créé un pseudocode représentant notre problématique tout en ajoutant des améliorations. Le schéma de fonctionnement de notre algorithme est détaillé à la figure 3.4. La première partie consiste à l'initialisation des paramètres qui sont expliqués en détail dans le chapitre suivant. Ensuite, la partie principale contient la première partie de la boucle avec la recherche du meilleur voisinage et son indexation dans la solution courante. Les deux dernières

conditions visibles à la fin de la boucle consistent d'une part la diversification et de l'autre part à l'intensification de notre métaheuristique. Le logiciel utilisé tout au long de l'étude est Python, un langage de programmation destiné aux statistiques et à la science des données

3.3.1 Initialisation

Tout commence par l'initialisation des différents paramètres. Dans notre cas, les paramètres influant notre algorithme sont des constantes, comme le coût du véhicule partagé fourni par Exo. Cela nous permet de calculer le coût d'une place vacante dans un véhicule utilisé dans notre tournée et le coût relatif au sentiment du changement d'heure de départ (ramassage). Cette quantification du sentiment est primordiale pour faciliter l'accommodement de clients ayant déjà des moyens de déplacement préétablis. Cette pénalité dépend de la différence entre l'heure de ramassage du véhicule partagé et celle de l'heure de départ de son domicile disponible dans l'enquête origine-destination. Elle permet d'ajouter une contrainte au caractéristique spatio-temporelles de l'utilisateur, ainsi, l'algorithme cherchera à placer les clients ayant un itinéraire flexible par rapport à leur heure de départ (à l'origine).

Les derniers paramètres à initialiser pour notre algorithme sont la longueur de la liste taboue (ayant une longueur variable en fonction de la taille de la population) ainsi que la taille de la flotte et la capacité des véhicules.

Algorithme 1 Tabu Search

```

1:  $t \leftarrow 0$ 
2:  $SansAmélioration \leftarrow 0$ 
3:  $ListeTabou \leftarrow []$ 
4:  $SolutionCourante \leftarrow GreedyAlgorithm$ 
5:  $MeilleurSolution = SolutionCourante$ 
6:  $DernierMeilleurCandidat \leftarrow null$ 
7: while  $t < t_{max}$  do
8:    $MeilleurCandidat \leftarrow null$ 
9:   for  $Candidat \in SolutionCourante.TrouvezVoisinage$  do
10:    if  $\neg ListeTabou.contient(Candidat)$  then
11:      if  $fitness(Candidat) > fitness(MeilleurCandidat)$  then
12:         $MeilleurCandidat \leftarrow Candidat$ 
13:      end if

```

```

14:     end if
15: end for
16: SolutionCourante ← changerSolution(MeilleurCandidat)
18: if SansAmelioration == 0 then
18:     DernierMeilleurCandidat ← MeilleurCandidat
19: end if
21: if fitness(SolutionCourante) > fitness(MeilleurSolution) then
22:     MeilleurSolution ← SolutionCourante
23: else
24:     SansAmélioration += 1
25: end if
27: ListeTabou.push(MeilleurSolution)
29: if SansAmélioration == MaxIterationSansAmelioration then
30:     SolutionCourante ← MeilleurSolution
31:     ListeTabou.push(DernierMeilleurCandidat)
32: else
33:     if  $\frac{\textit{SolutionCourante} - \textit{Solution}_{t-1}}{\textit{Solution}_{t-1}} > 0.25$  then
34:         SolutionCourante ← Solutiont-1
35:     end if
36: end if
37: if fitness(SolutionCourante) == fitness(MeilleurSolution) and
38:     SansAmelioration != 0 then
39:     SansAmelioration ← 0
40: end if
41: end while

```

Figure 3.4 : Pseudo-code de l'algorithme tabou

3.3.2 Génération de la population initiale

Dans notre cas, la solution initiale est déterminée en utilisant l'algorithme de type Greedy, insérant dans une tournée, le client j non acheminé le plus proche en distance réseau du client i (le **dernier** client acheminé), où les critères d'arrêt sont 1) l'ajout du client j non acheminé implique que le véhicule arrive à la gare après l'heure de départ du train ou 2) si le véhicule a atteint son niveau maximum de clients.

$$j \in \arg \min_{j \in N_0^*} t_{i,j} \quad (1)$$

Ce processus est répété plusieurs fois jusqu'à que tous les clients soient insérés dans un itinéraire approprié ou si la flotte de véhicule est arrivée à son maximum. L'algorithme ci-dessous présente une explication détaillée de la manière dont cette solution initiale est générée.

Algorithm 2 Greedy Algorithm

```

1: while ToutClientServisVrai do
2:   Solution  $\leftarrow$  AjouterCandidatAléatoire
3:   for candidat  $\in$  ListClientNonAssignée do
4:     if VéhiculePasRemplis then
5:       candidat  $\leftarrow$  CandidateProche (Solution)
6:       if HeureArrivéeAvecCandidat < DepartTrain − 5min then
7:         Solution  $\leftarrow$  AjouterSolution(candidat)
8:       end if
9:     end if
10:  end for
11:  if TailleFlotteRemplis then
12:    EndAlgorithm
13:  end if
14: end while

```

Figure 3.5 : Pseudo-code de la solution initiale

3.3.3 Évaluation du voisinage

Cette étape consiste à évaluer la qualité des différents voisinages générés par les mouvements d'opérateurs heuristiques modifiant légèrement la solution actuelle. Dans notre mémoire, les voisinages sont basés sur l'échange de paires de clients. Les trois figures ci-dessous présentent nos différents voisinages.

Le premier voisinage est inspiré de l'algorithme de recherche locale appelé « 2-opt ». Il consiste à une double permutation pour réduire le coût du cycle hamiltonien dans le graphe. Comme on peut voir dans l'exemple de la figure 3.6, les deux clients sélectionnés en rouge ont interchangé leur itinéraire pour prendre le positionnement et le véhicule de l'autre.

Voisinage : Echange entre 2 clients d'itinéraires différents

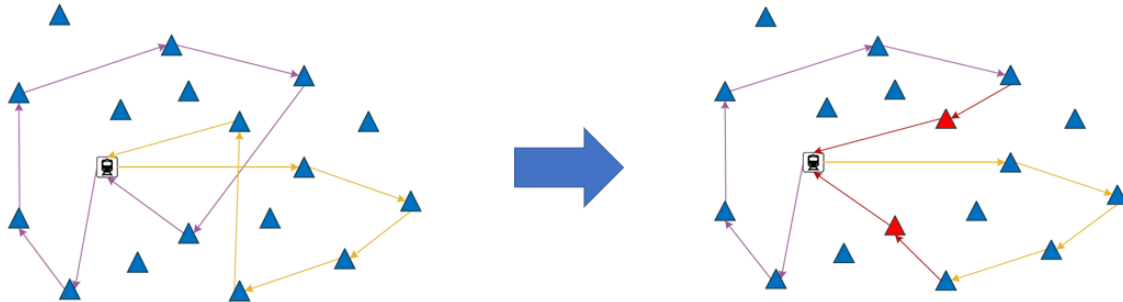


Figure 3.6 : Représentation de l'échange entre 2 clients d'itinéraires différents

Le second voisinage consiste à ajouter un client dans un véhicule ayant des places disponibles. Par exemple comme dans l'exemple ci-dessous, l'ajout du client augmente légèrement la distance totale de l'itinéraire de ce véhicule. Toutefois, l'apport dans la fonction objective de l'ajout de ce client permet une légère amélioration dans le coût total de la solution.

Voisinage : Ajout d'un client dans un véhicule non rempli

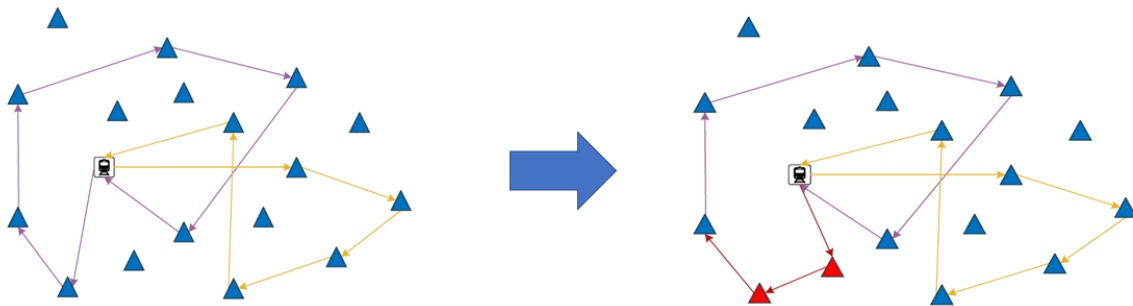


Figure 3.7 : Représentation de l'ajout d'un client dans un véhicule non rempli

Ce troisième voisinage permet de faire la permutation de deux clients issus d'un même itinéraire. Comme on peut le voir dans l'exemple, le changement de l'itinéraire impacte drastiquement la solution optimale sans avoir besoin d'effectuer de changement important dans les autres véhicules.

Voisinage : Changement de l'itinéraire d'un véhicule spécifique

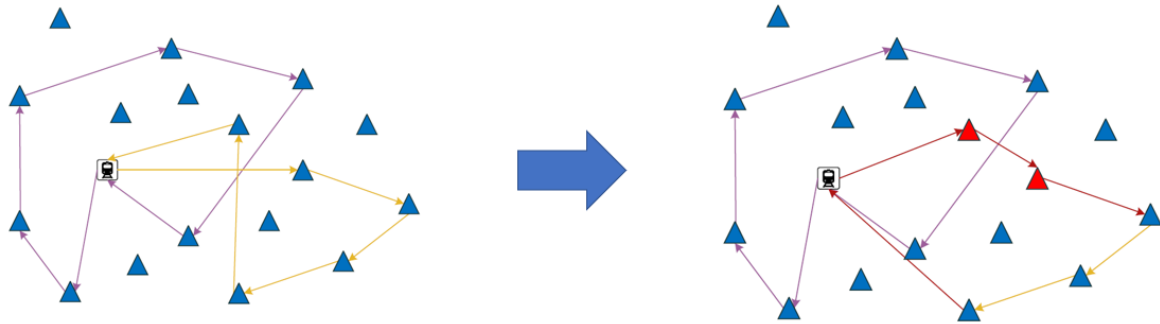


Figure 3.8 : Représentation du changement de l'itinéraire d'un véhicule spécifique

3.3.4 Intensification et diversification

La mémoire à court terme de la recherche taboue est utilisée pour limiter certains changements susceptibles de retourner à des solutions récemment visitées. Cependant, dans la zone de recherche, il est nécessaire d'intensifier ou diversifier la recherche dans certaines régions de l'espace de recherche.

Pour l'intensification, ces régions peuvent contenir des solutions acceptables. Il est donc nécessaire d'accorder une priorité élevée à certaines solutions qui sont les plus susceptibles de nous guider vers de meilleurs résultats (Hertz, Taillard et al. 1995) L'intensification nous permet de réactualiser le nombre d'itérations sans amélioration si la solution courante est égale à la meilleure solution. De ce fait, nous permettons une recherche plus intensive dans la région voisine à la dernière meilleure solution trouvée.

```

38:      if fitness(SolutionCourante) == fitness(MeilleureSolution) and
39:      SansAmelioration != 0 then
40:          SansAmelioration ← 0
41:      end if

```

Figure 3.9 : Pseudocode de l'intensification

Afin d'assurer une diversification à chaque itération, certaines régions du voisinage qui contiennent des solutions avec un nombre de visites plus élevé peuvent être pénalisées.

"La diversification pourrait être simplement appliquée en effectuant plusieurs redémarrages aléatoires. Une autre façon d'explorer les régions non visitées est de pénaliser les solutions souvent visitées ou les déplacements fréquemment effectués. Cette méthode permet d'échapper à la région actuelle ; cependant, les solutions dans de nouvelles régions ne sont pas nécessairement réalisables" (Hertz, Taillard et al. 1995).

En nous inspirant de cette méthode, nous avons opté pour l'interdiction du premier voisinage visité après avoir trouvé la dernière meilleure solution. Par exemple, si on arrive à un certain nombre d'itérations sans amélioration « t », notre système revient vers l'état de la dernière solution améliorée (« $i-t$ ») en interdisant le voisinage visité à « $i - t + 1$ » et en gardant la liste taboue à l'instant t . Ainsi, la solution à « $i-t+1$ » ne sera pas dans le voisinage des itérations sans amélioration.

```

29:   if SansAmélioration == MaxIterationSansAmelioration then
30:       SolutionCourante ← MeilleurSolution
31:       ListeTabou.push(DernierMeilleurCandidat)
32:   else
33:       if  $\frac{\text{SolutionCourante} - \text{Solution}_{t-1}}{\text{Solution}_{t-1}} > 0.25$  then
34:           SolutionCourante ←  $\text{Solution}_{t-1}$ 
35:       end if
36:   end if

```

Figure 3.10 : Pseudocode de la diversification

À cette étape, le processus de recherche itérative doit arriver à son terme. Dans la recherche taboue, il existe différents moyens d'arrêter l'algorithme :

- après un certain nombre d'itérations;
- après un certain nombre d'itérations sans amélioration de la fonction objective;
- si la fonction objective atteint une valeur prédéterminée.

Dans notre situation, nous utiliserons le premier moyen pour arrêter le processus.

3.4 Indicateur de performances

À la suite de la génération de solutions optimales trouvées par l'algorithme avec différents paramètres de départ, nous devons évaluer celles-ci entre elles et aussi par rapport à la solution

initiale du client utilisant leur mode d'origine. Pour ce faire, nous avons séparé les indicateurs de performance en deux sections.

La première utilise des indicateurs quantitatifs pour analyser la solution. Dans celle-ci, nous trouvons :

- Temps moyen de trajet par client servi :

$$\frac{\sum a_j - a_i}{Q_k} \quad \forall k \quad (2)$$

Où :

a_i et a_j : Heure d'arrivée chez le client i et chez le client j telle que ce soient des clients adjacents

Q_k : Nombre de clients servis par le véhicule k

- Nombre de clients quittant plus tôt leur domicile (ou arrivant plus tard à leur domicile):

$$\sum \sum y_{i,k} \quad (3)$$

Où :

$y_{i,k}$: le client i quitte plus tôt par rapport à son heure de départ d'origine dans le véhicule k

- Taux de clients servis :

$$\frac{\sum \sum \sum x_{i,j,k}}{\text{NombreDeClient}} \quad (4)$$

Où :

$x_{i,j,k}$: Variable booléenne indiquant que le trajet du client i vers le client j dans le véhicule k existe.

- Véhicules-kilomètres parcourus :

$$\sum \text{VehiculeKmAfter}_k \quad (5)$$

Où :

$VehiculeKmAfter_k$: la distance parcourue par chaque véhicule k

La seconde section consiste en des indicateurs comparatifs vis-à-vis la solution initiale. Dans celle-ci, nous avons :

- Véhicules-kilomètres économisés :

$$\sum VehiculeKmAfter_k - \sum VehiculeKmBefore_i \quad (6)$$

Où :

$VehiculeKmAfter_k$: la distance parcourue par chaque véhicule k

$VehiculeKmBefore_i$: la distance parcourue par chaque client i dans son mode d'origine.

- Ratio de compétitivité :

$$\frac{\sum VehiculeTimeAfter_i}{\sum VehiculeTimeBefore_i} \quad (7)$$

Où :

$VehiculeTimeAfter_i$: le temps passé dans le véhicule du *microtransit* par le client i

$VehiculeTimeBefore_i$: le temps passé dans son mode d'origine par le client i

CHAPITRE 4 ANALYSE DES DONNÉES

Ce chapitre présente les analyses faites sur les données provenant de la compagnie Exo. Il débute par une analyse descriptive de la base de données étudiée. Ensuite, il se poursuit sur une étude spatio-temporelle de la clientèle pour la ligne de train étudiée. Pour finir, nous analysons la possibilité d'estimer le temps d'avance pris par un client spécifique pour se rendre à sa gare respective.

4.1 Analyse descriptive

La part modale de l'automobile pour le rabattage dans les gares sélectionnées est en moyenne de 65%. Ainsi, un taux de conversion de ces consommateurs vers le *microtransit* peut avoir une grande répercussion sur les économies. Dans la figure 3.2, nous voyons cette distribution, avec la marche qui suit en seconde place et le transport en commun. Toutefois, il est difficile de prédire cette conversion entre le véhicule privé ou le transport collectif. Avec un pourcentage élevé de possession d'un permis de conduire, la clientèle Exo des trois stations étudiée utilise le service de train en moyenne depuis 13 mois, ce qui dénote une client assez jeune dans la fidélité de ces consommateurs.

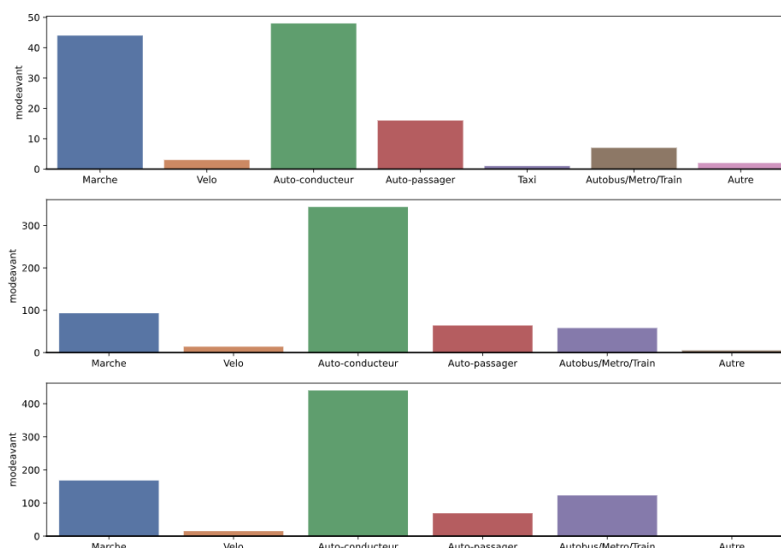


Figure 4.1 : Histogramme représentant la liste des modes à l'origine(Gare Sainte-Catherine/ Gare Saint-Constant / Gare Delson)

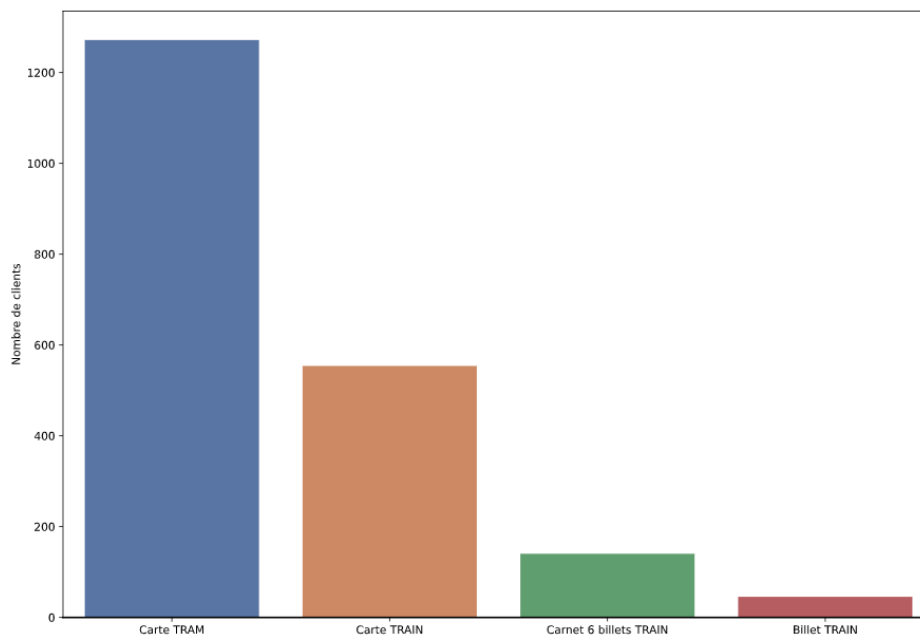


Figure 4.2 : Histogramme du nombre de clients par titre de transport

L'historgramme ci-dessus présente la répartition des clients selon leur titre de transport. Par exemple, la majorité des clients ont une carte mensuelle du TRAIN ou TRAM (combinaison du service TRAIN et du service métro de la STM). Les deux histogrammes ci-dessous déterminent que le motif de déplacement est essentiellement du domicile à l'origine et du travail pour la destination.

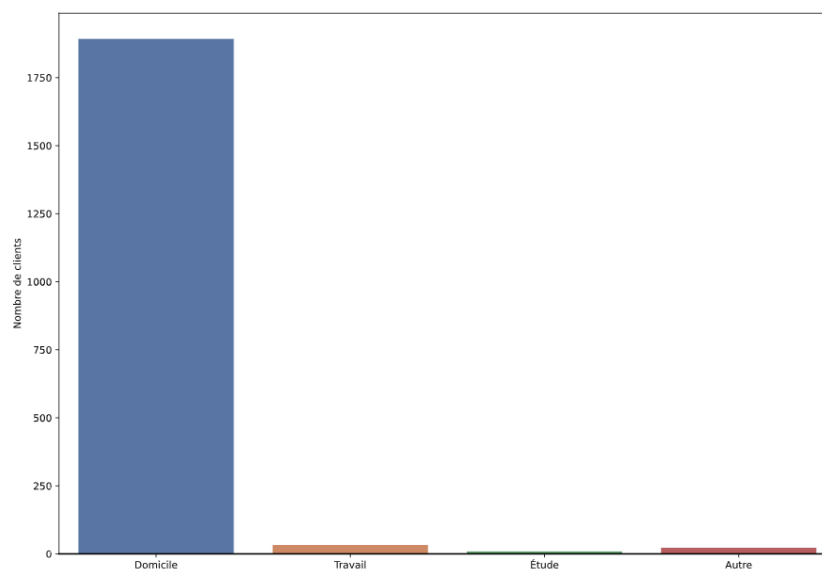


Figure 4.3 : Histogramme présentant le nombre de clients par motif de déplacement à l'origine

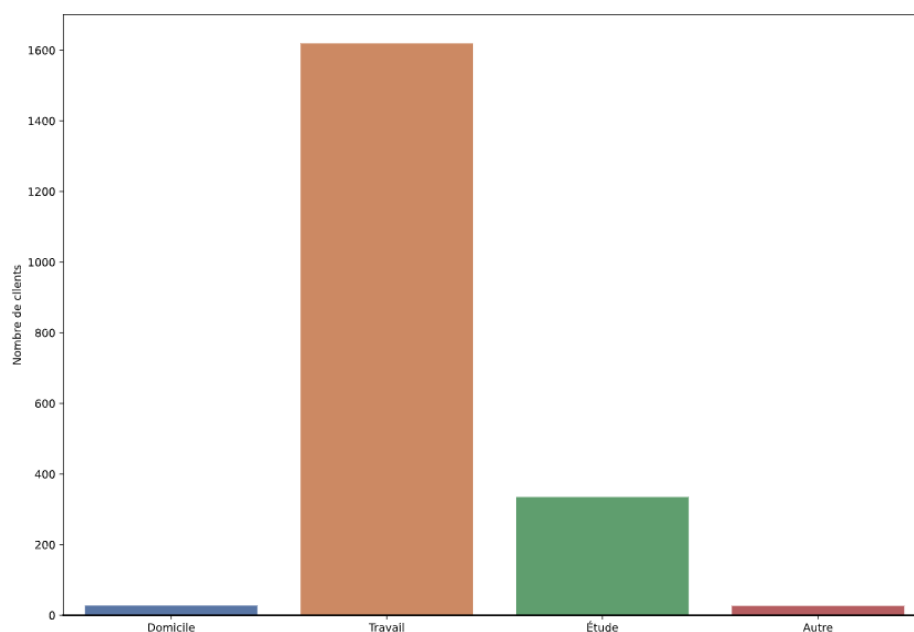


Figure 4.4 : Histogramme présentant le nombre de clients par motif de déplacement à la destination

En plus des comportements de l'utilisateur, l'incorporation d'un service de *microtransit* nécessite une analyse de l'espace géographique du jeu de données.

4.2 Données spatio-temporelles

Le projet se porte sur trois gares situées dans la région administrative de la Montérégie. Le tableau suivant présente la typologie des gares étudiées (CRE-Montreal,2017).

Tableau 4.1 : Tableau présentant la typologie des gares

Gare	Catégorie
Sainte-Catherine	Gare située dans des milieux similaires aux gares périurbaines ³ locales, sinon moins denses encore. Contrairement à la catégorie précédente, ces gares périurbaines à grand rayonnement offrent en moyenne un grand nombre de places de stationnement et desservent un bassin géographique très large. La majorité des passagers accèdent à ce type de gares en automobile.
Saint-Constant et Delson	Situées en milieu suburbain ⁴ de faible densité, ces gares desservent une population au revenu élevé, composée de ménages de grande taille ayant un accès élevé à l'automobile. Ces gares offrent une faible connexion avec d'autres réseaux de transport collectif, mais également peu de places de stationnement. Les stationnements y sont donc généralement pleins. Elles desservent une clientèle rapprochée de la gare et les passagers y accèdent en utilisant une variété de modes de transport.

Dans la carte présente ci-dessous, on remarque que 60% des usagers se situent dans un rayon de 2,5 km de la gare utilisée de départ. À ce stade, il est intéressant de remarquer la répartition de cet échantillonnage dans l'espace. En effet, plusieurs clients s'entremêlent entre deux gares, dû à la proximité entre chacune d'elle. En respectant leur contrainte temporelle, un scénario sera alors d'analyser le changement arbitraire de la gare d'origine du client. La figure 3.5 nous confirme cette possibilité ; 13,7% de la clientèle est plus proche d'une autre gare que celle spécifiée dans leur mode d'origine. Nous pouvons ajouter que 30 % de la clientèle voit une augmentation de 25 % de leur trajet, s'il utilise la seconde gare à proximité de leur domicile. Nous portons alors une attention importante aussi sur un scénario consistant à réassigner les clients non utilisés dans la tournée de véhicule de sa gare assignée.

³ Les quartiers périurbains, peu denses, où les ménages sont plus grands et ont un meilleur revenu, caractérisés par un plus fort accès aux gares en automobile (conducteur);

⁴ Qui est près d'une grande ville, qui l'entoure.

De plus, ces gares se situant à la fin de la ligne Exo 4 obligent les utilisateurs habitant à Châteauguay d'utiliser leur service d'où la présence d'une concentration non négligeable d'une clientèle se situant à la gauche de la carte.

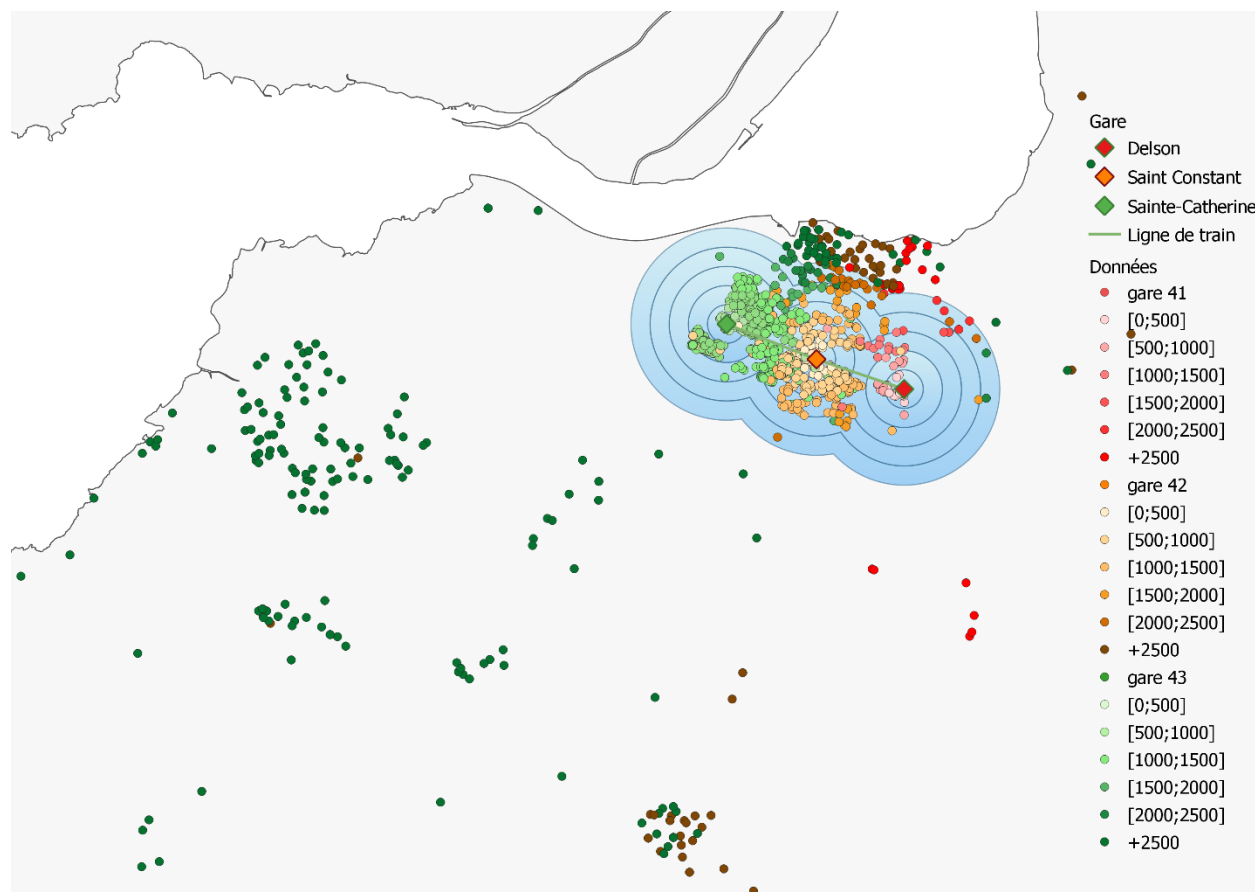


Figure 4.5 : Répartition spatiale des clients

Comme on peut le voir dans l'histogramme ci-dessous, la majorité des usagers de la gare quitte leur domicile entre 6h et 7h du matin, pour revenir vers 16h. Cette courbe sinusoïdale nous permet de choisir un échantillonnage plus spécifique pour nos scénarios, en prenant les pics de la courbe. Toutefois, cette courbe aussi montre l'utilisation très restreinte dans le temps de la flotte mise en place pour la desserte de ces usagers. En effet, cette flotte sera alors utilisée de manière minimale ou complètement à l'arrêt ; cette situation nous oblige à utiliser une flotte réduite pour pouvoir ne pas subir cette perte monétaire en ayant des véhicules à l'arrêt durant la journée.

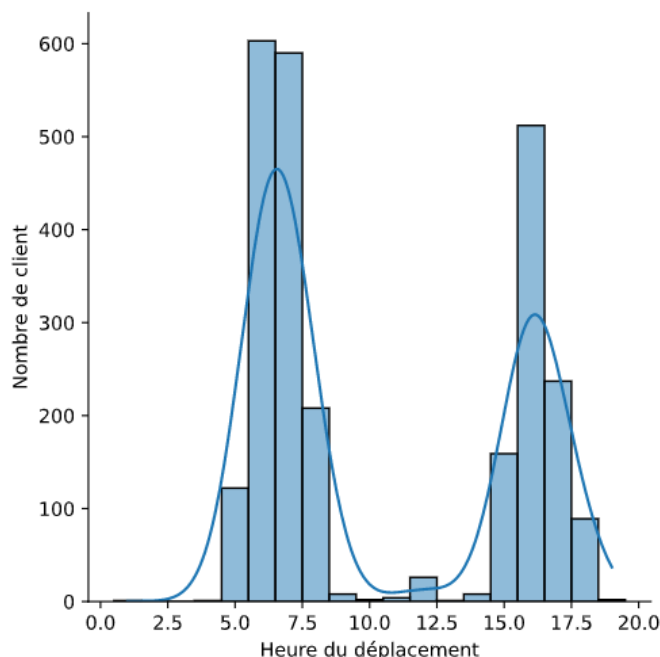


Figure 4.6 : Figure représentant le nombre de clients par l'heure de déplacement

Les deux figures ci-dessous nous présentent le nombre de clients situés dans un intervalle de distance entre leur domicile et la gare en fonction de leur mode de déplacement pour se rendre à la gare en matinée et pour y quitter l'après-midi. On remarque précisément que, dans ces trois modes de déplacement, la majorité des clients se situent à une distance euclidienne de 5km de leur gare présélectionnée, avec une plus grande variabilité quand le client utilise un véhicule motorisé. L'information intéressante de ces histogrammes se situe sur la comparaison entre le trajet aller et celui du retour. En effet, nous remarquons que le nombre de clients utilisant le service en après-midi connaît une réduction de 33%, en comparaison du nombre de clients utilisant le service en matinée. On peut l'expliquer par une hausse du covoiturage pour le trajet du retour vers le domicile entre employés d'une même compagnie. Cette réduction est visible à la hauteur de 55% dans les utilisateurs de véhicule en tant que passager et conducteur. Toutefois, la marche ne connaît pas un impact significatif entre les utilisateurs en matinée et ceux en après-midi.

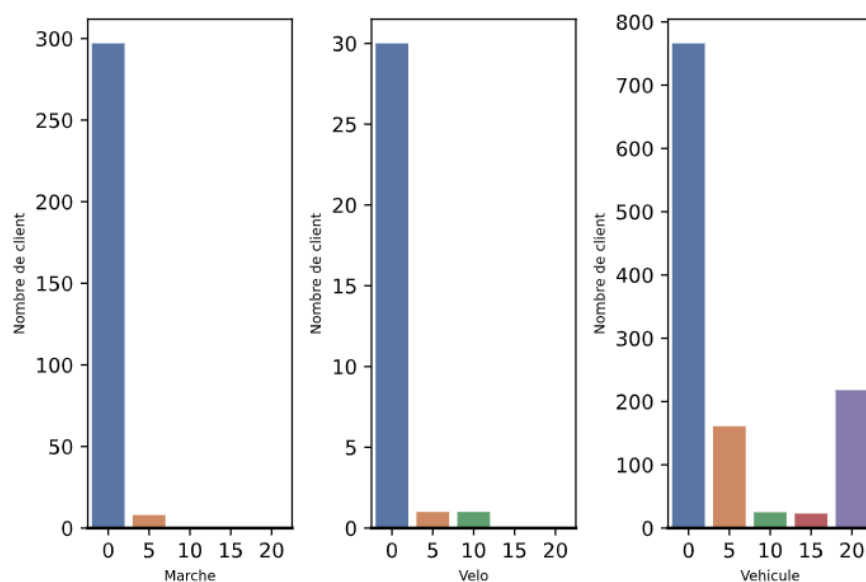


Figure 4.7 : Histogramme représentant le nombre de clients en fonction de leur distance de la gare et par le mode de déplacement (vers la gare)

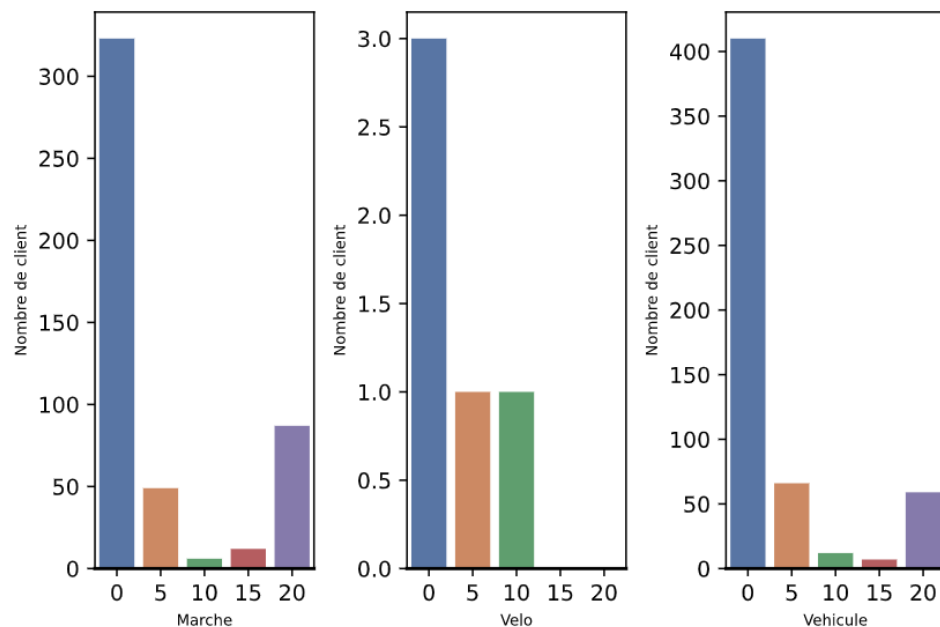


Figure 4.8 : Histogramme représentant le nombre de clients en fonction de leur distance de la gare et par le mode de déplacement (de la gare)

4.3 Analyse probabiliste du temps d'avance

Dans un premier temps, nous revenons sur un paramètre primordial de la fonction objectif qui est le temps d'avance que le client prend pour attendre le départ de son train. Ce paramètre est nécessaire pour comprendre le comportement des clients dans l'utilisation d'un service de véhicule de partage. En effet, 53% des clients ont tendance à arriver à la gare avec une avance de 10 minutes ou plus. Ce temps s'explique par le confort et l'assurance de ne pas rater le départ du train, la possibilité de se garer, tout en prenant en compte le risque de congestion lors de leur déplacement pour ceux utilisant la voiture comme mode de déplacement. Le tableau 4.2 représente les caractéristiques de chaque client qui nous intéressent pour estimer ce paramètre.

Tableau 4.2 : Tableau représentatif du temps d'avance de la liste des clients se rendant à la gare

	Id	Âge	Mode	Temps d'avance	Distance (m)	Famille
0	5050	45	Car	7	3056.667	1
1	5048	18	Marche	1	2438.36	2
2	5074	45	Transport en commun	26	3290.83	3
...	...	...	...	...	...	...
1242	7312	43	Car	8	2651.72	1119

En premier, nous avons regardé la corrélation entre ces différentes caractéristiques et le temps d'avance; pour ce faire, le coefficient Pearson de corrélation est utilisé pour mesurer la corrélation linéaire entre deux échantillons de données et le test d'indépendance des échantillonnages. Comme on peut le voir dans le tableau 4.3 ci-dessous, il n'existe pas de manière significative une corrélation entre le temps d'avance et le mode d'origine avec un coefficient de Pearson nul. Pour l'analyse de corrélation entre l'âge et le temps d'avance, les clients utilisant le vélo comme mode de déplacement présentent un coefficient de Pearson de $-0,39$ présentant une relation négative entre les deux paramètres (le temps d'avance augmente quand l'âge du client diminue). Toutefois, le test d'indépendance présente une p-value supérieur au niveau significatif de 0,05 ; nous ne pouvons pas conclure qu'il existe une corrélation entre ces deux paramètres.

Tableau 4.3 : Tableau représentatif de l'analyse de corrélation entre les variables

Analyse de la corrélation	Pearson r	P-value
Temps d'avance et le mode d'origine	-0.000190	0.99496
Temps d'avance et l'âge pour les clients utilisant la marche comme mode de déplacement	0.151942	0.07311
Temps d'avance et l'âge pour les clients utilisant le vélo comme mode de déplacement	-0.392916	0.09609
Temps d'avance et l'âge pour les clients utilisant la voiture comme mode de déplacement	0.0324482	0.36669
Temps d'avance et l'âge pour les clients utilisant le transport en commun comme mode de déplacement	-0.055981	0.50968

La deuxième section de notre analyse consiste à chercher s'il existe une loi probabiliste pouvant représenter ce temps d'avance. Pour analyser le meilleur modèle statistique, nous comparons en premier les critères suivants :

- Le critère d'information d'Akaike (AIC) :
 - $AIC = -2 * \log(L) + 2 * k$ avec L : valeur maximum de la fonction de vraisemblance et k le nombre de paramètres du modèle .
- Le critère d'information bayésien (BIC) :
 - $BIC = -2 * \log(L) + k * \log(N)$ avec L : valeur maximum de la fonction de vraisemblance , k le nombre de paramètres du modèle , N le nombre d'observations.
- Le test Anderson–Darling (AD):
 - $A^2 = -N - S$

- où : $S = \sum_{i=1}^N \frac{(2i-1) * (\ln F(Y_i) + \ln(1-F(Y_{N+1-i})))}{N}$ avec F la fonction de distribution cumulative de la distribution spécifique et N le nombre d'observations.

Le tableau 4.4 présente le résultat final de cette analyse. Il nous ressort que le modèle représentant la meilleure distribution pour le BIC et AIC est la distribution Gamma avec 3 paramètres et pour le AD, la meilleure distribution est celle de Weibull avec 2 paramètres . Ensuite, le test Kolmogorov-Smirnov est utilisé pour décider si l'échantillon provient de cette distribution spécifique. Dans les deux cas, la p-value est plus grande que 0,05 ce qui nous oblige à rejeter l'hypothèse que les données proviennent de cette distribution spécifique. Toutefois, nous notons que la distribution Weibull avec 2 paramètres semble être une distribution intéressante pour le paramètre de temps d'avance.

Tableau 4.4 : Tableau représentatif du test de Kolmogorov-Smirnov

Test de Kolmogorov-Smirnov	Distribution Gamma	Distribution Weibull
Statistique(p-value)	0.18928304	0.05744900
Valeur critique	0.03839949	0.03839949

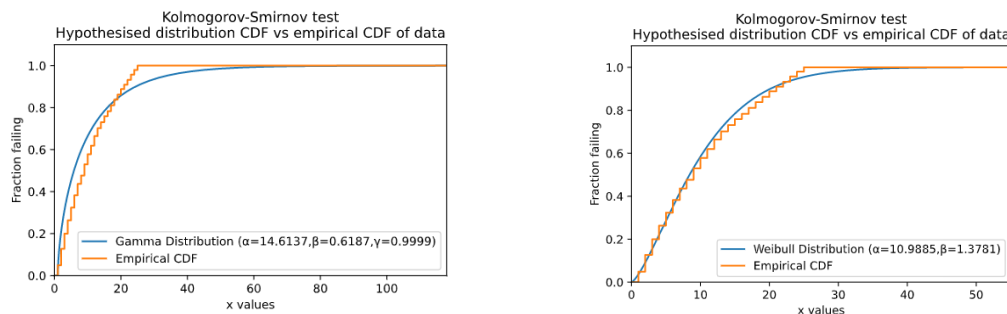


Figure 4.9 : Courbe présentant la distribution versus les données empiriques

Pour conclure, les tests étant non concluant pour cet échantillonnage ; nous pouvons donc réfuter l'hypothèse d'une variation du temps d'avance en fonction de l'âge et du mode de transport . De plus , il est important de noter la p-value de la distribution Weibull nous permet de poser l'hypothèse que sur le temps d'avance peut suivre cette distribution dans d'autres circonstances .

CHAPITRE 5 EXPÉRIMENTATIONS ET RÉSULTATS

Dans ce chapitre, nous présentons le plan d'expérience et aussi certains résultats comparatifs de mise en situation. Pour ce faire, nous avons posé certaines hypothèses vis-à-vis les paramètres du coût de notre problème présenté dans la première section. La figure suivante fait état des différentes expérimentations qui sont décrites ci-après.

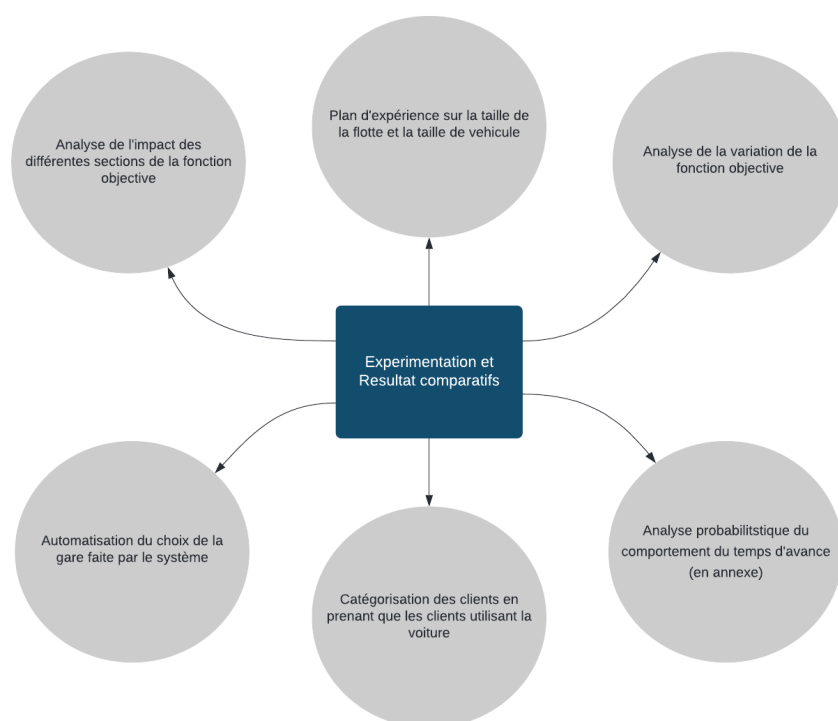


Figure 5.1 : Schéma représentatif des expérimentations et résultats comparatifs

5.1 Initialisations des paramètres du problème d'optimisation

Comme on peut le voir dans la fonction objective (figure 3.1), plusieurs paramètres nécessitent une initialisation pour commencer nos tests. Nous avons préétabli un coût de l'achat d'un véhicule à 5 000\$. À partir de cette valeur, nous calculons le gain d'assimiler un client dans notre tournée de véhicule, le coût d'une place vacante à l'intérieur du véhicule et celui du gain ou frais relatifs à la différence entre l'heure initiale donnée par le client et celle de notre système.

Tableau 5.1 : Paramètres fixés pour l'algorithme de recherche taboue

Paramètres	Formule
Gain d'assimiler un client dans la tournée	$CoutVehicule / TailleVehicule * 25$
Coût d'une place vacante à l'intérieur d'un véhicule k	$CoutVehicule / TailleVehicule * 2$
Gain/Coût de la différence entre l'heure de ramassage et l'heure de départ	$CoutVehicule / TailleVehicule * 50$

Enfin, les paramètres suivants ont été préétablis pour nos différents résultats :

- le temps total de trajet d'un véhicule k est de 25 min;
- le temps de ramassage ou de dépôt d'un client à son origine et sa destination est de 2 minutes;
- la vitesse commerciale est configurée à 30 km/h;
- l'heure d'arrivée à la gare par notre flotte ne devrait pas être plus tard que 5 minutes avant le départ du train.

5.2 Analyse de l'impact des différentes sections de la fonction objectives

L'algorithme TS nécessite une analyse comparative de la fonction objective pour déterminer les différentes sections de cette fonction objectifs. Dans cette partie, nous reviendrons sur ces sections vues dans la figure 5.1 et analyserons les indicateurs de performances pour un échantillonnage de clients utilisant ce service de *microtransit* pour se rendre à la gare ou pour quitter celle-ci.

5.2.1 Description des différentes fonctions objectifs

Dans un problème de tournée de véhicule, le but est de minimiser le coût de livraison des biens. Dans notre situation, le coût primordial est la distance entre les différents clients et la gare. De ce fait, la première fonction objectif analysée est celle qui minimise la somme de ces distances.

$$\underset{i \in N_0, j \in N, k \in V}{\text{minimize}} \quad \sum \sum \sum x_{i,j,k} * D_{i,j}$$

Figure 5.2 : Première fonction objectif

Dans la seconde fonction objectif, nous ajoutons le coût du véhicule et aussi un coût relié au nombre de places vacantes dans chaque véhicule. Dans cette situation, nous voulons nous assurer que les véhicules sont utilisés au maximum, autant dans la flotte que dans le nombre de places utilisées dans chaque véhicule.

$$\underset{i \in N_0, j \in N, k \in V}{\text{minimize}} \quad \sum \sum \sum x_{i,j,k} * D_{i,j} + v_k * \text{CoutVehicule} + (\text{TailleVehicule} - q_k) * \theta$$

Figure 5.3 : Seconde Fonction objectif

Dans cette troisième fonction objectif, nous ajoutons le coût relié au sentiment d'avance ou retard vis-à-vis le trajet initial de chaque client. Cet ajout devrait principalement améliorer le choix du client par rapport à leur fenêtre temporelle de leur mode d'origine.

$$\underset{i \in N_0, j \in N, k \in V}{\text{minimize}} \quad \sum \sum \sum x_{i,j,k} * D_{i,j} + v_k * \text{CoutVehicule} + (\text{TailleVehicule} - q_k) * \theta + (T_k - \lambda_i) * \gamma * y_{i,k} - z_i * \text{GainClientUtilisé}$$

Figure 5.4 : Troisième fonction objectif

Dans la section prochaine, nous analysons ces trois fonctions objectifs en examinant les tournées de véhicules et les indicateurs de performances suivants:

- ratio de compétitivité;
- pourcentage de client servis;
- capacité des véhicules;
- temps de trajet au total;
- pourcentage de clients quittant plus tard ou arrivant plus tôt que leur mode d'origine.

5.2.2 Initialisation des paramètres

Pour cette étude, nous avons choisi une flotte de 10 véhicules avec une taille de véhicule fixe de 7, pour un total de 70 clients pouvant être servis pour chaque départ (ou arrivée) de train. Pour la prochaine section, nous choisirons 4 échantillons : 2 qui représentent des clients allant vers la gare et 2 autres quittant la gare. Dans ces deux situations, nous prendrons un échantillon de taille inférieure à la taille de la flotte et supérieure à la flotte . On arrive alors à :

- Échantillonnage de clients allant vers la gare :
 - Départ 06h45 à la gare Saint-Constant
 - Départ 07h31 à la gare Delson
- Échantillonnage de clients quittant la gare :
 - Départ 12h50 à la gare Saint-Constant
 - Départ 16h04 à la gare Sainte-Catherine

5.2.3 Analyse sur un échantillonnage de client allant vers la gare

Le premier échantillon choisi est celui des clients se rendant à la gare Delson pour le départ du train à 07h31. La liste de 70 clients prévus pour répondre aux demandes de la gare Delson est utilisée à 39% avec une liste de clients de 27 clients. Les deux premières tournées générées sont identiques, la différence se situe sur la troisième tournée présentant la fonction objectif totale. Comme on peut le voir dans les deux tableaux ci-dessous, les véhicules 4 et 5 sont différents pour les deux tournées avec une répartition plus adéquate du nombre de clients par véhicule dans la première tournée (4 clients dans le véhicule 4 et 3 clients dans le véhicule 5). Toutefois, cette répartition oblige le client 6256 à quitter son domicile 9 minutes avant son départ habituel; la tournée prenant en compte l'impact de ces départs modifiant les habitudes du client oblige de condenser le véhicule 4 en plaçant ce client à la 5^e position avec un départ 6 minutes plus tard que son heure de départ d'origine.

Tableau 5.2 : Extrait de la tournée de véhicule des deux premières fonctions objectifs de la gare
Delson pour le départ à 07h31

	ID	Départ dans le mode d'origine(minute)	Départ dans le véhicule de partage(minute)	Numéro du véhicule	Position
19	6260	430	432	4	3
20	6422	438	421	4	1
21	6644	430	436	4	4
22	6647	435	427	4	2
23	6207	431	421	5	1
24	6256	435	426	5	3
25	6473	435	423	5	2

Tableau 5.3 : Extrait de la tournée de véhicule de la troisième fonction objectif de la gare Delson
pour le départ à 07h31

	ID	Départ dans le mode d'origine(minute)	Départ dans le véhicule de partage(minute)	Numéro du véhicule	Position
19	6256	435	441	4	5
20	6260	430	432	4	3
21	6422	438	421	4	1
22	6644	430	436	4	4
23	6647	435	427	4	2
24	6207	431	421	5	1
25	6473	435	423	5	2

Dans le deuxième échantillonnage, la première tournée présentant la fonction objectif de minimiser la somme des distances présente des différences notables vis-à-vis des deux autres tournées. Sur cette tournée, on voit vraiment l'importance de la seconde section visant à s'assurer que les véhicules soient utilisés à leur pleine capacité . En effet, les deux tableaux ci-dessous présentent la tournée des deux premiers véhicules de chaque tournée et la différence qu'on remarque en premier est le nombre de clients par véhicule (4/5 clients dans la première tournée et 7/7 clients pour les deux autres tournées).

Tableau 5.4 : Extrait de la tournée de véhicule de la première fonction objectif de la gare Saint-Constant pour le départ à 06h45

	ID	Départ dans le mode d'origine(minute)	Départ dans le véhicule de partage(minute)	Numéro du véhicule	Position
71	5048	363	381	1	2
72	5438	394	390	1	4
73	5543	395	387	1	3
74	5558	390	375	1	1
75	5075	363	385	2	3
76	5345	400	394	2	5
77	5497	395	379	2	2
78	5809	400	391	2	4
79	5952	400	375	2	1

Tableau 5.5 : Extrait de la tournée de véhicule des deux dernières fonctions objectifs de la gare Saint-Constant pour le départ à 06h45.

	ID	Départ dans le mode d'origine(minute)	Départ dans le véhicule de partage(minute)	Numéro du véhicule	Position
61	5048	363	375	1	1
62	5348	395	397	1	7
63	5438	394	390	1	4
64	5532	400	393	1	5
65	5543	395	387	1	3
66	5558	390	381	1	2
67	5852	400	395	1	6
68	5075	363	375	2	1
69	5281	395	389	2	5
70	5345	400	386	2	4
71	5408	390	394	2	7
72	5809	400	383	2	3
73	5952	400	381	2	2
74	6654	385	391	2	6

Enfin, le tableau ci-dessous présente un résumé des indicateurs de performances ; on peut voir une amélioration significative de la solution en passant de la fonction objectif minimisant la somme des distances et celle qui englobe les autres sections.

Tableau 5.6 : Sommaire des indicateurs de performance des échantillons de client allant vers la gare

	Départ 07h31 à la gare Delson			Départ 06h45 à la gare Saint-Constant		
Type de fonction objectifs	1	2	3	1	2	3
Durée de véhicule totale	295	295	303	418	614	614
Ratio de compétitivité	1.12	1.12	1.13	1.07	0.9	0.9
% de client servis	100	100	100	38	46	46
Capacité des véhicules	64	64	64	61	76	76
% de client quittant plus tôt leur domicile	56	56	52	81	68	68

5.2.4 Analyse sur un échantillonnage de client quittant la gare

Le premier échantillon représente les clients quittant la gare Saint-Constant à 16h26 pour se rendre à leur domicile. Composé de 57 clients, on remarque que la fonction objectif totale correspond à la meilleure tournée de véhicule ; avec un meilleur ratio de compétitivité de 0,88, cette tournée est identique à celle trouvée dans la 2^e fonction objectif. En effet, la différence se situe vis-à-vis la première fonction objectif qui ne prend en compte que la minimisation de la somme des distances entre chaque client. Comme on peut le voir dans l'exemple, l'ajout d'une contrainte vis-à-vis le remplissage de nos véhicules partagé permet de prendre plus de clients (+11%).

Tableau 5.7 : Extrait de la tournée de véhicule de la première fonction objectif de la gare Saint-Constant à 16h26

	ID	Départ dans le mode d'origine(minute)	Départ dans le véhicule de partage(minute)	Numéro du véhicule	Position
39	5524	1005	994	2	1
40	5968	990	999	2	2
41	6184	1005	1006	2	4
42	6590	990	1002	2	3

Tableau 5.8 : Extrait de la tournée de véhicule des deux dernières fonctions objectifs de la gare
Saint-Constant à 16h26

	ID	Départ dans le mode d'origine(minute)	Départ dans le véhicule de partage(minute)	Numéro du véhicule	Position
39	5524	1005	996	2	2
40	5968	990	991	2	1
41	6184	1005	1010	2	5
42	6547	990	1007	2	4
44	6590	990	992	2	3

Pour le second échantillon étudié, les trois tournées présentent la même tournée avec un pourcentage de client servis de 47% et un ratio de compétitivité de 0,57 déjà présent lors de la génération de la première tournée.

Tableau 5.9 : Sommaire des indicateurs de performances des échantillons de client quittant la
gare

	Départ 16h26 à la gare Saint-Constant			Départ 16h43 à la gare Sainte-Catherine		
Type de fonction objectifs	1	2	3	1	2	3
Durée de véhicule totale	474	544	544	622	622	622
Ratio de compétitivité	0.90	0.88	0.88	0.57	0.57	0.57
% de client servis	80	84	84	47	47	47
Capacité des véhicules	65	76	76	90	90	90
% de client arrivant plus tard à leur domicile	39	43	43	54	54	54

5.2.5 Conclusion

Cette étude visant à analyser les différentes sections de notre fonction objectifs permet de dégager quelques résultats notables de l'importance de complexifier la fonction objective.

Premièrement, l'ajout de la contrainte de remplissage vis-à-vis les véhicules de partages tend à de meilleures solutions par rapport à nos indicateurs de performances. En effet, dans les quatre exemples, on note une augmentation significative quand on ajoute cette contrainte (+18% dans le taux de client servis et +15% dans la capacité des véhicules pour le départ de 06h45 à la gare Saint-Constant).

Deuxièmement, l'ajout de la deuxième contrainte, en plus des autres contraintes, a pour but principal d'accommoder les clients en fonction de leur fenêtre temporelle. Cet ajout tend comme prévu à améliorer le dernier indicateur en ayant l'effet contraire sur les autres indicateurs. Toutefois, il est à noter que les autres indicateurs ont tendance à garder la même valeur que celle de la 2^e fonction objectif ; ceci nous conforte dans l'idée que cette contrainte aura un effet minime sur la solution finale tout en permettant au client de se sentir en avance ou dans les mêmes conditions de son mode d'origine.

5.3 Analyse de la variation de la fonction objective

Comme toute méthode itérative, le procédé algorithmique utilisé pour résoudre notre problème de tournée de véhicule nécessite un nombre d'itérations pour arriver à une vitesse de convergence proche de son point limite. Dans cette section, nous étudions un échantillonnage de 4 tournées de véhicules et regardons leur vitesse de convergence pour estimer un nombre optimal d'itérations pour notre problème.

5.3.1 Initialisation des paramètres

Dans cette section, les paramètres de la flotte et de la taille des véhicules sont identiques à l'analyse des différentes fonctions objectifs avec une flotte de 10 véhicules et 7 places par véhicule. Toutefois, la liste de client étudiée pour cette analyse a été modifiée avec :

- Tournée de client allant vers la gare :
 - Sainte-Catherine à 07h09
 - Saint-Constant à 07h36
- Tournée de client quittant la gare :
 - Delson à 16h31
 - Sainte-Catherine à 16h43

5.3.2 Analyse des résultats

Commençant par la tournée de véhicule de la gare Sainte-Catherine pour 07h09, le graphique ci-dessous nous permet de discerner 3 périodes distinctes dans la variation de la fonction objective. En effet, nous avons une faible variation de la valeur de la fonction objective entre la 1^{re} et la 65^e itération. La seconde période entre les 65^e et 76^e itérations présente une chute drastique de la valeur de la fonction objective avec une réduction de plus de 2%. Ensuite, la troisième période correspond à une répétition identique du comportement de l'algorithme entre les 76^e et 200^e itérations. Dans cette tournée, l'algorithme a connu 12 fois une amélioration de sa solution, dont la dernière à la 112^e itération.

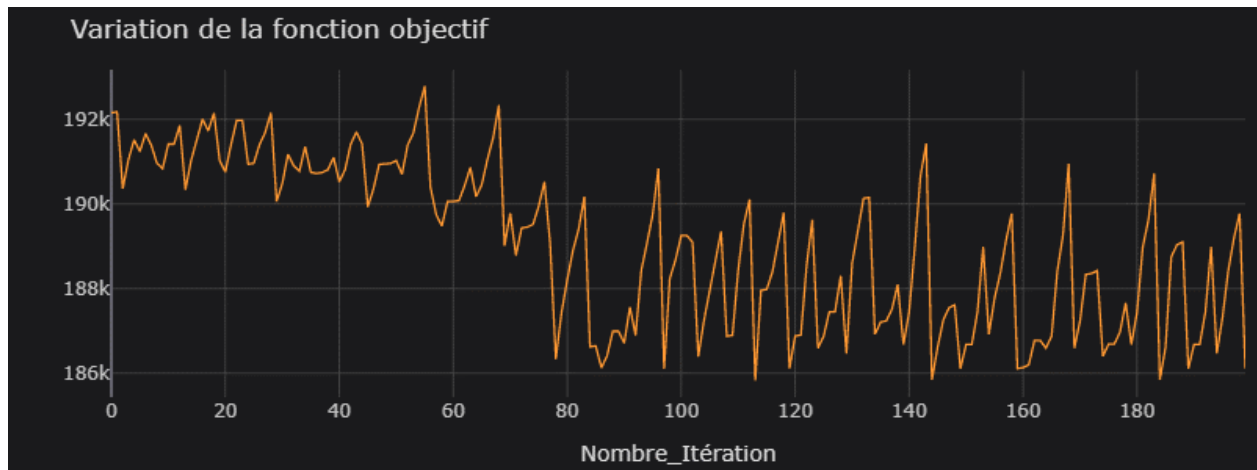


Figure 5.5 : Variation de la fonction objectif pour la gare Sainte-Catherine pour 07h09

Pour la tournée de véhicule de la gare Sainte Constant pour 07h36, le graphique ci-dessous nous permet de discerner une forme sinusoïdale de la fonction objective. En effet, nous avons une faible

variation de la valeur de la fonction objective entre la 1^{re} et la 200^e itération. Dans cette tournée, l'algorithme a connu 8 fois une amélioration de sa solution, dont la dernière à la 89^e itération.

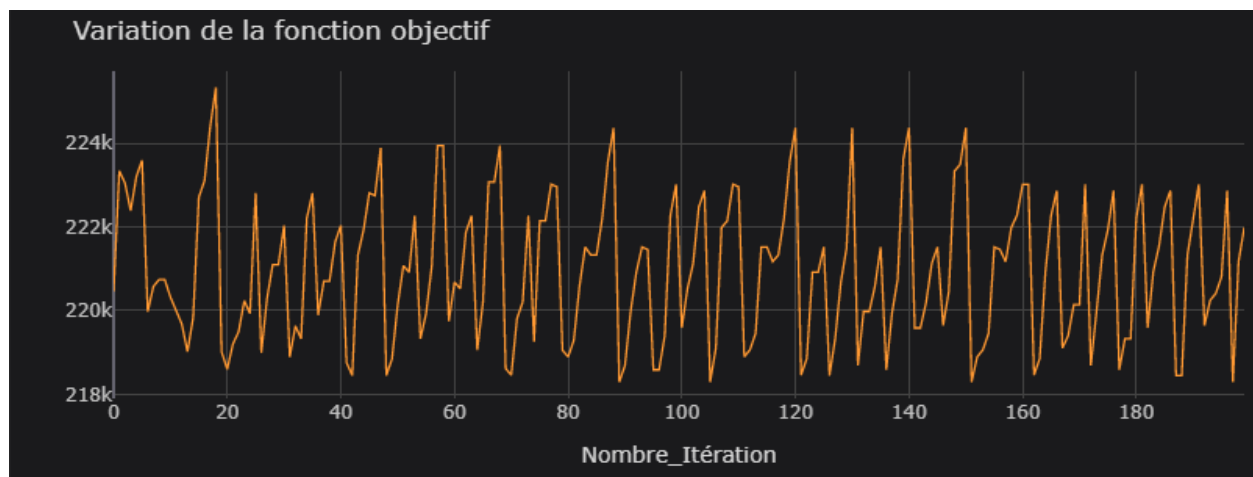


Figure 5.6 : Variation de la fonction objectif pour la gare Saint-Constant pour 07h36

Ensuite, le graphique de la tournée de véhicule des clients de Delson pour le train de 16h26 présente une seule amélioration à la 7^e itération. Juste avant la 100^e itération, nous remarquons que l'algorithme explore les différents voisinages sans trouver de meilleures solutions.



Figure 5.7 : Variation de la fonction objectif pour la gare Delson pour 16h26

Enfin, la dernière tournée présentant les clients de la gare Sainte-Catherine pour un départ à 16h43 permet de discerner 2 périodes distinctes. En effet, lors des 10 premières itérations, la solution s'améliore 7 fois pour arriver à sa meilleure solution à la 9^e itération. Ensuite, la deuxième période présente une variation sinusoïdale de la valeur de la fonction objective.



Figure 5.8 : Variation de la fonction objectif pour la gare Sainte-Catherine pour 16h43

5.3.3 Conclusion

Cette section nous a permis de déterminer le comportement de la solution de l'algorithme après chaque itération. De ce fait, nous pouvons noter deux points importants à partir de ces résultats.

En premier, on peut noter que la majorité des améliorations se font dans les 100 premières itérations; il est donc inutile de rouler l'algorithme après autant d'itération. Pour éviter cette courbe sinusoïdale après les améliorations, on devrait insérer une contrainte d'arrêt sur le nombre d'itérations sans amélioration, ce qui permettrait alors de gagner du temps.

En second, on devrait augmenter la taille de notre liste Tabou qui présentement suit la formule suivante :

$$ListeTabou = \sqrt{NombreDeClientTournée}$$

Il serait aussi intéressant de revoir la stratégie de diversification qui initialement revient sur la dernière meilleure solution en interdisant le voisinage visité. Ceci provoque à l'algorithme de visiter deux meilleurs voisinages de la dernière meilleure solution dans une boucle. On pourrait ajouter une autre liste quantifiant les voisinages trop visités et les pénaliser pour permettre à l'algorithme de visiter les autres régions.

5.4 Plan d'expérience sur la taille de la flotte et la capacité des véhicules

Pour l'application d'un algorithme de tournée de véhicule, le gestionnaire doit prendre une décision vis-à-vis la capacité des véhicules et la taille de la flotte. Cette section revient sur l'analyse de la variation de ces deux paramètres.

5.4.1 Initialisation des paramètres

Dans ce sous-chapitre, les paramètres de la flotte et de la taille de véhicules sont présentés dans le tableau ci-dessous. Nous étudierons les indicateurs suivants pour étudier alors l'impact de ces deux paramètres sur la solution finale :

- ratio de compétitivité;
- pourcentage de client servis;
- pourcentage de client quittant plus tard ou arrivant plus tôt que leur mode d'origine;
- capacité.

La liste de client étudié pour cette analyse est la suivante :

- Tournée de client allant vers la gare :
 - Saint-Constant à 07h36
- Tournée de client quittant la gare :
 - Sainte-Catherine à 16h43

Le tableau 5.10 présente la liste des tailles de véhicules et les tailles de flotte que nous analyserons dans ce chapitre .

Tableau 5.10 : Plan d'expérience

Variable	CHOIX							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Taille du véhicule			4	6	8	12		
Taille de la flotte	3	5	6	7	8	9	10	11

5.4.2 Analyse des résultats

La première tournée que nous analysons est celle de la gare Saint-Constant pour les clients allant à la gare pour le départ de 07h36. Composé de 105 clients, on remarque que cette liste n'est jamais prise en compte complètement par notre flotte de véhicule ; en effet, le maximum du taux de client servis est de 76% atteint pour une flotte pouvant contenir 122 clients. De plus, on remarque une réduction drastique du taux de remplissage des véhicules de partages quand le nombre de places passe de 8 places à 12 places ($\approx$ chute de 30 %). Pour le ratio, la meilleure valeur consiste au ratio le plus faible ; de ce fait, les tailles de véhicules de 6, 8 et 12 places présentent les meilleurs ratios avec une taille de flotte entre 5 et 7 véhicules. Enfin, le dernier histogramme présentant le pourcentage de clients quittant plus tard que leur mode d'origine réduit l'espace de solution en présentant les meilleures valeurs pour une taille de véhicule de 8 places avec une flotte entre 5 et 8 véhicules. Pour conclure, pour cette tournée, la solution optimale se trouve pour une flotte de 6 véhicules pouvant prendre jusqu'à 8 clients par véhicules ; cette tournée permettra de servir 44% de la clientèle.

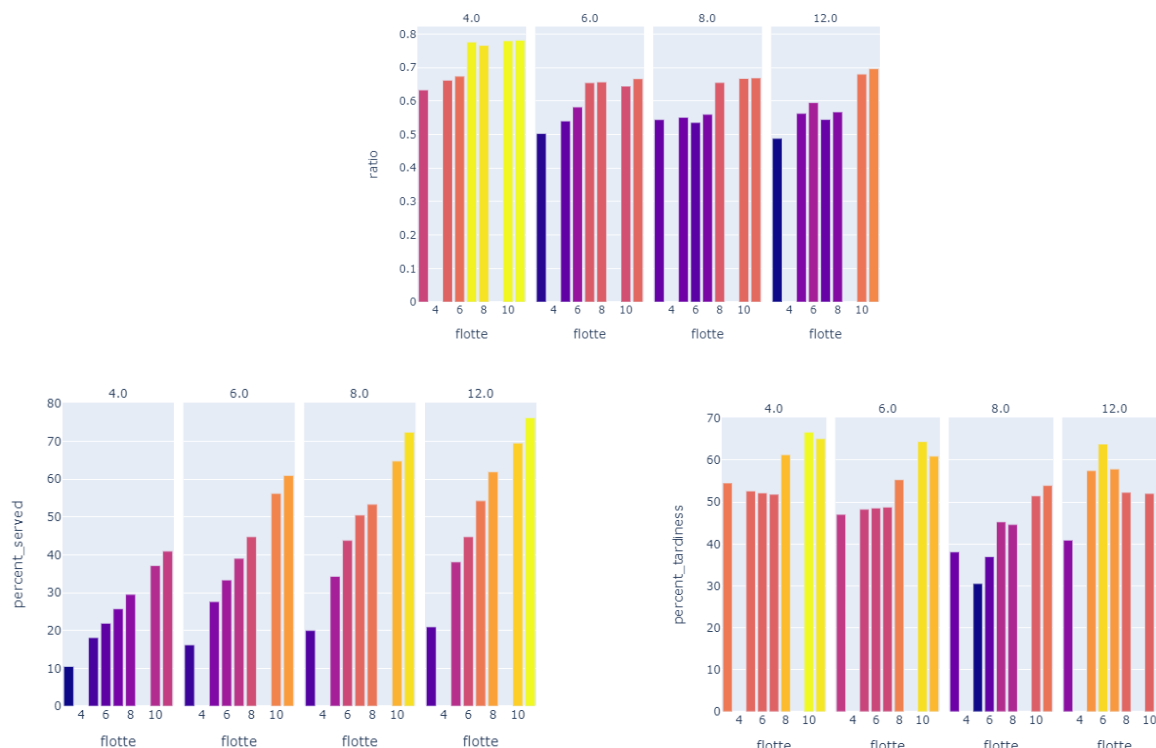


Figure 5.9 : Histogrammes présentant les indicateurs de performances pour les clients de la gare Saint-Constant pour le train de 07h36

La deuxième tournée représente celle de la gare Sainte-Catherine pour les clients quittant la gare pour le départ de 16h43. Composée de 135 clients, on remarque que cette liste n'est jamais prise en compte complètement par notre flotte de véhicule ; en effet, le maximum du taux de client servis est de 72% atteint équivalent à 97 clients. De plus, on remarque une augmentation drastique du taux de clients arrivant chez eux plus tard que leur mode d'origine quand le nombre de places passe de 8 places à 12 places ($\approx$ augmentation de 20 %). Pour le ratio, la meilleure valeur consiste au ratio le plus faible ; de ce fait, les tailles de véhicules 8 et 12 places présentent les meilleurs ratios avec une taille de flotte entre 5 et 7 véhicules. Pour conclure, pour cette tournée, la solution optimale se trouve pour une flotte 8 véhicules pouvant prendre jusqu'à 8 clients par véhicules ; cette tournée permettra de servir 40% de la clientèle.

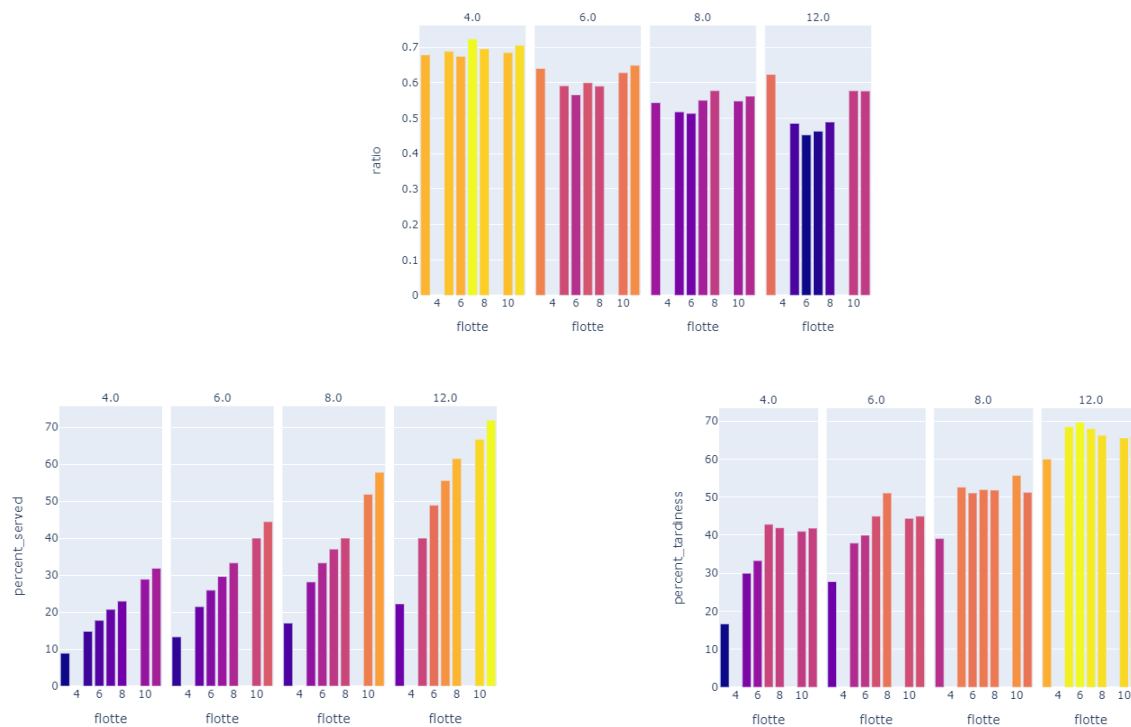


Figure 5.10 : Histogramme présentant les indicateurs de performances pour les clients de la gare Sainte-Catherine pour le départ de 16h43

5.4.3 Conclusion

En général, cette section nous a permis d'analyser les différentes tailles de véhicules et de flotte pour arriver à cerner la taille optimale pour notre échantillonnage de clients. Ces deux départs de train choisis dans deux gares distinctes représentent la liste de clients la plus grande pour les clients quittant la gare (en après-midi) et la deuxième plus grande pour les clients allant à la gare (en matinée). La conclusion de l'analyse de ces deux listes se rejoint sur une taille de véhicule autour de 8 places avec une flotte entre 5 et 8 véhicules; dans les deux situations, nous arrivons avec la meilleure combinaison des indicateurs de performances tout en servant 40% des clients.

5.5 Automatisation du choix de la gare faite par le système

Dans ce chapitre, nous cherchons à automatiser notre système pour assigner les clients en fonction de leur proximité vis-à-vis les gares. Dans l'échantillonnage, 13,7% des clients ne se rendent pas à la gare se situant le plus proche d'eux. Ainsi, nous reviendrons sur ces clients en analysant leur impact sur les trajets des véhicules de partages.

5.5.1 Initialisation des paramètres

Pour débiter, nous regroupons tous les clients dans une même liste pour ainsi les placer par rapport à leur gare affiliée par leur proximité. À chaque plage horaire de départ d'un train, l'algorithme réassigne les clients non utilisés par la tournée précédente à la seconde gare la plus proche. La proximité des gares du système nous oblige à poser l'hypothèse qu'un client ne pouvant pas être desservi par son premier choix de gare peut toutefois être affecté à une tournée de la seconde gare la plus proche de ses coordonnées.

Ensuite, en prenant la conclusion de la section précédente, nous pouvons choisir une flotte de véhicule et une taille de véhicule précises ; les valeurs sélectionnées sont une taille de véhicule de 7 places et une flotte de 7 véhicules.

La liste de client étudié pour cette analyse est la suivante :

- Tournée de client allant vers la gare :
 - 2^e départ :
 - Delson à 07h00 ; Saint-Constant à 07h05 ; Sainte-Catherine à 07h09
 - 3^e départ :
 - Delson à 07h31 ; Saint-Constant à 07h36 ; Sainte-Catherine à 07h40
- Tournée de client quittant la gare :
 - 2^e départ :
 - Delson à 16h12 ; Saint-Constant à 16h08 ; Sainte-Catherine à 16h04
 - 4^e départ :
 - Delson à 16h52 ; Saint-Constant à 16h47 ; Sainte-Catherine à 16h43

5.5.2 Analyse des résultats des clients arrivant à la gare (matinée)

Delson à 07h00 ; Saint-Constant à 07h05 ; Sainte-Catherine à 07h09

Débutons notre analyse sur les départs pour 7h du matin pour la gare Delson et terminant par un départ à 07h09 à la gare Sainte-Catherine. Le tableau ci-dessous présente les clients qui ont vu leur gare initiale se modifier. On remarque un déplacement de clients non négligeable de la gare Saint-Constant vers la gare Sainte-Catherine. En effet, nous avons un transfert de 30 clients quittant la gare Sainte-Catherine et utilisant notre service dans la gare Saint-Constant qui voit le nombre total de clients passer de 110 à 140 clients.

Tableau 5.11 : Tableau représentatif des nombres de clients changeant de gare (1)

	Nombre de clients changeant de gare
Gare Delson à Gare Saint-Constant	4
Gare Delson à Gare Sainte-Catherine	0
Gare Saint-Constant à Gare Delson	8
Gare Saint-Constant à Gare Sainte-Catherine	18
Gare Sainte-Catherine à Gare Delson	5
Gare Sainte-Catherine à Gare Saint-Constant	48

En comparaison, les tournées prenant en compte le train sélectionné par le client, qu'on appellera « tournée d'origine », desservent un total de 113 clients en comparaison aux 117 clients servis par l'automatisation du choix de la gare. On remarque aussi une homogénéisation du pourcentage de client servis par chaque gare avec 30% dans les deux gares dans les nouvelles tournées (en comparaison à 27% à la gare Sainte-Catherine et 32,4 % à la gare Saint-Constant). Toutefois, les clients non assignés à leur première gare ne se retrouvent pas assignés à une tournée de leur deuxième gare la plus proche ; on aurait vu ce déplacement si on augmentait significativement la taille de la flotte.

Delson à 07h31 ;Saint-Constant à 07h36 ;Sainte-Catherine à 07h40

Comme le premier cas ci-dessous, la clientèle qui voit leur trajet se modifier est celle autour de la gare Saint-Constant ; on remarque une perte de 29 clients pour cette gare et un gain de 64 clients pour un total de 96 déplacements de clients entre deux gares. Il est toutefois important de noter que 28% de la clientèle de ces trois gares ont une modification de leur habitude de trajet.

Tableau 5.12 : Tableau représentatif des nombres de clients changeant de gare (2)

	Nombre de clients changeant de gare
Gare Delson à Gare Saint-Constant	4
Gare Delson à Gare Sainte-Catherine	0
Gare Saint-Constant à Gare Delson	12
Gare Saint-Constant à Gare Sainte-Catherine	17
Gare Sainte-Catherine à Gare Delson	3
Gare Sainte-Catherine à Gare Saint-Constant	60

Ces tournées confirment les conclusions du premier échantillonnage ; nous avons une meilleure répartition de la clientèle avec un taux de client servis qui se réajuste entre les deux gares les plus denses. De plus, on remarque aussi la présence accrue de clients placés initialement dans leur « mauvaise » gare; en effet, comme on peut le voir dans les deux tableaux ci-dessous , la nouvelle tournée du 5^e véhicule de client se dirigeant à la gare Saint-Constant est complètement composée de clients prenant initialement des trajets se dirigeant aux deux autres gares . Cette nouvelle tournée permet au client de se rendre à la gare avec une avance de 6 minutes qui aurait pu permettre au véhicule de prendre un 8^e client, si sa capacité maximale ne le bloquait pas.

Tableau 5.13 : Extrait de la tournée de véhicule de la gare Saint-Constant pour le départ 07h36
(version initiale)

	id	pos	arrival_time(minute)	Numéro du véhicule
2	5822	1	426	5
8	6444	2	428	5
16	6315	3	430	5
22	6170	4	432	5
28	6523	5	434	5
34	6379	6	437	5
41	6424	7	439	5

Tableau 5.14 : Extrait de la tournée de véhicule de la gare Saint-Constant pour le départ 07h36
(modification)

	id	pos	arrival_time(minute)	Numéro du véhicule
4	5942	1	426	5
39	6587	2	429	5
71	6377	3	432	5
74	6598	4	436	5
77	6575	5	439	5

Tableau 5.15 : Extrait de la tournée de véhicule de la gare Saint-Constant pour le départ 07h36
(modification)(suite)

89	6682	6	442	5
95	6664	7	445	5

5.5.3 Analyse des résultats des clients quittant la gare(après-midi)

Delson à 16h12 ; Saint-Constant à 16h08 ;Sainte-Catherine à 16h04

Pour le premier départ du train en après-midi, on remarque une proportion identique de clients voyant leur trajet de départ modifié (22%). Comme dans les cas précédents, la majorité de ces mouvements se situent autour de la gare Sainte-Catherine ; en effet, cette gare englobe 83% des mouvements des clients et ceci peut s'expliquer que cette gare se situe au milieu de l'échantillonnage étudié.

Tableau 5.16 : Tableau représentatif des nombres de clients changeant de gare (3)

	Nombre de clients changeant de gare
Gare Delson à Gare Saint-Constant	0
Gare Delson à Gare Sainte-Catherine	1
Gare Saint-Constant à Gare Delson	5
Gare Saint-Constant à Gare Sainte-Catherine	3
Gare Sainte-Catherine à Gare Delson	4
Gare Sainte-Catherine à Gare Saint-Constant	16

Dans les trois tournées respectives, les conclusions émises sur les tournées précédentes se retrouvent ici ; en effet, on remarque que le taux de client servis pour la gare Saint-Constant passe de 74% à 60% et la gare Sainte-Catherine de 50% à 72%. De plus, la liste de client de la gare Delson connaît une augmentation significative avec une clientèle qui a doublé ; ceci s'explique principalement par des clients qui ont été réassignés à cette gare après ne pas avoir être dans la tournée de leur première gare.

Tableau 5.17 : Liste de client réassigné dans une gare secondaire

Id	Gare primaire	Gare secondaire
6109	42	41
6310	42	41
6531	42	41
5176	42	41

Tableau 5.18 : Liste de client réassigné dans une gare secondaire(suite)

5763	43	41
5448	42	41

Delson à 16h52 ;Saint-Constant à 16h47 ;Sainte-Catherine à 16h43

Pour ce second départ en après-midi, la même situation est visible avec des mouvements autour de la gare Sainte Constant ; on remarque un écart de taux de client servis significativement important avec la nouvelle tournée ($\approx 45\%$ pour les deux gares au lieu de 33% et 63%).

Tableau 5.19 : Tableau représentatif des nombres de clients changeant de gare (4)

	Nombre de clients changeant de gare
Gare Delson à Gare Saint-Constant	0
Gare Delson à Gare Sainte-Catherine	1
Gare Saint-Constant à Gare Delson	1
Gare Saint-Constant à Gare Sainte-Catherine	3
Gare Sainte-Catherine à Gare Delson	0
Gare Sainte-Catherine à Gare Saint-Constant	27

Dans ces trois tournées, on note une arrivée de la flotte plus rapidement à leur gare respective; en effet, chaque tournée de véhicule perd en moyenne 3 minutes de trajet au total et il est même possible pour certains véhicules de voir une réduction de 8 minutes dans leur temps de trajets qui leur permettraient d'ajouter un nouveau client si la capacité du véhicule n'était pas atteinte.

5.5.4 Conclusion

Pour conclure, nous revenons sur l'hypothèse émise qu'un client ne pouvant pas être desservi par son premier choix de gare peut toutefois être affecté à une tournée de la seconde gare la plus proche de ses coordonnées ; celle-ci est visible dans les différentes gares précisément dans la gare Delson avec un ajout significatif de clients comme au départ à 16h12 et Saint-Constant avec une utilisation des clients non assignés de la gare Sainte-Catherine. De plus, la réassignation au démarrage des clients à leur gare la plus proche permet une meilleure répartition des clients entre les deux gares Saint-Constant et Sainte-Catherine . Enfin, il est intéressant de prendre en compte ce choix au démarrage de l'algorithme surtout pour le gain en termes de temps que cela peut représenter sur des trajets de véhicule de desserte.

5.6 Analyse des tournées en fonction du mode de choix

Dans ce chapitre, nous analyserons l'impact sur les tournées si le choix du mode était restreint à l'utilisateur de véhicule⁵ et du transport en commun. De plus, nous ajoutons une restriction liée à l'aire de desserte minimale obligeant nos véhicules partagés de chercher des clients trop près de la gare. Cette stratégie vise à se focaliser sur l'objectif de réduire le taux de remplissage du stationnement gratuit autour des gares.

5.6.1 Initialisation des paramètres

Avant de débiter notre analyse, nous devons initialiser certains paramètres de notre problème ; en premier, nous utiliserons la taille de flotte et taille de véhicule optimale trouvées dans le chapitre 5.4. Ensuite, nous devons choisir l'aire de desserte minimale; dans notre étude, nous avons choisi un diamètre de 500 mètres autour de la gare respective.

L'étude se portera sur les tournées de véhicule suivantes :

- Tournée de client allant vers la gare :
 - Gare Saint-Constant pour le départ de 07h05
 - Gare Sainte-Catherine pour le départ de 08h11
- Tournée de client quittant la gare :
 - Gare Saint-Constant pour le départ de 16h47
 - Gare Sainte-Catherine pour le départ de 16h22

Cette analyse se fera sur les tournées de véhicules et les indicateurs de performances suivants :

- ratio de compétitivité;
- pourcentage de client servis;
- pourcentage de client quittant plus tard ou arrivant plus tôt que leur mode d'origine;
- capacité.

⁵ Auto-conducteur, auto-passager et taxi

5.6.2 Analyse des tournées des clients allant vers la gare (matinée)

Pour cette première tournée, nous analyserons le départ de 07h05 de la gare Saint-Constant; la tournée initiale est composée de 120 clients assignés à une flotte maximale allant jusqu'à pouvoir servir 49 clients. Dans celle-ci, les 7 véhicules sont utilisés avec un taux de remplissage égalant les 79,6 % au total ; la tournée permet de servir 39 clients avec une durée totale de trajet de 578 minutes. Ensuite, nous avons retiré les clients se situant trop près de la gare et ceux utilisant comme mode de déplacement d'origine la marche et le vélo ; on arrive alors à retirer 20 clients pour une liste de 100 clients. Par exemple, on peut voir que le client 5672, présent dans la tournée initiale dans le second véhicule, n'est plus dans la seconde tournée, car son mode de déplacement est en vélo à l'origine. Dans cette tournée, 39 clients sont servis avec une durée totale de trajet de 640 minutes; certes la durée totale de cette nouvelle tournée est plus élevée que la version initiale, mais nous avons un meilleur ratio et aussi une réduction notable du pourcentage de clients quittant leur domicile plus tôt pour se rendre à la gare Saint-Constant.

Tableau 5.20 : Sommaire des indicateurs de performances pour la gare Saint-Constant pour le départ à 07h05

Gare Saint-Constant à 07h05	Capacité	Ratio	% client servis	Durée totale	% de clients quittant plus tôt
Tous les clients	79,6	0,99	32,5	578	74,36
Choix des clients	79,6	0,94	39,8	640	69,23

La seconde analyse consiste à étudier les clients du départ de 08h11 de la gare Saint-Catherine; celle-ci est constituée initialement de 132 clients avec un pourcentage de client servis 31%. La tournée initiale utilise les 7 véhicules de la flotte avec une capacité totale de 83.7% et un ratio légèrement inférieur à 1 (0,9). Dans la tournée prenant en compte spécifiquement les clients véhiculés, on remarque une réduction de 28 clients pour arriver à un total de 104 clients ; cette tournée dessert 40 clients avec une durée totale de 543 minutes. Toutefois, nous notons une augmentation non négligeable du nombre de clients se voyant quitter leur domicile plus tôt que leur mode d'origine; cet indicateur est important à prendre en compte, car il peut provoquer le rejet de certains usagers à utiliser ce service de véhicule de partage.

Tableau 5.21 : Sommaire des indicateurs de performances pour la gare Sainte-Catherine pour le départ à 08h11

Gare Sainte-Catherine à 08h11	Capacité	Ratio	% client servis	Durée totale	% de clients quittant plus tôt
Tous les clients	83,7	0,9	31,1	551	34,15
Choix des clients	81,6	0,92	38,46	543	45

5.6.3 Analyse des tournées des clients quittant la gare (après-midi)

Pour le premier départ en après-midi, la tournée initiale est composée de 56 clients répartis dans les 7 véhicules de la flotte avec un taux de remplissage de 92%. On note aussi un ratio inférieur à 1 pour cette tournée qui permet d’avoir une réduction des véhicules-kilomètres parcourus avec les véhicules de partage. La seconde tournée retirant les clients tout proches de la gare et ceux utilisant leur vélo ou la marche est composée de 30 clients ; on a alors une réduction de 47 % de la clientèle pour ce départ. Avec un taux de remplissage des véhicules de 57 %, cette tournée regroupe les clients de manière hétérogène entre les véhicules. En effet, 4 véhicules sur les 7 sont utilisés à moins de 40 % de leur capacité allant jusqu’à 1 seul passager pour le 7^e véhicule.

Tableau 5.22 : Sommaire des indicateurs de performances pour la gare Sainte-Catherine pour le départ de 16h22

Gare Sainte-Catherine à 16h22	Capacité	Ratio	% client servis	Durée totale	% de clients arrivant plus tard
Tous les clients	91,83	0,96	80,36	509	60
Choix des clients	57,14	1,2	90,32	305	53,57

Dans le second départ en après-midi, nous analyserons les clients du départ à 16h47 à la gare Saint-Constant ; cette tournée est constituée de 61 clients avec un taux de client servis de 62%. Les 7 véhicules sont utilisés dans cette tournée avec une durée totale de 461 minutes et un ratio de véhicules-kilomètres parcourus égale à 1. En comparant à la tournée avec le choix spécifique de

clients, on remarque une réduction de 50% de la liste de client initiale ; on signale aussi une augmentation notable du ratio et aussi du pourcentage de client arrivant plus tard à leur domicile respectif.

Tableau 5.23 : Sommaire des indicateurs de performances pour la gare Saint-Constant pour le départ de 16h47

Gare Saint-Constant à 16h47	Capacité	Ratio	% client servis	Durée totale	% de clients arrivant plus tard
Tous les clients	77,5	1,03	62,3	461	23,68
Choix des clients	71	1,16	83,33	330	44

Pour ces deux tournées de clients quittant la gare, on remarque que la version retirant les clients utilisant le vélo ou la marche comme mode de déplacement change la solution finale négativement. En effet, on remarque une augmentation de 20% des véhicules-kilomètres parcourus par les véhicules de partage en comparaison à la somme des véhicules kilomètre dans leur mode d'origine; de plus, le pourcentage de client arrivant plus tard à leur domicile respectif connaît une augmentation de 18%.

5.6.4 Conclusion

Pour conclure, l'hypothèse énoncée par cette section est de revenir sur une meilleure réponse à la surutilisation des espaces de stationnements dans les gares respectifs. Pour répondre à celle-ci, nous avons donc retiré les clients utilisant le vélo et la marche comme mode de déplacement et les clients se situant très proche de la gare. En ajoutant ces deux contraintes dans notre algorithme, on remarque une différence nette entre les solutions pour les tournées de clients allant à la gare (matinée) et quittant la gare (après-midi). En effet, les tournées analysées nous permettent de conclure que ce service est intéressant pour les tournées du matin avec une augmentation notable du pourcentage de clients servis et une amélioration ou stagnation des autres indicateurs de performance. De ce fait, nous suggérons l'implication dans l'algorithme pour les clients allant à la gare et de plutôt utiliser la liste complète de clients pour les tournées de l'après-midi.

CHAPITRE 6 OUTIL INTERACTIF DE CONFECTION DE TOURNÉES

Ce chapitre consiste à présenter l'outil d'aide à la décision mis en place pour visualiser l'apport de ce service de desserte lors d'un départ du train en matinée et en après-midi. Nous présentons d'abord la structure de la base de données. Ensuite, nous présentons l'interface avec la disposition des paramètres et des graphiques utilisés.

6.1 Structure de la base de données

Avant d'incorporer le résultat final sur l'interface, nous devons créer notre espace « serveur » permettant l'importation des données du client Exo. Pour se faire, la technologie utilisée est MySQL, un système de gestion de base de données relationnelles, pour créer un serveur stockant nos données. Le service de base de données MySQL est entièrement géré pour déployer des applications "cloud-native". La figure 3.10 présente le modèle relationnel de données; les quatre tables sont celles caractérisant le client, la gare et les deux autres présentent d'un bord les clients utilisant le service pour aller à la gare (« departure_time ») et pour retourner à leur domicile (« arrival_time »).

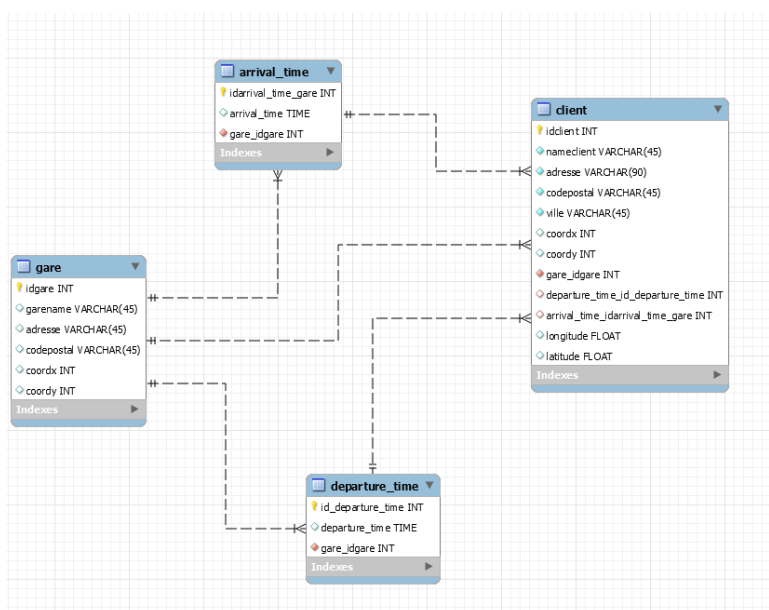


Figure 6.1: Modèle relationnel de données

Ces données communiquent directement avec une librairie Python s'appelant « Django » permettant de créer un cadre de développement web « open-source » . Dans Django, la section « paramètres » contient la configuration de connexion à la base de données MySQL. La section « views » est celle qui nous permet de prendre une requête et de renvoyer une réponse qui sera visualisée dans notre page web, comme celle qui utilise l'algorithme « recherche taboue » pour retourner une table de données qui est ensuite transférée sur une page web présentée ci-dessous.

Dans la table « client », les colonnes prises à partir de la base de données sont les suivantes :

- identifiant du client du système;
- coordonnées géographiques;
- mode d'accès pour se rendre et quitter la gare;
- heure de départ de son domicile pour se rendre à la gare;
- heure d'arrivée à son domicile après avoir quitté la gare;
- gare préférée du client.

6.2 Présentation de l'interface web

Cette section présente l'interface web développée pour visualiser les tournées potentielles de *microtransit* dans le réseau de la clientèle d'Exo.

6.2.1 Page de démarrage

La page web démarre sur une page d'accueil permettant à l'administrateur de choisir d'afficher le tableau de bord pour la liste de client allant à la gare (« client du service matinal ») et ceux rentrant à leur domicile (« client du service en après-midi ») (Figure 3.11). Comme explique ci-dessous, la librairie « Django » nous permet de communiquer avec notre serveur et aussi à l'interface web code en Javascript et HTML.



Figure 6.2 : Interface de démarrage

6.2.2 Interface de confection de tournées

L'étape suivante consiste à modifier les paramètres présents dans le ruban de gauche de l'interface. La première section de ces paramètres représente les caractéristiques du véhicule ; nous avons la taille du véhicule, la taille de la flotte et aussi la vitesse moyenne pour déterminer la valeur temporelle. La seconde section permet de décrire la fenêtre temporelle. En effet, nous avons besoin de savoir la durée totale du trajet des véhicules et aussi l'intervalle de confiance qu'on se donne entre le temps de trajets dans le mode d'origine et avec le *microtransit*. Dans cette dernière section, nous choisissons la gare et l'heure de départ de l'analyse en format de liste déroulante extrait des tables du serveur MySQL. Après avoir inséré. Ces informations, nous cliquons le bouton bleu « Generate Routing » pour générer la liste des tournées (1). L'algorithme défini dans la section ci-dessous se lance et ressort la solution finale.

Comme nous le voyons dans la figure 3.11, le tableau de bord est séparé en quatre sections distinctes. La première représente les indicateurs de performances choisis pour présenter la performance de notre solution (2) ; les quatre indicateurs sont le pourcentage de client servis, le temps moyen de trajets par client, le ratio de compétitivité et le pourcentage de client qui voit leur temps de trajet augmenter par rapport à leur mode de trajet d'origine. La seconde section présente l'emplacement des clients dans la carte de Montréal (3) ; ces clients ont une couleur distincte entre eux par rapport à leur véhicule de *microtransit*. Au-dessus de cette carte, nous trouvons une liste déroulante permettant de spécifier le véhicule que nous voulons voir l'information pour réduire

l'information présente sur la carte. Cette carte provient de la bibliothèque « Mapbox.js ». La troisième section est un histogramme décrivant le temps total de chaque véhicule du service de *microtransit* (4). L'histogramme est lui issu de la bibliothèque « Chart.js ». Pour finir, la dernière section présente les données brutes de la solution optimale ; dans le tableau ci-dessous, nous présentons la description de chacune de ces données.

Tableau 6.1 : Tableau explicatif des colonnes des données de l'interface

Colonne	Description
Id	Identifiant du client.
Latitude / Longitude	Coordonnée de localisation du domicile du client.
Gare	Numéro de la gare sélectionnée pour le client.
Or_arrival_time	Heure d'arrivée en utilisant le véhicule personnel.
Pickup_time / Dropout_time	Heure du pickup pour les clients utilisant le service pour se rendre à la gare et dropout pour ceux se rendant à leur domicile.
Aft_arrival_time / Depart_time	Heure d'arrivée à la gare pour les personnes se rendant et l'heure du départ à la gare pour ceux qui la quittent.
isRouted	Si ce client est servi par notre tournée de véhicule.
Veh_no	Le numéro du véhicule assigné au client.
pos	La position du client dans la tournée de ce véhicule.

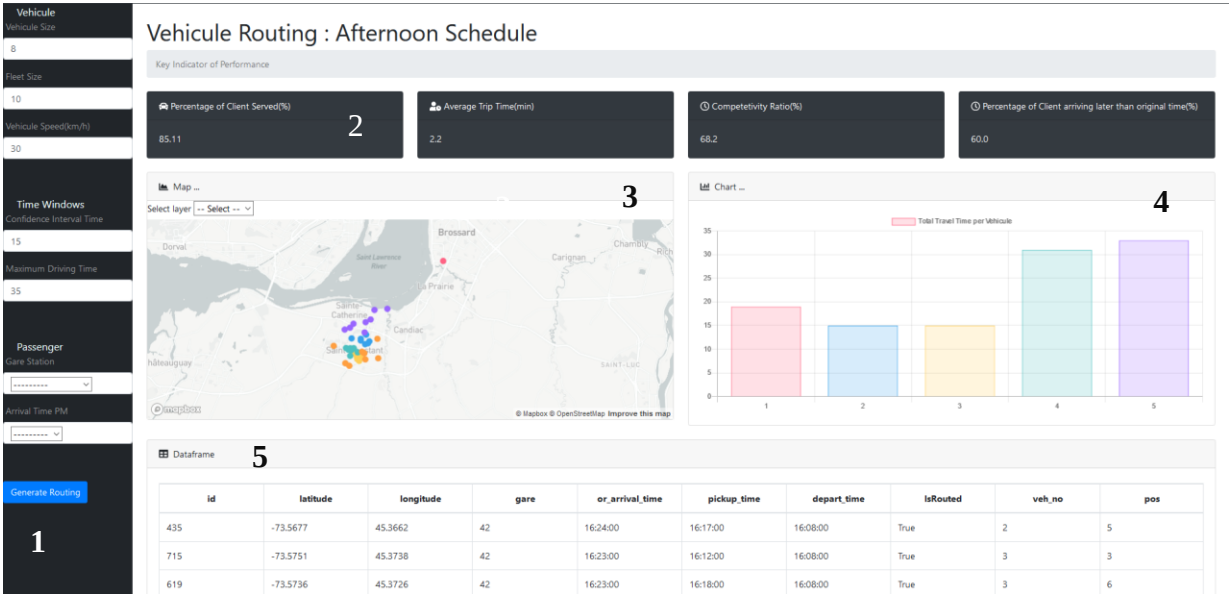


Figure 6.3 : Tableau de bord

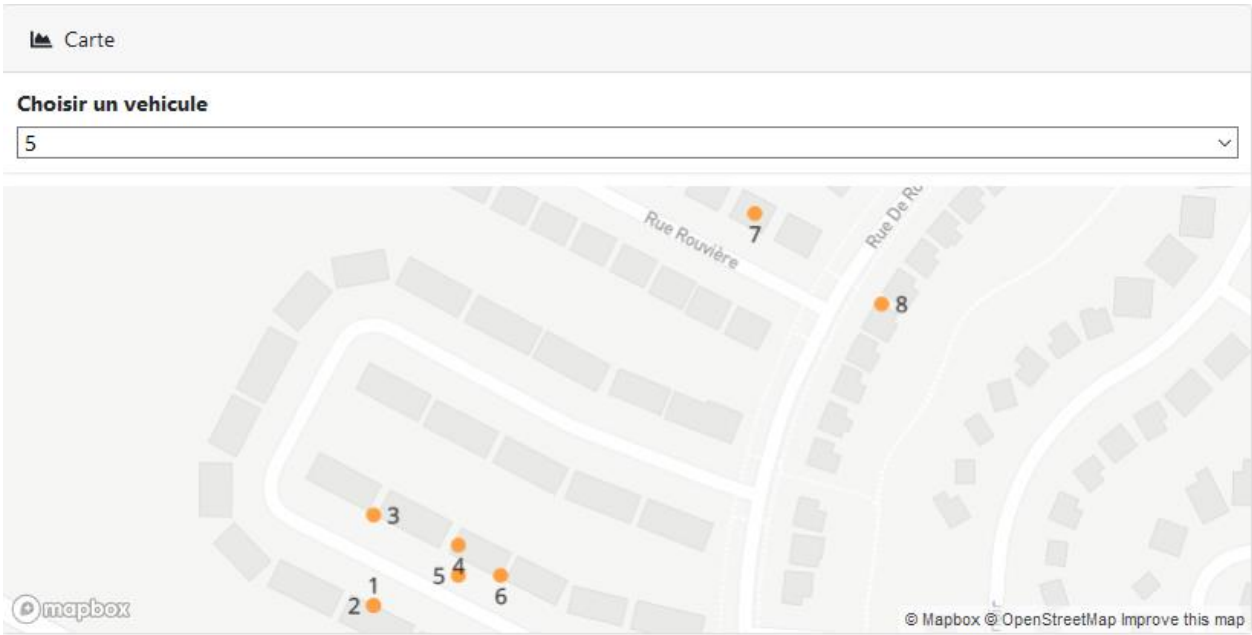


Figure 6.4 : Cartographie de la tournée du 5^e véhicule de la gare Sainte-Catherine pour le départ de 16h43

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Pour répondre au besoin d'un exploitant de transport en commun et dans le cadre du projet de modélisation et d'analyse du comportement spatiotemporel des usagers, l'objectif de ce mémoire était d'analyser le potentiel de microtransit pour les déplacements du premier/dernier kilomètre de la clientèle attachée aux stations de train de banlieue.

7.1 Synthèse des résultats

La revue de littérature, séparée en quatre sections, a permis de montrer les composantes nécessaires à l'élaboration de la méthodologie et des hypothèses poussant l'analyse des résultats. Nous y retrouvons d'une part les travaux portant sur la problématique du *microtransit* et d'autre part les problèmes du type « premier et dernier kilomètre ». Ensuite, nous avons identifié les différentes applications mathématiques de ces problèmes de transport.

La méthodologie a présenté l'élaboration de notre solution finale; nous y retrouvons la modélisation mathématique de notre problème d'optimisation et aussi l'algorithme créé pour ce problème de desserte. En effet, pour ce projet, nous nous sommes inspirés d'une métaheuristique de recherche taboue pour fabriquer nos tournées.

Ces tournées sont ensuite analysées au travers d'indicateurs de performances :

- ratio de compétitivité;
- taux de client servis;
- nombre de clients quittant plus tôt de leur domicile (ou arrivant plus tard à leur domicile);
- utilisation de la capacité des véhicules.

La première analyse de notre mémoire a été réalisée sur les données brutes. En effet, des données d'enquête origine/destination nous ont permis de connaître les habitudes de déplacement de la clientèle; ces données ont alors été étudiées pour émettre des hypothèses sur le comportement des usagers autour des stations de train. Ensuite, nous avons expérimenté notre algorithme sur la base de données des clients. Pour ce faire, nous avons débuté par une étude de l'impact des différentes sections de la fonction objective qui nous permet de comprendre l'importance de complexifier

celle-ci en y ajoutant, par exemple, une pénalité sur le départ plus tôt que son départ d'origine d'un usager pour se rendre à la gare.

La seconde analyse s'est faite sur le nombre optimal d'itérations pour arriver aux tournées optimales. Notre solution optant pour une métaheuristique s'arrête après un nombre donné d'itérations, qui, pour un souci de vitesse de traitement, est nécessaire à être optimisé : nous notons que la majorité des améliorations se déroulent lors des 100 premières itérations. Ensuite, la troisième analyse correspondait au plan d'expérience sur la taille de la flotte et la taille du véhicule. Nous avons étudié certains indicateurs de performances dans chaque type de tournée avec une flotte et une taille de véhicule différentes. Nous avons conclu cette section sur une taille de véhicule de 8 places avec une flotte entre 5 et 8 véhicules. La quatrième analyse consistait à automatiser le choix de la gare pour chaque usager. Ce choix a été fait en fonction de la proximité du client vis-à-vis les gares et aussi l'hypothèse qu'un client ne pouvant pas être desservi par son premier choix de gare peut toutefois rentrer dans une tournée de la seconde gare la plus proche de ses coordonnées. Nous remarquons une amélioration de la solution finale dans le cas des gares Saint-Constant et Sainte-Catherine. Enfin, la cinquième analyse a été reliée au choix du mode de trajet initial de l'usager. En effet, cette stratégie visait à se focaliser sur l'objectif de réduire le taux de remplissage du stationnement gratuit autour des gares. Nous remarquons une amélioration nette des tournées du matin concernant les clients utilisant leur véhicule pour se rendre à la gare; ainsi que l'implantation de cette contrainte est intéressante le matin.

Pour finir, nous avons créé une interface permettant aux gestionnaires d'Exo de les assister dans leur prise de décision pour l'implantation du service de *microtransit*. Cet outil offre la possibilité de choisir un temps de trajet, une taille de flotte, une taille de véhicule et se sélectionner les clients visés pour arriver à générer des tournées de véhicule. Ensuite, ces tournée sont analysées selon les mêmes indicateurs de performances présentés ci-dessus et des graphiques, comme l'histogramme des temps de trajets de chaque véhicules . Le gestionnaire peut aussi visualiser, à l'aide d'une carte, la tournée de chaque véhicule.

7.2 Limitation et perspectives

Ce mémoire a permis à l'entreprise de visualiser le potentiel de microtransit à travers leurs usagers utilisant leur service pour se rendre à leur gare respectifs. À travers cette étude, Exo peut envisager plusieurs pistes d'améliorations. En effet, il est important de noter que l'outil est un aide à la décision et nécessite une vérification plus pointue, principalement due aux temps de trajet qui peuvent connaître une grande variation due à la congestion. Nous recommandons à l'entreprise de rester prudente face aux gains opérationnels potentiels annoncés dans ce mémoire. L'implantation d'une ou plusieurs nouvelles stratégies peut engendrer des coûts de mise en place et de fonctionnement qui ne sont pas évalués dans cette étude, comme le coût d'achat ou de location des véhicules, et les frais de gestion de tels services. Il est donc nécessaire de faire une étude approfondie sur les coûts relatifs présents dans la fonction objectif, comme la pénalité reliée au sentiment d'avance ou de retard vis-à-vis le trajet initial de chaque client. Nous pourrions y ajouter une liste quantifiant les voisinages trop visités et les pénaliser pour permettre à l'algorithme de visiter les autres régions.

Ensuite, cet algorithme a un temps de calcul brut équivalent en moyenne à 10 minutes pour une liste de 150 clients, avec 100 itérations et en comptant le chargement de données. Pour minimiser le temps de calcul, nous avons déjà mis en place le code permettant de répartir le calcul sur les différents cœurs du processeur (4 dans notre situation) et il serait intéressant d'utiliser un ordinateur plus puissant ou de réécrire le programme dans un langage de programmation non scripté tel que C++ .

En définitive, l'outil et les différentes stratégies présentées offrent un moyen d'analyser et d'explorer le potentiel dans le cadre de l'implémentation du *microtransit* dans la clientèle d'Exo. Les différentes perspectives d'amélioration sont nécessaires pour arriver à un outil représentatif de ce potentiel.

RÉFÉRENCES

- Bista, S., et al. (2020). "A content analysis of transportation planning documents in Toronto and Montreal." *Case Studies on Transport Policy*.
- Braekers, K., et al. (2016). "The vehicle routing problem: State of the art classification and review." *Computers & Industrial Engineering* 99: 300-313.
- Bräysy, O. and M. Gendreau (2002). "Tabu Search heuristics for the Vehicle Routing Problem with Time Windows." *Top* 10(2): 211-237.
- Bräysy, O. and M. Gendreau (2005). "Vehicle Routing Problem with Time Windows, Part I: Route Construction and Local Search Algorithms." *Transportation Science* 39(1): 104-118.
- Buenk, et al. (2019). "A Framework for the Sustainability Assessment of (Micro)transit Systems." *Sustainability* 11(21).
- Carbone, T. A. F. C. (2016). "Microtransit: An assessment of potential to drive greenhouse gas reductions."
- Chen, Y. and H. Wang (2018). "Pricing for a Last-Mile Transportation System." *Transportation Research Part B: Methodological* 107: 57-69.
- Chen, Y., and H. Wang (2018). "Pricing for a Last-Mile Transportation System." *Transportation Research Part B: Methodological* 107: 57-69.
- CRE-Montreal (2017). Etude sur le microtransit pour le rabattement au réseau de transport collectif régional.
- Desaulniers, G., et al. Chapter 5: The Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Vehicle Routing*: 119-159.
- Gendreau, M., et al. (2008). Metaheuristics for the Vehicle Routing Problem and Its Extensions: A Categorized Bibliography. *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*. B. Golden, S. Raghavan and E. Wasil. Boston, MA, Springer US: 143-169.
- Givoni, M. and P. Rietveld (2007). "The access journey to the railway station and its role in passengers' satisfaction with rail travel." *Transport Policy* 14(5): 357-365.

- Givoni, M. and P. Rietveld (2007). "The access journey to the railway station and its role in passengers' satisfaction with rail travel." *Transport Policy* 14(5): 357-365.
- Greenblatt, J. B. and S. Saxena (2015). "Autonomous taxis could greatly reduce greenhouse-gas emissions of US light-duty vehicles." *Nature Climate Change* 5(9): 860-863.
- Hamari, J., et al. (2016). "The sharing economy: Why people participate in collaborative consumption." *Journal of the Association for Information Science and Technology* 67(9): 2047-2059.
- Hickman, R. (2011). *Transport for Suburbia: Beyond the Automobile Age*, Paul Mees. Earthscan, London (2010). £ 37.95, ISBN: 978-1-84407-740-3 (hbk), Pergamon.
- Hickman, R., et al. (2013). "Planning more for sustainable mobility." *Journal of Transport Geography* 33: 210-219.
- Laporte, G., et al. (2000). "Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem." *International Transactions in Operational Research* 7(4-5): 285-300.
- Liang, X., et al. (2016). "Optimizing the service area and trip selection of an electric automated taxi system used for the last mile of train trips." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 93: 115-129.
- Murphy, S. F. and Colin (2016). *Shared Mobility and the Transformation of Public Transit*.
- Qi, M.-y., et al. (2008). A new Tabu Search heuristic algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. 2008 International Conference on Management Science and Engineering 15th Annual Conference Proceedings: 1648-1653.
- Scheltes, A. and G. H. de Almeida Correia (2017). "Exploring the use of automated vehicles as last mile connection of train trips through an agent-based simulation model: An application to Delft, Netherlands." *International Journal of Transportation Science and Technology* 6(1): 28-41.
- Sessa, C., et al. (2015). "Results on the on-line DELPHI survey." CityMobil2, <http://www.citymobil2.eu/en/upload/Deliverables/PU D 27>.
- Shaheen, S. and A. Cohen (2018). "Shared ride services in North America: definitions, impacts, and the future of pooling." *Transport Reviews* 39(4): 427-442.

Shaheen, S., et al. (2020). Sharing strategies: carsharing, shared micromobility (bikesharing and scooter sharing), transportation network companies, microtransit, and other innovative mobility modes. *Transportation, Land Use, and Environmental Planning*: 237-262.

Shaheen, S. A., et al. (2016). Smartphone applications to influence travel choices: practices and policies, United States. Federal Highway Administration.

Taillard, É., et al. (1997). "A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows." *Transportation Science* 31(2): 170-186.

Tilahun, N., et al. (2016). "Transit use and the work commute: Analyzing the role of last mile issues." *Journal of Transport Geography* 54: 359-368.

Venter, C. J. (2020). "Measuring the quality of the first/last mile connection to public transport." *Research in Transportation Economics* 83.

Yap, M. D., et al. (2016). "Preferences of travellers for using automated vehicles as last mile public transport of multimodal train trips." *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 94: 1-16.

Zellner, M., et al. (2016). "Overcoming the Last-Mile Problem with Transportation and Land-Use Improvements: An Agent-Based Approach." *International Journal of Transportation* 4(1): 1-26.

ANNEXE

Annexe A : Figure et tableaux reliés au chapitre 4 : Analyse des données

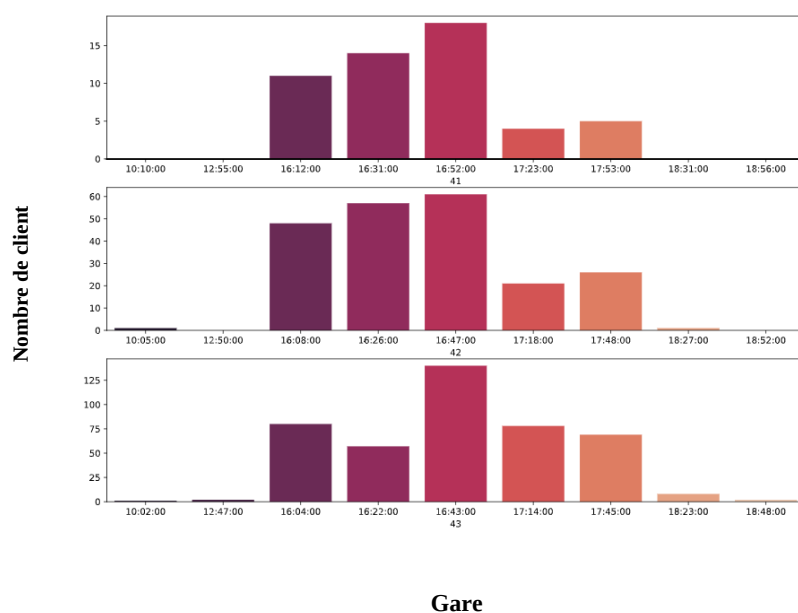


Figure A 1 : Histogramme représentant la liste des clients des gares pour les départ quittant la gare (Gare Sainte-Catherine/ Gare Saint-Constant / Gare Delson)

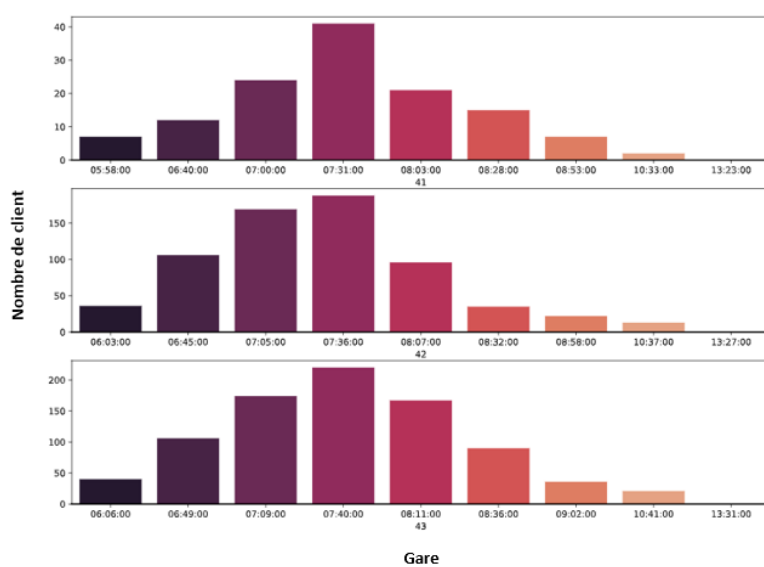


Figure A 2: Histogramme représentant la liste des clients des gares pour les départs allant à la gare(Gare Sainte-Catherine/ Gare Saint-Constant / Gare Delson)

Distribution	Alpha	Beta	Gamma	Mu	Sigma	Lambda	AICc	BIC	AD
Gamma_3P	14.613667	0.618703	0.9999				4208.80579	4222.318653	36.771648
Weibull_3P	8.396892	0.80128	0.9999				4287.20924	4300.722102	31.950141
Exponential_2P			0.999			0.11059	4333.02293	4342.037488	20.440106
Weibull_2P	10.988481	1.378135					4381.80718	4342.037488	6.987547
Gamma_2P	6.175873	1.625911					4391.05635	4390.821734	7.173832
Lognormal_2P				1.968708	0.91069		4457.63199	4466.646547	12.129757
Lognormal_3P			0	1.968708	0.91069		4459.64988	4466.646547	12.129757
Exponential_1P						0.0998588	4472.68942	4477.199673	16.638125
Loglogistic_2P	7.658197	1.862983					4495.21074	4504.22529	11.194645
Normal_2P				10.04142	7.159927		4583.83446	4592.849018	16.922977
Loglogistic_3P	5.836619	0.948104	0.9999				4596.311	4609.823865	45.440152

Figure A 3 : Tableau représentatif des variables pour chaque distribution analysée

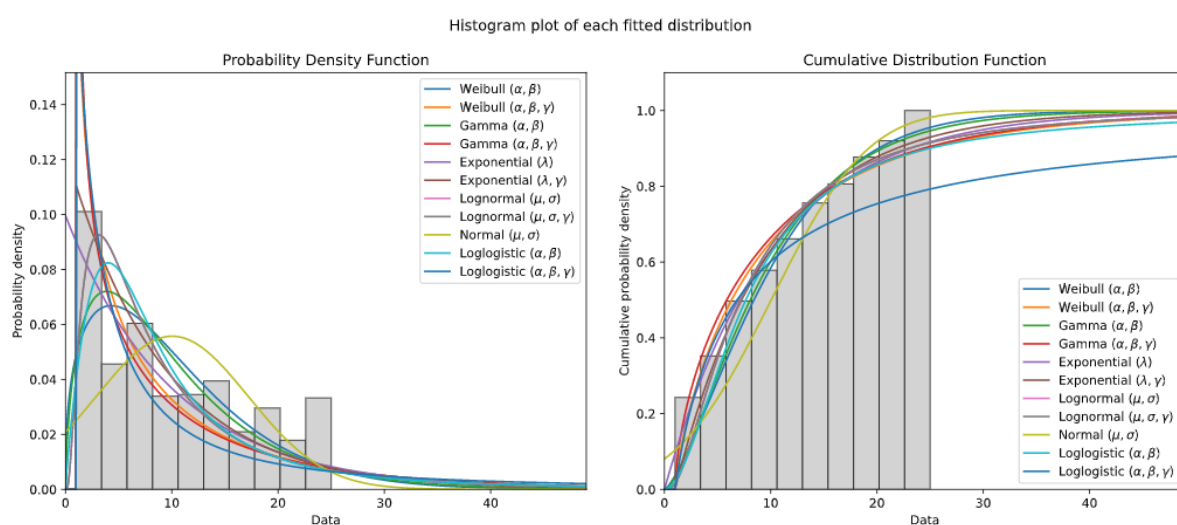


Figure A 4 : Histogramme et Graphique de chaque distributions

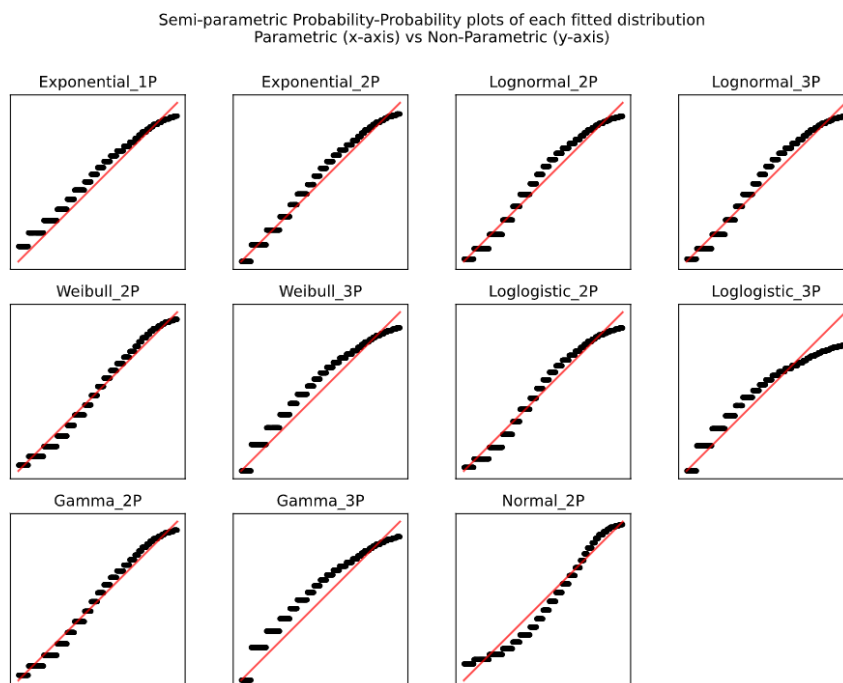


Figure A 5 : Graphique de probabilité de chaque distribution ajustée

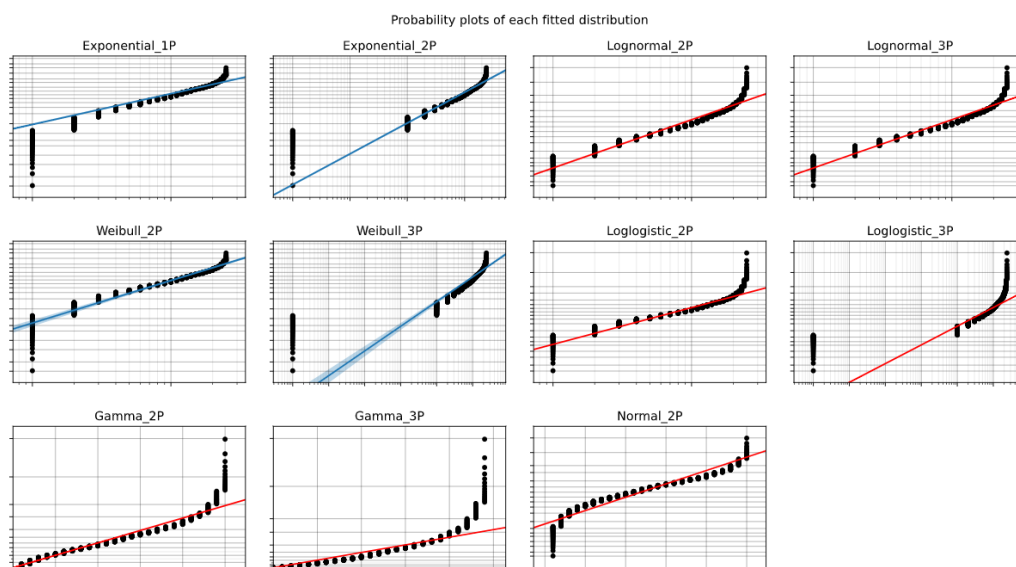


Figure A 6 : Graphique de probabilité de chaque distribution ajustée(2)

Annexe B : Figure et tableaux reliés au chapitre 5 : Expérimentation et Résultats

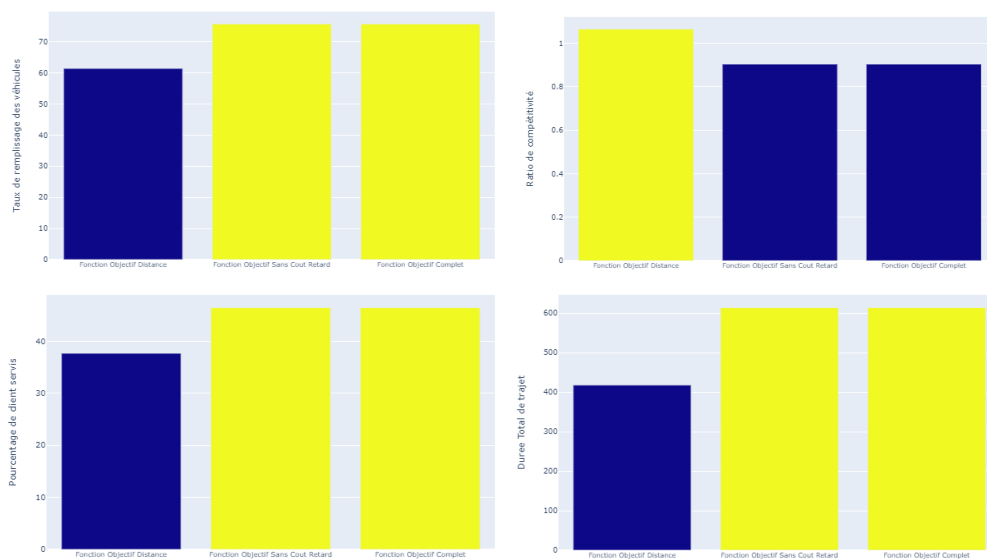


Figure B 1 : Histogramme présentant les indicateurs de performances dans l'analyse des sections de la fonction objective pour la gare Delson pour le départ de 07h31

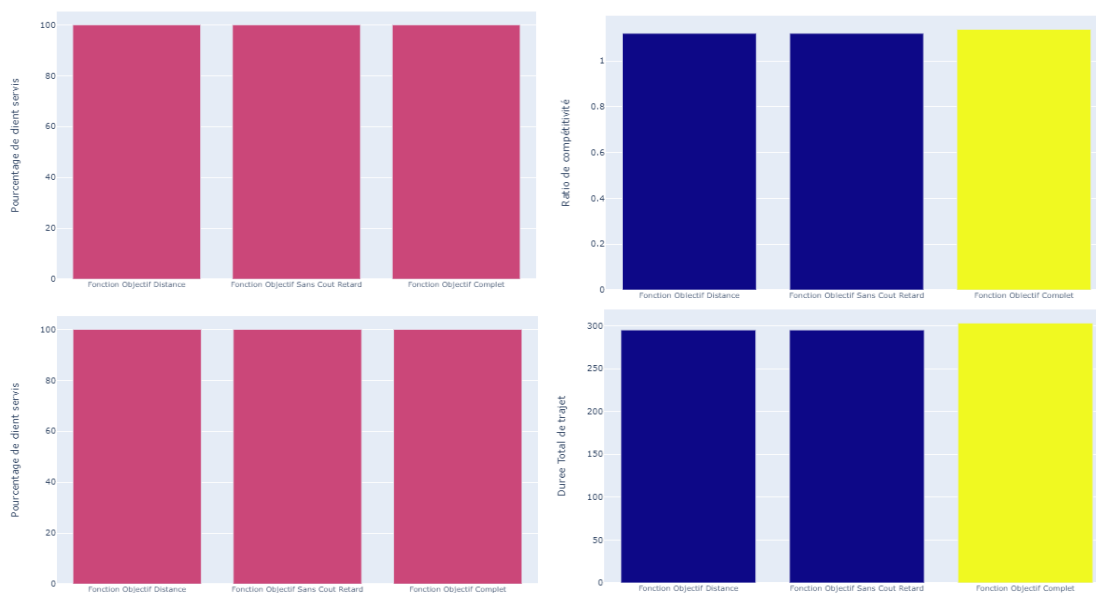


Figure B 2 : Histogramme présentant les indicateurs de performances dans l'analyse des sections de la fonction objective pour la gare Saint-Constant pour le départ de 6h45

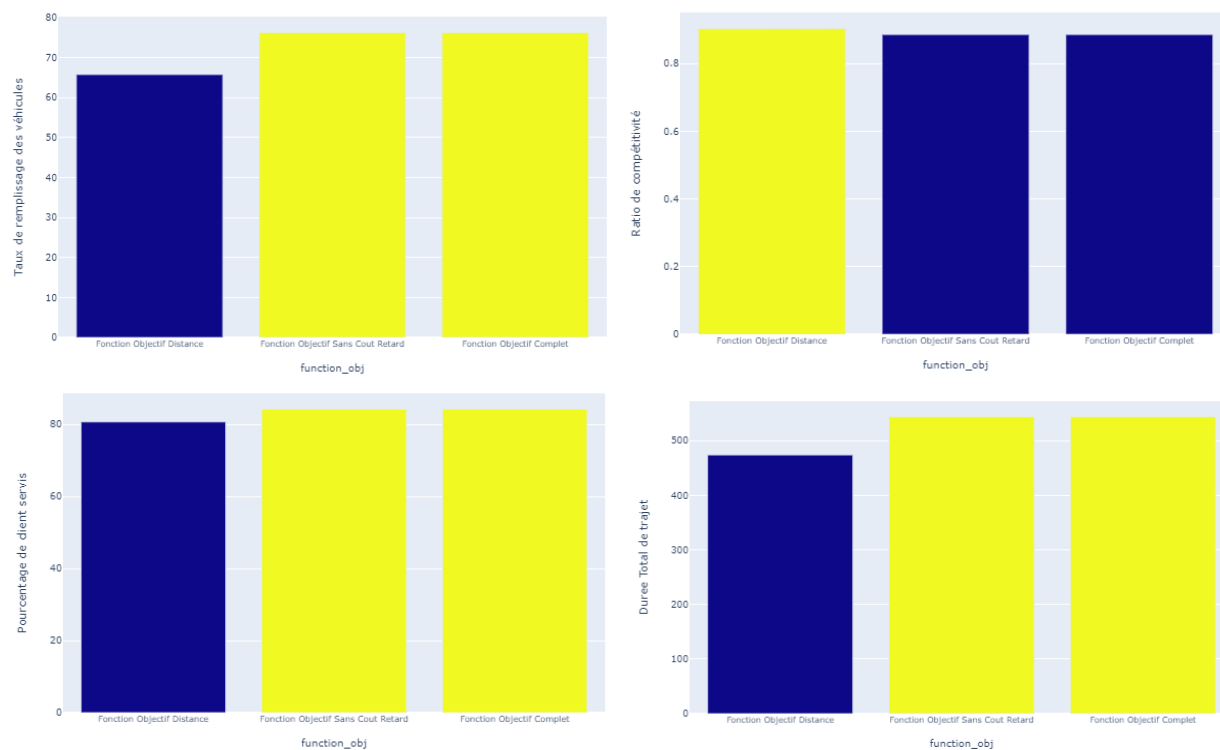


Figure B 3 : Histogramme présentant les indicateurs de performances dans l'analyse des sections de la fonction objective pour la gare Saint-Constant pour le départ de 16H05