

Titre: Conception d'un réseau de transport en commun pour le transport des patients sur l'Île-de-Montréal
Title: [Conception d'un réseau de transport en commun pour le transport des patients sur l'Île-de-Montréal](#)

Auteur: Anne-Laurence Thoux
Author: [Anne-Laurence Thoux](#)

Date: 2017

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Thoux, A.-L. (2017). Conception d'un réseau de transport en commun pour le transport des patients sur l'Île-de-Montréal [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/2896/>
Citation: [Thoux, A.-L. \(2017\). Conception d'un réseau de transport en commun pour le transport des patients sur l'Île-de-Montréal \[Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal\]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/2896/](#)

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/2896/>
PolyPublie URL: [https://publications.polymtl.ca/2896/](#)

Directeurs de recherche: Louis-Martin Rousseau, & Nadia Lahrichi
Advisors: [Louis-Martin Rousseau](#), [Nadia Lahrichi](#)

Programme: Maîtrise recherche en génie industriel
Program: [Maîtrise recherche en génie industriel](#)

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CONCEPTION D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT EN COMMUN POUR LE
TRANSPORT DES PATIENTS SUR L'ILE-DE-MONTRÉAL

ANNE-LAURENCE THOUX
DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUE ET DE GÉNIE INDUSTRIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INDUSTRIEL)
DÉCEMBRE 2017

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

CONCEPTION D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT EN COMMUN POUR LE
TRANSPORT DES PATIENTS SUR L'ILE-DE-MONTRÉAL

présenté par : THOUX Anne-Laurence

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. TRÉPANIER Martin, Ph. D., président

M. ROUSSEAU Louis Martin, Ph. D., membre et directeur de recherche

Mme LAHRICHI Nadia, Ph. D., membre et codirectrice de recherche

M. GAMACHE Michel, Ph. D., membre

DÉDICACE

A ma famille,

*A tous mes amis rencontrés pendant ces deux belles années et demi,
parce que le monde appartient à ceux qui se lèvent tôt, mais que quelquefois
nous nous sommes couchés tard . . .*

REMERCIEMENTS

Je remercie l'Ecole des mines d'Alès, pour les partenariats qu'elle a su développer et conserver, car ils nous permettent de grandir encore. L'expérience d'une formation à l'étranger est réellement formatrice, tant personnellement que professionnellement. Je remercie particulièrement mon Directeur de département Pierre Runtz, qui a cru en mon projet et a convaincu la Direction des Etudes de me laisser présenter un dossier à l'Ecole Polytechnique de Montréal.

Je remercie mes directeurs de recherche Louis-Martin Rousseau et Nadia Lahrichi de m'avoir confié un projet de recherche. Je les remercie pour leur accompagnement au cours de ces deux années et pour les opportunités qu'ils m'ont offertes.

Je remercie les CIUSSSs de l'Ile-de-Montréal avec qui nous avons travaillé sur ce projet. Je remercie en particulier Monique Périé et Martine Dagenais, avec qui j'étais plus en lien tout au long du projet. Votre organisation, votre disponibilité et votre réactivité nous ont aidées dans notre gestion de projet. Merci aussi à toutes les personnes que nous avons rencontrées sur le terrain. Sans votre accueil et vos patientes explications, nous n'aurions pas pu réaliser tout ceci.

Je voudrais aussi saluer la disponibilité et la générosité de Khalid Laaziri, et son aide précieuse lors des lancements de mes tests sur la grille de calculs du laboratoire.

Je remercie mes parents de m'avoir soutenue dans mon projet de poursuivre mes études à Montréal. Je vous remercie pour votre disponibilité sans faille, même à 6 000kms, et de vous être pliés aux contraintes inhérentes à mon projet, qui ont pesé sur vous par extension.

Un grand merci à tous mes amis, pour votre fidélité, votre compréhension et vos encouragements lorsque ma maîtrise m'a gardée loin de vous. Vous m'êtes précieux. Merci aussi à vous tous, mes colocataires de bureau, pour l'ambiance qui a régné dans notre groupe. Votre accueil et votre amitié ont été importants pour moi. Eva et Elisa, j'ai vraiment apprécié travailler avec vous sur ce projet. Je vous remercie pour l'équipe que nous avons formée et pour nos partages qui ont poussé plus loin ce projet.

Je remercie enfin mon amie Diane, sans qui je n'aurais peut-être pas vécu cette expérience.

RÉSUMÉ

La loi 10 a souhaité une nouvelle organisation du système de soins de santé québécois. Elle a engendré en avril 2015 la création de Centres Intégrés (Universitaires) de Santé et de Services Sociaux (CI(U)SSS). Dans ce contexte de centralisation des établissements de santé québécois, nous avons conduit une étude de terrain de l'organisation du transport non urgent des patients entre les établissements de quatre CIUSSSs sur l'Île-de-Montréal. Cette étude a révélé que ce type de transport, qui représente un enjeu financier et organisationnel important pour les CIUSSSs, peut être optimisé. En effet, ces établissements de santé ont longtemps fonctionné individuellement. Malgré la centralisation administrative effective, la prise de décision concernant l'organisation du transport externe non urgent des patients est encore visualisée à l'échelle de chaque établissement, voire au niveau de chaque unité. Les processus suivis peuvent ainsi varier d'une unité à l'autre d'un même établissement, même si la plupart des problématiques et moyens de transport utilisés sont partagés.

Les déplacements actuellement réalisés par les patients de ces CIUSSSs peuvent présenter une certaine régularité, parce qu'ils concernent des traitements réguliers ou des activités mis en place dans l'objectif d'aider les personnes à vivre chez elles autonomes le plus longtemps possible. De plus, l'existence de corridors de service entre certains établissements peut augmenter la fréquence de certains trajets. Homogénéiser l'organisation actuelle du transport externe non urgent des patients pour la centraliser pourrait donc permettre de réduire la part importante du budget qui lui est accordée et d'augmenter la qualité du service proposé aux patients.

Suite à ces observations et connaissant les perspectives d'évolution de la population traitée par le système de soins de santé, nous nous sommes demandé si organiser le transport non urgent des patients de ces CIUSSSs à l'aide d'un réseau de transport en commun serait possible et rentable. Un tel réseau devrait être adapté à la condition physique des patients. Majoritairement à mobilité réduite, ils se déplacent en fauteuils roulants et ne peuvent ni circuler pour rejoindre un arrêt du réseau ni subir un transfert de ligne sur leur trajet. La configuration actuelle des véhicules est telle que les routes dessinées devront aussi permettre de servir la demande en respectant la contrainte de Last-In-First-Out (LIFO), que nous introduisons en conception de réseau.

La demande actuelle étant très peu dense, nous avons défini un réseau de transport adapté construit zone par zone. Dans chaque zone géographique construite à l'aide d'un double partitionnement des demandes de transport basé sur la densité, nous avons construit des

réseaux à deux niveaux. Nous avons d'abord tracé des routes permettant de servir la partie la plus régulière de la demande. Nous avons ensuite autorisé une certaine déviation des routes dessinées pour affecter les patients aux routes du réseau.

Au cours des observations terrain qui ont permis de statuer les hypothèses du problème, nous avons constitué et analysé une base de données qui représente les demandes de transports apparues sur une période de vingt-cinq semaines entre avril et septembre 2016. Les tests réalisés à partir de ces demandes ont permis d'apprécier l'influence des paramètres choisis pour le partitionnement de la demande sur les réseaux obtenus et leur réponse quotidienne à la demande. Les résultats montrent que, dans l'organisation actuelle de la demande, l'association de la contrainte de LIFO et de l'interdiction du transfert de ligne est trop forte pour construire un réseau de transport en commun réaliste et financièrement rentable. Les réseaux construits offrent néanmoins une bonne qualité de transport aux patients. Les routes dessinées par la méthode que nous avons choisie permettent aussi de conclure que considérer l'organisation du transport externe non urgent des patients à l'échelle de l'Ile-de-Montréal sous la forme d'un transport à la demande est prometteuse.

ABSTRACT

In 2015, the 10th law caused a overhaul of the health care system of Quebec. As an example, the health care facilities were consolidated into regional centers called *Centres Intégrés (Universitaires) de Santé et de Services Sociaux (CI(U)SSS)*. In this context, we have led a field study regarding the organization of the external non-emergency patient transport services between the facilities of four CIUSSSs in Montreal. This survey raised that the organization of external non-emergency patient transport services, which is a major issue at both financial and organizational points of view, can be improved. As a matter of fact, the facilities have been operating on their own for long. Then, despite the consolidation of administrative service is effective, the decision-making concerning the transportation of patients is still processed at the level of each facility, or even separately in the the care units of one place. Those process can then vary from one place to another, even though the means of transport used and the problems faced are common.

The demands of transport from the patients of these CIUSSSs can currently occur on a regular basis, since they are raised by regular treatments or activities aimed at making them be able to live at home independently as long as they can. Furthermore, service corridors exist between several health care centers that can increase some trips frequency. In view of this, standardizing the existing organization of the external non-emergency transportation of patients could help reducing the major part of the budget currently dedicated to this field, and to improve the quality of the service offered to the patients.

Considering this and the expected evolution of the patient population, we wondered if a transit network could profitably and suitably be designed to answer the demand of transportation in these CIUSSSs. Such a network should be adapted to the physical and psychological conditions of the patients. Most of them are persons with reduced mobility, then move in wheelchairs and can neither join a stop of the network nor accept any transfer between lines during their travel. Presently, the configuration of the vehicles enforce a Last-In-First-Out (LIFO) constraint, which we introduce in network design.

Presently, the demand of transport is really sparse. We then decided to build our network per zone. In each geographical zone defined by a two-level density clustering of the demands, we designed two-level networks. First, we drew routes aimed at answering the most regular demands. Second, we allowed a certain deviation of these routes for the network to serve more demands.

Throughout the field study aimed at defining the problem, we gathered a data basis which

reflects the transportation demands that occurred over a period of twenty-five weeks between April and September 2016. The experiments allowed us to assess how the parameters chosen influence the network designed and their ability to respond to the daily demand for transports. The results show that under the current organization of the demands of transport, adding the LIFO constraint and avoiding every transfer between lines makes difficult, if not impossible, the design of a realistic and profitable network. Nevertheless, the networks designed offer a very good quality service to the patients. From the routes drawn by the method we have chosen, we can also conclude that considering the organization of the external non-emergency transportation of patients at the level of a whole region as a demand-responsive transport problem could show promise.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xii
LISTE DES FIGURES	xiii
LISTE DES ALGORITHMES	xv
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xvi
LISTE DES ANNEXES	xviii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 CONTEXTE ET DÉFINITION DU PROBLÈME : LA RÉDUCTION DES COÛTS DE TRANSPORT EXTERNE NON URGENT POUR QUATRE CIUSSS DE L'ÎLE-DE-MONTRÉAL	5
2.1 Organisation actuelle du transport externe non urgent des patients	6
2.1.1 Caractérisation des déplacements des patients	6
2.1.2 Moyens de transport disponibles	7
2.1.3 Planification et coûts des déplacements des patients	8
2.2 Définition du problème	9
2.2.1 Accompagnement des patients	10
2.2.2 Matériel utilisé lors des transports et type de charge de la demande .	10
2.2.3 Horaires des rendez-vous	11
2.2.4 Retard des patients et annulation des demandes	11
2.3 Objectif, hypothèses et contraintes du problème à résoudre	12
CHAPITRE 3 REVUE DE LITTÉRATURE	15

3.1	Le problème de conception d'un réseau de transport public	15
3.2	Les PDP avec contrainte de LIFO	19
3.3	Le partitionnement d'objets (clustering)	22
CHAPITRE 4 MÉTHODE DE RÉSOLUTION		28
4.1	Définitions	29
4.2	Présentation générale de la méthode de construction du réseau et d'affectation de la demande	29
4.3	Phase I : Création du réseau	30
4.3.1	Heuristique de double partitionnement	30
4.3.2	Quelques définitions liées au partitionnement basé sur la densité	32
4.3.3	Paramètres de l'heuristique de double partitionnement	34
4.3.4	Partitionnement hebdomadaire des demandes	35
4.3.5	Partitionnement des groupes de demandes	37
4.3.6	Description des partitions obtenues	38
4.3.7	Création des routes du réseau	40
4.4	Phase II : Affectation des demandes	44
4.4.1	Insertion des demandes dans les routes originelles du réseau	45
4.4.2	Insertion des demandes dans les routes par déviation	47
CHAPITRE 5 EXPÉRIMENTATION ET RÉSULTATS		49
5.1	Cadre de l'étude de cas : la construction d'un réseau de transport adapté	49
5.1.1	Analyse des données et estimations des entrées manquantes	49
5.1.2	Analyse de la base de données constituée	52
5.2	Paramètres généraux fixés en fonction du contexte	63
5.3	Création du réseau basée sur un partitionnement spatial des demandes	65
5.3.1	Paramètres choisis pour le partitionnement hebdomadaire des demandes	65
5.3.2	Paramètres choisis pour le partitionnement des groupes de demandes	69
5.3.3	Création des réseaux	71
5.4	Mesure de la déviation maximale d'une route pour l'étape d'affectation des patients	73
5.5	Calcul des coûts de transport et estimation de l'intérêt d'un réseau	73
5.5.1	Intérêt économiques des réseaux construits	74
5.5.2	Niveau de service proposé aux patients	77
5.5.3	Influence de la proximité des routes	78
5.5.4	Influence de la déviation maximale autorisée des routes d'un réseau pour l'affectation des patients	78

5.5.5	Influence du type de partitionnement sur le réseau construit	80
5.6	Résultats obtenus avec la mesure de partitionnement spatio-temporelle	81
CHAPITRE 6	CONCLUSION	83
RÉFÉRENCES		86
ANNEXES		94

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Caractéristiques des méthodes de clustering	24
Tableau 4.1	Valeurs des paramètres ε et μ dans chaque type de dictionnaire	34
Tableau 4.2	Positions d'insertion possibles pour la destination d'une paire OD en fonction de la position d'insertion de l'origine	41
Tableau 5.1	Statistiques générales de la base de données utilisée	52
Tableau 5.2	Les six nœuds les plus actifs du réseau	58
Tableau 5.3	Caractéristiques du service des transporteurs externes en 2016.	60
Tableau 5.4	Frais de service en transport médical pour le CIUSSS du Nord en 2016	61
Tableau 5.5	Coûts de revient au kilomètre des flottes internes des CIUSSSs	62
Tableau 5.6	Paramètres correspondants aux contraintes du problème	65
Tableau 5.7	Réseaux dessinés selon les paramètres choisis	70
Tableau 5.8	Réseaux dessinés selon les paramètres choisis	72
Tableau B.1	Paramètres utilisés pour le partitionnement hebdomadaire des demandes	102

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Exemples de demandes de transport et leurs représentations	9
Figure 4.1	Etapes de l'heuristique de double partitionnement des demandes de transport	31
Figure 4.2	ε -voisinage, points-cœurs, points frontaliers et bruit dans un ensemble de données	33
Figure 4.3	Niveaux de densité des groupes observables dans un ensemble de données (Ankerst et al., 1999)	33
Figure 4.4	combinaison ODOD (4.3)	36
Figure 4.5	combinaison OODD (4.4)	36
Figure 4.6	Exemple de calcul de la distance entre deux groupes de demandes . .	38
Figure 4.7	Proximité de deux routes dans une zone	44
Figure 4.8	Processus d'affectation d'une demande dans les routes initiales du réseau	46
Figure 4.9	Réseau de deux routes (exemple)	46
Figure 5.1	Répartition des horaires des rendez-vous dont les déplacements sont servis par les compagnies de transport adapté sans et avec support médical dans la journée	50
Figure 5.2	Moyens de transport actuels	53
Figure 5.3	Niveaux de services équivalents	53
Figure 5.4	Répartition de la demande sur les mois	54
Figure 5.5	Saisonnalité hebdomadaire de la demande	55
Figure 5.6	Répartition des horaires de rendez-vous au cours de la journée . . .	56
Figure 5.7	Nombre de demandes répétées au moins sept fois par semaine en moyenne	57
Figure 5.8	Distribution de la distance à vol d'oiseau des trajets (km)	58
Figure 5.9	Types de fauteuils utilisés lors des transports	59
Figure 5.10	Distribution du coût actuel d'un trajet	63
Figure 5.11	Mesure de qualité de la partition en fonction de la part des demandes rejetées dans le bruit (1 ^{ère} approche)	67
Figure 5.12	Coefficient de silhouette des partitions en fonction de la part des demandes rejetées dans le bruit (1 ^{ère} approche)	67
Figure 5.13	Mesure de qualité des partitions en fonction de la part des demandes rejetées dans le bruit (2 ^{nde} approche)	68
Figure 5.14	Coefficient de silhouette des partitions en fonction de la part de la demande rejetée dans le bruit (2 ^{nde} approche)	68

Figure 5.15	Comparaison du coût total de service des réseaux selon la déviation autorisée	74
Figure 5.16	Comparaison de la part de la demande servie par les réseaux	75
Figure 5.17	Comparaison du coût d'un voyage sur les réseaux en fonction de la déviation maximale autorisée	75
Figure 5.18	Comparaison du nombre de patients servis par une route de réseau en fonction de la déviation maximale autorisée	76
Figure 5.19	Comparaison du temps de voyage sur les réseaux en fonction de la déviation maximale autorisée	77
Figure 5.20	Comparaison de l'avance des patients à leur RDV en fonction de la déviation maximale autorisée	78
Figure 5.21	Une route et ses déviations	79
Figure 5.22	Part de la demande servie par les routes des réseaux $Q_{m_{min}30}$ et \bar{s}_{max30}	81
Figure 5.23	Part de la demande servie par les routes des réseaux $Q_{m_{min}60}$ et \bar{s}_{max60}	81
Figure A.1	ε -voisinage, points-cœurs, points frontaliers et bruit dans un ensemble de données	95
Figure A.2	Accessibilité et connectivité par densité d'objets de l'ensemble (Ester et al., 1996)	96
Figure A.3	Diamètre-cœur d'un objet et distance d'accessibilité, dans le cas où $\mu = 4$ (Ankerst et al., 1999)	98

LISTE DES ALGORITHMES

1	Méthode de création du réseau adapté et d'affectation de la demande	30
2	Heuristique de partitionnement à deux niveaux de la demande	31
3	Heuristique de création des routes du réseau	42
4	Fonction d'insertion d'une demande dans le réseau de routes d'une zone	43
5	Pseudo code de l'algorithme OPTICS	99
6	Fonction de mise à jour de la file de voisins	100
7	Fonction de création des groupes d'objets	101

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Sigles et abréviations liées au contexte du projet

CHSLD	Centre d'Hébergement et de Soins Longue Durée
CH	Centre Hospitalier
CIUSSS	Centre Intégré Universitaire de Santé et de Services Sociaux
CJ	Centre de Jour
CR	Centre de Réadaptation
CSI	Centre-Sud-de-l'Île-de-Montréal
CSSS	Centre de Santé et de Services Sociaux
DLL	Dorval-Lachine-LaSalle
EDI	Est-de-l'Île-de-Montréal
FHD	Fauteuil (roulant) Hors Dimension
FR	Fauteuil Roulant
HJ	Hôpital de Jour (HJ DLL : Hôpital de Jour Dorval-Lachine-LaSalle)
IUGM	Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal
NDI	Nord-de-l'Île-de-Montréal
ODI	Ouest-de-l'Île-de-Montréal
PAB	Préposé Au Bénéficiaire
PEC	Prise En Charge
STM Adapté	Société de Transport de Montréal Adapté (Service de transport proposé par la ville de Montréal)

Sigles et abréviations concernant les problèmes d'optimisation et les méthodes de résolution

Les accronymes anglais désignant les problèmes d'optimisation et les méthodes de résolution sont largement répandus dans la littérature, même en français. Par soucis de clarté, nous les préférerons donc à leur version française.

ARL	Affectation - création de routes - localisation
-----	---

AG	Algorithme Génétique
BIRCH	Balanced Iterative Reducing and Clustering using Hierarchies
CIUSSS	Centre Intégré Universitaire de Santé et de Services Sociaux
DBSCAN	Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise
EQM	Erreur Quadratique Moyenne
LAR	Localisation - affectation - création de routes
LIFO	Last In First Out
OD	Origine - Destination (paire OD)
OPTICS	Ordering Points to Identify the Clustering Structure
PDP	Problème de Tournées de Véhicule avec Ramassage et Livraison
VNS	Recherche à voisinage variable

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A	DÉFINITIONS LIÉES AU PARTITIONNEMENT BASÉ SUR LA DENSITÉ ET PSEUDOS-CODES DES ALGORITHMES DBSCAN ET OPTICS	94
ANNEXE B	PARAMÈTRES UTILISÉS POUR LE PARTITIONNEMENT HEBDOMADAIRE DES DEMANDES	102

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

La population des pays développés croît et vieillit. L'organisme *Statistiques Canada* prévoit par exemple que la population canadienne pourrait quasiment doubler d'ici 2061, par le jeu d'une fécondité plus forte et de l'immigration (Statistique-Canada, 2015). La population âgée de plus de 65 ans serait elle aussi plus importante, car l'espérance de vie augmenterait de six ans en moyenne sur cette période. Cette tranche de la population est en général concernée par des plans de traitements réguliers qui ont pour objectif d'aider les personnes à habiter chez elles le plus longtemps possible. Au Québec, les personnes âgées se voient aussi proposer des activités régulières pour lutter contre leur isolement. D'une manière plus générale, les patients pris en charge par le système de santé québécois sont référés aux centres de soins du secteur dont ils dépendent. Chaque centre ne pouvant proposer toutes les spécialités, certains patients doivent être transférés dans un centre d'un autre secteur pour bénéficier des soins requis. Cette évolution de la population laisse donc penser que le volume de patients à prendre en charge est amené à augmenter dans les prochaines années.

Le transport des patients se divise en deux catégories : le transport urgent et le transport non urgent. Le transport urgent concerne tous les déplacements lors desquels le pronostic vital du patient est engagé. Le transport externe non urgent, lui, qualifie le transport de patient entre deux établissements de soins de santé, ou bien entre un établissement de soins de santé et le lieu de résidence du patient, dans le cas où l'état du patient ne requiert pas d'arriver d'urgence à destination. Ces transports sont néanmoins générés par des rendez-vous organisés pour les patients, souvent plusieurs jours, voire plusieurs mois, à l'avance. L'organisation de ce type de transport reste donc soumise à des contraintes temporelles.

Jusqu'à aujourd'hui, les travaux ont majoritairement porté sur le transport urgent des patients, d'un point de vue financier ou médical. Le sujet de la répartition des ambulances dans une ville et de leur affectation des urgences à traiter (Bélanger et al., 2015) ou de la gestion d'un patient victime d'un infarctus du myocarde (en terme de processus médical suivi) sont deux exemples d'axes étudiés pour l'optimisation du transport urgent des patients. Peu après leur création, suite à la loi 10 promulguée en 2015, quatre Centres Intégrés Universitaires de Santé et de Services Sociaux (CIUSSSs) de l'Île-de-Montréal ont pourtant relevé la problématique financière soulevée par le transport non urgent de leurs patients. Ce domaine représente en effet une part importante de leur budget annuel. De plus, cette part du budget qui lui est accordée a fait l'objet de dépassements importants ces dernières années (jusqu'à 50%).

Dans le cadre d'un projet d'optimisation du transport externe non urgent des patients de ces

CIUSSSs, des observations terrain nous ont permis de remarquer que la centralisation des établissements de santé en CIUSSSs n'a pas encore atteint la planification des transports. Les compagnies de transport contactées pour les déplacements des patients sont communes à tous les CIUSSSs, mais les transports sont organisés individuellement par chaque centre, voire par chaque unité de ces centres. Or, aujourd'hui, une part des déplacements non urgents des patients emprunte un nombre de trajets limité. Il s'agit en partie de transports liés à des plans de traitement planifiés sur le long terme comme l'hémodialyse ou à des activités régulières. Cette concentration des trajets parcourus peut aussi s'expliquer par l'existence de corridors de services qui privilégient le transfert de patients de certains établissements vers d'autres. Ces trajets régulièrement suivis et le volume de la demande, analysée à l'échelle d'une ville plutôt que d'un arrondissement, suggèrent une évolution de l'organisation du transport non urgent des patients. La France voit par exemple son activité de covoiturage s'élargir aux déplacements de patients qui s'organisent pour se rendre ensemble à leurs traitements, comme à Sarcelles (Guissé, 2017). Nous pourrions aussi imaginer concevoir un réseau de transport en commun adapté aux besoins des patients.

Ceder and Wilson (1986) ont défini en 1986 le problème de conception de réseau de transport public comme visant à déterminer un ensemble de routes de coût opérationnel minimal qui réponde correctement à la demande de transport des passagers. Un réseau que nous dessinerions pour transporter les patients d'un système de santé doit répondre à son objectif actuel : diminuer les coûts liés au transport des patients tout en conservant une certaine qualité de service. Dans notre contexte, la qualité de service correspond au temps passé à bord du véhicule par le passager. Les déplacements pris en charge par le réseau étant générés par des rendez-vous, nous inclurons aussi dans la qualité de service le temps d'attente du patient à destination avant son rendez-vous. Le réseau conçu doit aussi s'adapter à la demande de transport de patients qui diffère légèrement de celle d'un réseau de transport public. Avant tout, les passagers d'un tel réseau sont des patients. Selon leur condition physique, ces personnes peuvent se déplacer en fauteuil roulant et être accompagnées. La capacité des véhicules est donc fonction de plusieurs types de charges. De plus, la configuration actuelle des véhicules utilisés pour les déplacements des patients est telle que pour débarquer un patient en un lieu, il faut aussi débarquer toutes les personnes installées plus en avant que lui dans le véhicule. Pour assurer un certain confort de transport aux patients, il est donc commun d'appliquer la règle du Last In First Out (LIFO) : à chaque lieu visité, un patient ne peut débarquer que si tous les patients embarqués après lui ont déjà débarqué. Pour les mêmes raisons de condition physique et psychique des patients s'ajoutent les trois contraintes suivantes : les points d'arrêts du réseau sont nécessairement les lieux d'origine et de destination des requêtes de transport servies, aucun transfert de ligne n'est autorisé au cours d'un trajet

et le temps de voyage d'un patient ne peut dépasser une durée imposée. Nous fixerons enfin une durée maximale possible pour les routes tracées, en vue de la construction des horaires des chauffeurs. Une autre spécificité d'un réseau conçu pour le transport des patients d'une ville ou d'une région est que la demande en transport de patients est moins dense et moins importante que celle que doit servir un réseau de transport public classique.

L'objectif de ce mémoire est donc d'étudier la possibilité d'organiser le transport des patients à l'échelle d'une ville au travers d'un réseau de transport en commun adapté, ainsi que son intérêt financier. La faible densité de la demande et la contrainte de LIFO inhérentes au contexte sont des contraintes inhabituellement prises en compte lors de la conception d'un réseau de transport public. Afin de les respecter, nous choisirons de dessiner un réseau composé de routes locales fixes, qui pourront être déviées dans une certaine mesure pour permettre à des demandes moins fréquentes de transiter aussi par le réseau. Un autre enjeu de ce projet de recherche est de bien comprendre le contexte dans lequel pourrait s'implanter un tel réseau de transport, car la qualité du service est primordiale pour les patients. La construction de la méthode, appliquée à un projet d'optimisation du transport des patients sur l'Île-de-Montréal, a été l'occasion de nombreuses rencontres avec le personnel administratif en charge de l'organisation des transports et le personnel soignant des établissements. Les informations que nous avons pu recueillir ont été précieuses pour la création de la méthode de dessin des routes.

La méthode de conception de réseau choisie s'attache dans un premier temps à dessiner les routes du réseau. Elle s'appuie pour cela sur un partitionnement à deux niveaux de la demande de transport. Dans chaque groupe de la partition obtenue à l'issue du second niveau de partitionnement, nous traçons ensuite des routes respectant les contraintes du problème à l'aide d'une heuristique. Dans un second temps, l'affectation des patients aux routes permet d'évaluer la réponse du réseau à la demande. Nous autorisons dans cette étape un certain degré de déviation des routes. Par construction, la résolution de l'affectation des patients permet aussi de déterminer les fréquences de parcours des routes et le calcul des horaires de passage des véhicules à chaque arrêt du réseau.

Pour réaliser nos tests, nous avons constitué une base de données formulant les demandes de transports représentatives de vingt-cinq semaines. Ces tests nous ont permis d'apprécier l'influence des paramètres choisis pour le partitionnement de la demande sur les réseaux obtenus et leurs réponses quotidiennes à la demande. Les résultats démontrent que l'association de la contrainte de LIFO et de l'interdiction du transfert des patients entre deux routes est trop forte pour construire un réseau de transport en commun réaliste. Les réseaux dessinés comportent trop de routes, qui sont généralement déviées lors de l'affectation des patients.

La réponse des réseaux construits à la demande suggère aussi que la méthode de création des routes présente aussi la faiblesse de dessiner des routes trop longues qui ne sont parcourues que très partiellement. Si les réseaux construits offrent une très bonne qualité de voyage aux patients, ils sont en conséquence trop coûteux à l'utilisation. Considérer la demande à l'échelle de l'Ile-de-Montréal plutôt qu'à l'échelle des établissements ou des CIUSSSs paraît ainsi une démarche intéressante, mais plus dans l'optique d'un système de transport à la demande que d'un fonctionnement en réseau de transport en commun.

Dans un souci de clarté, nous présentons le contexte du projet que nous avons mené et définissons le problème que nous avons cherché à résoudre dans le chapitre suivant (2). Afin d'englober les différents aspects du problème, nous avons développé notre revue de littérature selon plusieurs axes. Nous les reportons dans le chapitre 3. Nous décrivons la méthode de résolution adoptée dans le chapitre 4. Le chapitre 5 situe le contexte de l'application de cette méthode et les paramètres fixés lors des tests. Les résultats obtenus y font ensuite l'objet d'une analyse. Nous conclurons ce projet dans le chapitre 6.

CHAPITRE 2 CONTEXTE ET DÉFINITION DU PROBLÈME : LA RÉDUCTION DES COÛTS DE TRANSPORT EXTERNE NON URGENT POUR QUATRE CIUSSS DE L'ÎLE-DE-MONTRÉAL

En avril 2015, la loi 10 a imposé un regroupement des établissements de santé du Québec. Les CIUSSSs Centre-Sud-de-l'Ile-de-Montréal (CSI), Est-de-l'Ile-de-Montréal (EDI), Ouest-de-l'Ile-de-Montréal (ODI) et Nord-de-l'Ile-de-Montréal (NDI) sont nés de ces regroupements. Ils comportent chacun des Centres de santé et de services sociaux (CSSS), des Centres d'hébergement et de soins de longue durée (CHSLD) et des centres hospitaliers (CH). Ils regroupent aussi des établissements de soins propres à chacun, par exemple un Centre de réadaptation (CR), un Hôpital de jour (HJ) ou un Centre de jour (CJ). Dans ce contexte de centralisation de la gestion des établissements, les CIUSSSs ont observé que le transport externe non urgent de leurs patients représente une part importante de leur budget et a fait en 2015 l'objet de dépassements de budget importants (jusqu'à 50%). De plus, des unités ont relaté des manquements dans la qualité du service proposé aux patients : les personnes âgées, en particulier en hiver, ne peuvent se voir imposer d'attendre longuement à l'extérieur à cause du retard de leur taxi.

Ces constatations ont donné naissance à un projet dont l'objectif était d'étudier des pistes de réduction des coûts inhérents au transport externe des patients de ces CIUSSSs, ainsi que des moyens d'augmenter la qualité du service proposé aux patients. La visite d'une soixantaine d'établissements de santé au sein de tous les CIUSSSs en première partie de projet nous a permis de rencontrer le personnel administratif et médical impliqué dans le transport des patients. A la suite de ces visites, nous avons pu dessiner près d'une centaine de cartographies de processus de choix et de réservation du moyen de transport et de l'accompagnement. Ces entrevues nous ont permis de caractériser le transport des patients et de mieux cerner les types de transport et d'accompagnement nécessaires. Elles ont aussi été l'occasion de recenser 77 314 demandes de transport parmi celles observées sur une période de 25 semaines. Ces demandes de transport constituent la base de données à partir de laquelle nous avons ensuite travaillé. Ces demandes représentent, selon l'estimation sur laquelle nous nous avons basé nos calculs, près de 2.5 millions CAD.

Ce chapitre présente l'organisation actuelle du transport externe des patients au sein des CIUSSSs. Son analyse a permis d'élaborer trois pistes d'améliorations à étudier. Nous avons d'abord proposé de centraliser, d'uniformiser et de simplifier le fonctionnement des établissements et les processus liés au choix et à la réservation des transports. Nous avons supposé

qu'un meilleur choix du moyen de transport et de l'accompagnement des patients peut permettre de réduire les coûts de transport (Petitmange, 2017). Ensuite, de nouvelles stratégies d'organisation des transports ont été étudiées (Dubois, 2018). Enfin, l'étude du transport des patients à l'échelle de l'Ile-de-Montréal, nous a inspirés l'hypothèse de répondre à la demande en transport externe non urgent des CIUSSSs grâce à un réseau de transport en commun adapté aux conditions des patients. Ce mémoire étudie cette dernière hypothèse.

Suite au portrait de la situation actuelle, nous présentons la version du problème que nous avons choisi de traiter et définissons quelques concepts de base que nous utiliserons dans la suite de ce mémoire.

2.1 Organisation actuelle du transport externe non urgent des patients

Le transport externe non urgent des patients concerne les déplacements non urgents des patients réalisés entre deux établissements distincts, qui requièrent donc un véhicule. Cette section caractérise les transports des patients et les moyens de transport actuellement utilisés.

2.1.1 Caractérisation des déplacements des patients

Actuellement, les patients des CIUSSSs se déplacent pour des raisons médicales ou pour leurs loisirs. Ils se rendent dans les hôpitaux et les cliniques pour des examens ponctuels ou réguliers (traitement d'hémodialyse par exemple). Ils peuvent aussi être transférés entre deux établissements, deux hôpitaux par exemple lorsque le premier ne possède pas les ressources nécessaires à la spécialité médicale requise. Ils peuvent enfin se déplacer vers un Centre de jour pour y suivre des activités, ou bien devoir se rendre à la cour de justice. Ces déplacements, pris en charge par les CIUSSSs, sont des déplacements réalisés entre les lieux de résidence des patients et les lieux visités, ou entre deux établissements de santé. Il s'agit d'allers-retours lorsque le patient se rend à un rendez-vous ou à une activité, et de trajets simples lorsque le patient est admis dans un établissement de santé.

Les patients sont domiciliés chez eux, dans des CHSLD ou des résidences, ou bien séjournent dans un centre hospitalier ou dans un centre spécialisé (établissement de santé mentale, gériatrique, de réadaptation). Ils possèdent une autonomie psychique et physique qui peut varier. L'autonomie psychique des patients relève de la description médicale. En fonction de leur état de santé et du type de déplacement prévu, ils peuvent être accompagnés. D'une manière générale, les patients sont accompagnés lors des déplacements qui ne relèvent pas du loisir, sauf s'ils sont totalement autonomes. L'accompagnateur est classiquement un membre de leur famille, un bénévole ou un Préposé Au Bénéficiaire (PAB, personnel soignant en

établissement de santé). Si cela est médicalement nécessaire (lorsque le patient a besoin d'un moniteur ou de soluté, ou en cas de transfert d'informations médicales vers l'établissement de destination), une infirmière voire un médecin peut également se déplacer avec le patient. Enfin, dans certains cas (liés au poids du patient ou à des spécificités telles que le nombre de marches à monter avec le patient), un second accompagnateur peut être nécessaire. Selon leur autonomie physique, les patients peuvent nécessiter du matériel lors de leurs déplacements. Ils peuvent se déplacer en fauteuil roulant de différents types (classique, gériatrique, bariatrique, orthopédique, électrique et triporteur). Ils peuvent aussi avoir besoin de matériel médical tel que de l'oxygène, une tige à soluté ou un moniteur.

2.1.2 Moyens de transport disponibles

Afin de répondre à la demande en transport générée par ces déplacements, les CIUSSSs font appel aux familles des patients. Cependant, cette possibilité de transport se restreint à la disponibilité et à la motorisation de la famille ainsi qu'à l'état de santé du patient. Elle ne représente en réalité qu'une part négligeable des déplacements : 52 trajets organisés par les familles ont été enregistrés sur les six mois étudiés.

Quatre compagnies de transport externes se proposent aussi de transporter les patients des CIUSSSs. Elles offrent chacune un niveau de service particulier, qui peut être décrit tel que suit :

- les taxis ordinaires permettent de transporter des patients totalement ambulants, qui pourront s'asseoir sur un siège automobile classique ;
- les taxis adaptés sans support médical proposent de transporter les patients qui se déplacent dans un fauteuil roulant de taille régulière. Le matériel médical doit se limiter à une petite bonbonne d'oxygène appartenant au patient ;
- les véhicules de transport médical peuvent accueillir les patients quelles que soient les dimensions de leur fauteuil roulant ou le matériel médical nécessaire pour leur transport (oxygène, moniteur, soluté) ;
- les ambulances permettent de transporter tous types de patients. Elles sont en règle générale réservées aux patients devant se déplacer allongés (patients grabataires...) et aux patients instables.

En plus du point de vue matériel, le degré d'accompagnement médical de ces compagnies va croissant. Le choix du moyen de transport dépend donc des considérations médicales psychiques et physiques des patients.

La ville de Montréal propose également un service de transport adapté sans assistance médicale sur réservation, la STM Adapté. Il fonctionne selon le principe du Transport à la Demande (TàD) : en fonction de la demande, des routes sont construites pour chaque véhicule de la flotte municipale. Les patients inscrits peuvent par ce biais être déplacés à un faible prix. Cependant, les détails administratifs et médicaux nécessaires à l'inscription sont lourds.

Enfin, les CIUSSSs possèdent des flottes internes pour certains de leurs établissements. Ces flottes sont composées d'un ou plusieurs véhicules pouvant être configurés de différentes manières. Ces flottes sont présentées plus en détail dans la sous-section traitant des coûts actuels liés au transport des patients (voir section 5.1.2, page 59).

2.1.3 Planification et coûts des déplacements des patients

Selon le type de rendez-vous, le déplacement d'un patient peut-être prévu de quelques heures à plusieurs mois à l'avance. Une fois l'heure d'un rendez-vous définie, le transport est programmé. Son départ est prévu une heure avant l'heure dite.

En revanche, l'heure de fin d'un examen médical est variable : selon le lieu et le type de rendez-vous, le patient peut rester à destination entre 30 minutes et 4 heures. Les retours de déplacements sont donc fixés "sur appel" : le patient conserve un numéro de téléphone auquel il peut joindre la compagnie de transport externe lorsqu'il est prêt pour son trajet de retour. Selon les accords conclus, un véhicule du prestataire le rejoint sous 30 minutes.

Les coûts générés par un transport sont détaillés dans l'analyse des données du projet (voir 5.1.2, page 59). Ils varient majoritairement en fonction du niveau de service demandé (mode de transport et matériel nécessaire) et de la distance parcourue. Des particularités du patient peuvent aussi influencer le prix de son déplacement. Par exemple, selon des considérations telles que le nombre de marches à l'entrée du lieu de destination ou le poids du patient, certains prestataires externes imposent que le patient soit accompagné par un deuxième chauffeur (en plus de la personne qui l'accompagnera à son rendez-vous) et facturent ce service. Des frais peuvent enfin s'ajouter suite au transport dans deux cas. Si le patient n'est pas prêt lorsque son taxi se présente, des pénalités de retard sont appliquées. Il arrive aussi que des patients ne veuillent plus, le matin de leur rendez-vous, s'y rendre. Si le personnel soignant ne peut les en convaincre, le transport doit être annulé. Une telle annulation fait l'objet de pénalités supplémentaires.

2.2 Définition du problème

Notre objectif ici est donc de concevoir un réseau de transport en commun capable de servir les demandes de transport des patients des CIUSSSs, c'est-à-dire de leur permettre de se rendre à l'heure à leur rendez-vous. Nous appuyons la formulation de notre problème sur les notions de *demande de transport* et de *paire origine-destination* que nous définissons tel que suit.

Demande (ou requête) de transport : Une demande de transport apparaît lorsqu'un patient doit se déplacer entre deux lieux. Elle est caractérisée par les lieux d'origine et de destination du patient et par l'heure à laquelle le patient doit être arrivé à destination :

$$\psi_i = (O_i, D_i, h_i) \quad (2.1)$$

La Figure 2.1 illustre cette définition des demandes. Nous pouvons remarquer que les demandes ψ_2 et ψ_3 sont bien deux requêtes différentes : même si les trajets concernés sont identiques, elles concernent des patients différents. Lors de l'étape d'affectation de la demande au réseau construit, nous abuserons également de l'équivalence entre une demande et le patient pour lequel elle apparaît pour alléger notre rédaction. Nous désignerons aussi les lieux d'origine et de destination d'une demande par les termes respectifs *lieu d'embarquement* et *lieu de débarquement*.

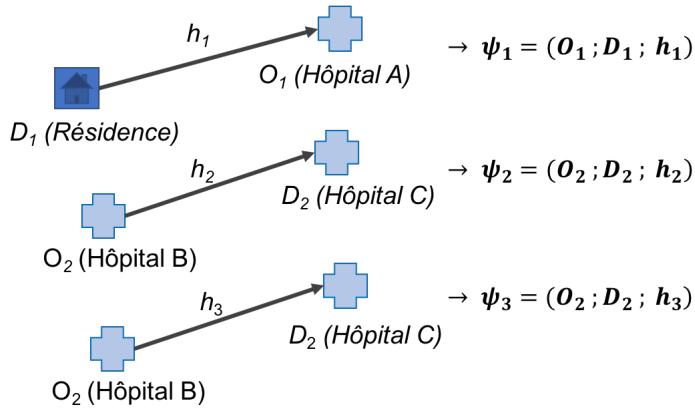


Figure 2.1 Exemples de demandes de transport et leurs représentations

Paire Origine-Destination (OD) : La paire OD d'une demande désigne le couple (O, D) correspondant à son origine et sa destination.

Afin de construire les routes de notre réseau, nous devons prendre en compte la forme actuelle de la demande. Pour notre projet, nous considérons une version déterministe du problème, dans laquelle la demande est initialement entièrement connue. Nous avons aussi simplifié en partie la réalité observée, afin de pouvoir la modéliser. Les sous-sections suivantes présentent les restrictions que nous avons appliquées.

2.2.1 Accompagnement des patients

Actuellement, 83.8% des patients sont accompagnés par un membre de leur famille, un bénévole ou un PAB. L'état de santé ou le type de rendez-vous de 0.2% des patients requiert un second accompagnateur, qui peut être une inhalothérapeute, une infirmière ou un médecin. Dans 16% des cas, les patients sont capables de se déplacer seuls. Le choix de l'accompagnateur relève en partie de la décision médicale, notamment de l'autonomie physique et psychique du patient, qui est évaluée par les infirmières ou les médecins. De plus, le montant de la dépense engendrée par l'appel d'un type d'accompagnateur varie selon le salaire qui lui est versé, qui dépend notamment de son ancienneté. Le coût réel de l'accompagnement étant impossible à estimer à partir des données disponibles, nous l'avons laissé de côté lors de l'étude de l'optimisation de l'organisation du transport. Simplement, un aspect financier de l'accompagnement rejoint un aspect de qualité du service : il est préférable que le patient n'arrive pas trop en avance à destination car le temps de mobilisation de l'accompagnateur, et donc son coût, s'en trouve réduit. Nous prendrons néanmoins les accompagnateurs des patients dans les calculs des charges des véhicules au sein du réseau.

Le cas où un deuxième homme est nécessaire pour manipuler le patient concerne 201 demandes, soit 0.3% de la demande totale. Nous considérerons simplement ici que le patient est accompagné par deux personnes plutôt qu'une, et l'augmentation des frais appliquée par les compagnies externes ne le sera pas si le patient est transporté par le réseau.

2.2.2 Matériel utilisé lors des transports et type de charge de la demande

Les fauteuils utilisés peuvent être classés en deux catégories : les fauteuils de taille régulière (FR), qui sont les fauteuils roulants, et les fauteuils hors dimension (FHD, tous les autres fauteuils). Les fauteuils hors dimension sont plus grands que les fauteuils roulants classiques, et la configuration réelle des véhicules est telle que nous pouvons considérer qu'un fauteuil hors dimension occupe l'espace de deux fauteuils roulants de taille régulière. Ce sont donc les mesures de capacité que nous utiliserons par la suite. Afin d'étudier quelles capacités devraient avoir les véhicules d'un tel réseau, nous avons d'abord étudié les solutions obtenues en imaginant des véhicules pouvant accueillir huit personnes ambulantes et proposant huit

emplacements de fauteuils roulants.

Le processus de choix du niveau de service nécessaire pour le transport d'un patient est très complexe, comme l'a souligné Eva Petitdemange dans son mémoire (Petitdemange, 2017). Face à cela, nous avons choisi pour réaliser les tests à partir de la base de données constituée de supposer que les décisions prises actuellement en ce qui concerne le moyen de transport emprunté par les patients sont optimales. Considérant que tous les patients ne pourront pas être servis par le réseau conçu, nous avons voulu prévoir le cas d'un transfert aux compagnies externes pour toutes les demandes actuellement servies par les flottes internes des CIUSSSs. D'après la description faite de leurs patients par les établissements de santé visités, nous avons décidé de considérer deux cas. D'une manière générale, les patients circulant en flotte interne correspondent tous à des patients voyageant en transport adapté sans support médical. Petite exception, les patients se rendant à l'Hôpital de Jour de Dorval-Lachine-LaSalle (HJ DLL, CIUSSS ODI) peuvent emprunter des taxis ordinaires. De cette manière, nous pouvons comparer les coûts de service des demandes de transport par le réseau créé à la reconstitution faite du budget actuel de transport.

Malgré la spécificité du transport ambulancier, seul capable de servir les transports urgents, certains établissements font appel à lui pour une part plus importante de leurs transports. Ces transports en particulier peuvent faire l'objet d'une amélioration organisationnelle. Cependant, nous n'avons pas pu obtenir suffisamment d'informations pour pouvoir estimer assez précisément une part plausible de patients pouvant en réalité se déplacer dans un fauteuil roulant plutôt qu'allongés. Les demandes de transport servies par ambulance ne seront donc pas prises en compte dans cette étude.

2.2.3 Horaires des rendez-vous

La base de données contient des horaires de rendez-vous précis à la minute près. Or en réalité, les rendez-vous sont fixés avec la précision d'un quart d'heure au minimum. Nous avons choisi d'estimer que pour chaque demande, l'heure à laquelle le patient avait rendez-vous en réalité est égale au plafond de l'heure affichée dans la base de données, au quart d'heure près.

2.2.4 Retard des patients et annulation des demandes

Sur les six mois étudiés, les pénalités liées aux retards des patients et aux annulations tardives se sont élevées à 32 260\$ pour les retards et à 22 120\$ pour les annulations, soit au total à 54 380\$. Cela correspond à une augmentation de 2% du coût de service actuel estimé. Les CIUSSSs peuvent donc trouver ici un point de réduction des coûts de transport :

l'amélioration de l'organisation de la préparation des patients, afin de réduire leurs retards. Au niveau de la création du réseau adapté, une certaine flexibilité du réseau permettrait en dynamique de redessiner les routes lorsqu'une annulation est annoncée ou si un retard important est constaté qui risque d'engendrer des retards pour les patients qui transitent par la même route. Ici cependant, les annulations et les retards représentent respectivement 1% et 6% de la demande. Nous considérerons donc qu'aucun transport n'est annulé, et que tous les patients sont prêts à embarquer lorsque le véhicule arrive.

2.3 Objectif, hypothèses et contraintes du problème à résoudre

A partir de l'analyse du contexte et des simplifications de la réalité que nous avons considérées, nous pouvons établir le problème de conception d'un réseau de transport adapté pour les patients des CIUSSSs de l'Ile-de-Montréal de la manière suivante. Le réseau de transport optimal maximise les intérêts de l'opérateur et des passagers tel que :

- il engendre un coût de service minimal ; ce coût de service est fonction de la longueur des routes et de la taille de la flotte nécessaire (taux d'occupation des véhicules) ;
- il minimise le temps passé à bord des véhicules par les patients, ainsi que l'avance avec laquelle ils rejoignent la destination de leur rendez-vous.

Nous travaillons sous les hypothèses suivantes :

- en situation réelle, les déplacements des patients sont organisés en fonction des rendez-vous fixés et ne sont que rarement annulés. Nous considérons donc que la demande est fixe. Nous considérerons de plus qu'aucune dégénérescence de la ponctualité n'apparaît sur le réseau à cause du trafic sur l'Ile-de-Montréal ;
- les déplacements des patients sont organisés par les établissements de santé dont ils dépendent. Il ne choisissent pas leur moyen de transport. Par contre, la part de la demande pouvant transiter par le réseau reste fonction du service qu'il propose ; le reste des déplacements sera confié à des compagnies de transport externes. La demande varie donc en fonction du service proposé ;
- la flotte de véhicules disponibles est homogène ;
- l'organisation des transports que nous proposons ne générera pas de nouvelle demande de transport. Nous considérons donc que les véhicules pourront circuler sur l'ensemble du réseau physique de Montréal, c'est-à-dire qu'aucune contrainte de capacité ou de type de route ne viendra entraver la circulation des véhicules de la flotte sur son réseau.

Le réseau conçu doit respecter les contraintes inhérentes au contexte dans lequel il serait

implanté :

1. Notons q_c et q_f la capacité d'un véhicule de la flotte, mesurée par le nombre de personnes correspondant aux deux types de charges (sièges classiques et emplacements de fauteuils roulants) se trouvant dans le véhicule lorsqu'il quitte le lieu i . Notons aussi Q_c et Q_f les charges maximales admissibles par un véhicule. La contrainte de capacité d'un véhicule de la flotte à chaque lieu s'écrit tel que :
 - $q_c \leq Q_c \quad \forall i$;
 - $q_f \leq Q_f \quad \forall i$.
2. les routes doivent permettre de servir les demandes en respectant la contrainte de LIFO. Après étude de la littérature, nous formulerons cette contrainte de deux manières différentes :
 - Lors de la création des routes du réseau, il est nécessaire de prévoir que les demandes devront pouvoir être insérées dans les routes tracées. Nous définissons donc deux contraintes :
 - (précédence) l'origine de toute paire OD doit être visitée avant sa destination ;
 - (LIFO) l'ordre de visite des lieux, en terme de service des demandes, doit former un palindrome. Nous traduisons cela par le fait que l'origine et la destination de toute paire OD doivent être séparées par un nombre pair de lieux et en ajustant la position de la destination en fonction de celle de l'origine dans une route de manière à ce qu'aucune destination ne soit visitée entre l'origine et la destination d'une même demande (Cordeau et al., 2010).
 - Lors de l'affectation des demandes aux routes, il faut s'assurer que l'organisation des embarquements et des débarquements des patients sera correcte :
 - (précédence) tout patient doit embarquer avant de débarquer ;
 - (LIFO) Soit \mathcal{L}_{O_i} l'ensemble des demandes dont les passagers sont présents dans le véhicule lorsqu'il arrive à l'origine d'une demande Ψ_i . Alors l'ensemble des demandes dont les passagers sont à bord du véhicule lorsqu'il quitte la destination de Ψ_i doit être $\mathcal{L}_{D_i} = \mathcal{L}_{O_i}$ (Benavent et al., 2015).
3. les patients ne peuvent pas se déplacer pour rejoindre les points d'arrêt du réseau, même sur une courte distance. Les arrêts du réseau sont donc fixés : ils sont les lieux d'origine et de destination des patients ;
4. aucun transfert n'est possible pour les patients. Ils ne peuvent donc être servis que par une seule route ;
5. la durée du voyage d'un patient ne peut excéder ζ minutes ;
6. la durée maximale d'une route ne peut dépasser τ heures ;

7. tout patient doit arriver à destination à l'heure pour son rendez-vous, heure notée h_{rdv} . Il doit donc être parvenu à destination à l'intérieur d'une fenêtre de temps définie par des temps d'avance minimale et maximale autorisés, respectivement α_{min} et α_{max} , tels que :

$$[\underline{\omega}, \bar{\omega}] = [h_{rdv} - \alpha_{max}, h_{rdv} - \alpha_{min}]$$

La méthode de conception de réseau construite demande, comme paramètres, de renseigner :

- la célérité ν des véhicules sur le réseau ;
- le temps de service en un lieu visité t_{s_i} ;
- le coût kilométrique d'un trajet sur le réseau ξ .

CHAPITRE 3 REVUE DE LITTÉRATURE

L'objectif de ce projet est de dessiner un réseau de transport adapté au contexte médical dans lequel il serait implanté. Nous avons donc organisé notre revue de littérature de manière à cerner le problème de conception de réseau et les adaptations nécessaires à son implantation dans le contexte de notre projet. La première partie de cette revue de littérature présente les méthodes utilisées actuellement pour construire les routes d'un réseau. La lecture de Desaulniers and Hickman (2007), nous a permis de mieux définir le problème de conception de réseau, puis nous avons construit notre revue de littérature à partir de la synthèse réalisée en 2009 par Kepartsoglou and Karlaftis (2009). Comme la fonction objectif est fixée dans notre cas, nous réduisons notre étude aux travaux correspondants. Pour mieux cerner les approches de résolution qui ont été proposées en conception de réseau et leur évolution, nous relatons les formulations des problèmes traités et relevons les méthodes de résolution utilisées. La contrainte de LIFO n'ayant pas encore été introduite en conception de réseau, nous étudions dans une deuxième partie son introduction dans les problèmes de tournées de véhicules avec ramassage et livraison (PDP). Notre méthode se base sur le partitionnement d'objets. Nous nous intéressons donc ensuite aux méthodes basiques de partitionnement et à leur utilisation dans les méthodes de résolution de PDP. D'un point de vue purement méthodique, nous nous renseignerons enfin sur les méthodes de regroupement d'objets à plusieurs niveaux qui existent actuellement.

3.1 Le problème de conception d'un réseau de transport public

Les objectifs poursuivis lors de la conception d'un réseau de transport en commun sont souvent contradictoires. En effet, un tel réseau ne sera utilisé par les passagers que s'ils peuvent grâce à lui voyager facilement, rapidement et le plus directement possible, moyennant un faible tarif. Cela implique un réseau dont les lignes couvrent un territoire suffisamment large et dense, à une fréquence répondant à la demande pour limiter les temps d'attente des passagers. Desaulniers and Hickman (2007) expliquent que satisfaire ces critères contredit les intérêts de l'opérateur du réseau, dont l'objectif est de réaliser le profit maximal ou tout au moins de se situer en deçà d'une limite budgétaire (lorsque l'opérateur du réseau est une agence communautaire). S'ajoutent aussi à ces objectifs les intérêts de la communauté, qui regroupent la volonté de réduire l'engorgement routier et la pollution. La conception d'un réseau demande donc le plus souvent de trouver un équilibre entre les intérêts contraires des trois parties. Ceder (2001) étudie plusieurs façons de le faire. Nous laisserons de côté l'aspect

communautaire, non pertinent dans notre projet.

Selon Ceder and Wilson (1986), le problème de conception d'un réseau de transport public (PT) se décline en cinq sous-problèmes :

1. le dessin des routes du réseau, basé sur la demande de transport ;
2. le calcul des fréquences de parcours des routes ;
3. le calcul des horaires de passage des véhicules à chaque arrêt du réseau ;
4. le dimensionnement de la flotte de véhicule et ;
5. l'affectation du personnel navigant

Ces étapes de conception sont interreliées. Les derniers éléments planification (4 et 5) dépendent du réseau dessiné : en fonction des routes qu'il contient et des fréquences auxquelles elles sont parcourues, un réseau propose un certain niveau de service. Selon celui-ci, les passagers qui choisiront le réseau pour se déplacer peuvent varier. Le dimensionnement de la flotte de véhicule dépend de ce facteur, ainsi que la création des horaires des chauffeurs. A partir de ces résultats, il est possible de faire évoluer le réseau obtenu pour améliorer la valeur de la fonction objectif obtenue. Une fois ces étapes réalisées, l'évaluation du service proposé et des coûts engendrés par la solution obtenue entraînent ainsi une recherche de meilleures routes dans le réseau pour améliorer le compromis entre les intérêts de l'opérateur et ceux des passagers Ceder (2001). Dans la littérature, le problème de conception de réseau de transport en commun est résolu de manière itérative à cause de la complexité de chacune de ces étapes. D'après (Guihaire and Hao, 2008), les trois premiers sous-problèmes liés à la conception de notre réseau sont les plus importants : tant l'intérêt économique du réseau que sa capacité à répondre à la demande dépendent d'eux.

Les routes du réseau sont construites à partir d'une matrice origine-destination (matrice OD) précisant la demande sur chaque période de temps choisie. Le dessin des routes du réseau est un problème NP-complet (Magnanti and Wong, 1984), donc les méthodes élaborées pour résoudre des problèmes de taille réaliste sont essentiellement heuristiques. Parmi les grands travaux ayant été réalisés en conception de réseau, il faut souligner ceux de (Lampkin and Saalmans, 1967) qui proposent une heuristique qui construit des squelettes de routes et les développe jusqu'à couvrir l'ensemble des nœuds du réseau. Les fréquences de parcours des routes sont ensuite calculées par une méthode de gradient aléatoire pour minimiser le temps total de voyage des passagers. Baaj and Mahmassi (1995) introduit l'intelligence artificielle pour résoudre le problème de dessin des routes en se basant aussi sur la construction de squelettes de routes. Mandl (1979) est aussi une référence dans le domaine. L'auteur propose une heuristique pour résoudre les problèmes d'optimisation des routes d'un réseau existant et d'affectation des passagers en focalisant sur les coûts de transport.

Les schémas de conceptions, proposés par Ceder and Wilson (1986) par exemple, proposent de résoudre les deux premiers sous-problèmes simultanément, ou bien de créer d'abord le réseau (problème de dessin du réseau) à partir de la demande en tenant compte des contraintes des opérateurs uniquement. Les objectifs des passagers sont ensuite privilégiés lors du calcul des fréquences de parcours des routes, qui est réalisé par une affectation des passagers aux routes dessinées (problème d'affectation des passagers au réseau). Dans la majorité des études réalisées, si la fonction objectif ne comporte que la minimisation des coûts opérateurs, elle tient aussi compte de la maximisation du confort des passagers au travers de l'optimisation de la couverture offerte et les fréquences de parcours des routes. Ils résolvent donc simultanément les deux sous-problèmes.

Ceder and Wilson (1986) ont construit une méthode heuristique se voulant inspirée de travaux antérieurs tels que ceux cités plus hauts mais plus simple d'implémentation. Ils considèrent deux niveaux d'intérêts. Dans le premier, seul le point de vue des passagers est retenu. Le second ajoute les perspectives de l'opérateur. Les routes du réseau sont sélectionnées dans un ensemble de routes construites selon ces deux niveaux d'intérêts à l'aide d'une heuristique. Les formulations qu'ils proposent pour leurs deux niveaux d'intérêts considèrent comme contraintes un nombre de routes maximales, des bornes inférieures et supérieures sur la longueur des routes et les temps de trajets des passagers. Le second niveau d'intérêt ajoute une contrainte sur la fréquence minimale et une contrainte bornant la taille de la flotte de véhicules. Ceder and Wilson expliquent que leur formulation simplifie beaucoup les situations réelles. Dans le cas d'une sélection reposant uniquement sur le premier niveau pour un réseau de petite taille, une méthode exacte pourrait résoudre le problème simplifié. Sinon, il est nécessaire de recourir à une heuristique.

Pattnaik et al. (1998) puis Tom and Mohan (2003), par exemple, focalisent sur la conception d'un réseau visant à optimiser les intérêts de l'opérateur et des passagers. Ils proposent une modélisation dont les contraintes concernent la capacité maximale des véhicules et la fréquence minimale nécessaire pour créer une route. Ils choisissent de la résoudre par un algorithme génétique (AG), dont les tests confirment l'intérêt de ce type de méthode pour des réseaux de très grande taille. En 2010, Liu et al. associent une méthode de recuit simulé à un AG et obtient de bons résultats théoriques pour une même formulation du problème. Agrawal and Mathew (2004) ajoutent une contrainte stipulant que la totalité de la demande doit être servie et parallélisent l'utilisation des algorithmes génétiques. Fan and Machemehl (2006a, 2006b) ajoutent des contraintes bornant la taille de la flotte disponible et la longueur d'un trajet. Leurs tests montrent que la recherche à voisinage variable, utilisée pour la première fois dans ce domaine, est potentiellement meilleure qu'un AG.

En 2002, Fusco et al. ont étudié de manière théorique la conception d'un réseau à l'échelle d'une ville de taille moyenne. Ils ont proposé de minimiser les coûts opérateur, en ne tenant compte des intérêts des passagers (niveau de service, satisfaction de la demande, configuration et fréquences des lignes) que dans les contraintes. Leurs travaux ont ensuite été élargis par Cipriani et al. (2004) qui y ont introduit une variabilité de la demande en fonction du service proposé.

Hu et al. (2005) ont ensuite exposé une méthode qui prend d'abord en compte les intérêts des passagers, en maximisant le nombre de trajets directs sous des contraintes imposant les longueurs des routes, de capacité et de temps maximal de transfert entre deux lignes. Ils introduisent pour cela une méthode basée sur les colonies de fourmis. Les coûts de l'opérateur et des passagers sont ensuite minimisés dans une étape de calcul des fréquences des routes sous contraintes de valeurs limites.

Préférant un autre angle, Bielli and Carotenuto (1998) avaient traduit l'objectif de maximisation des intérêts de l'opérateur et des passagers par la minimisation sans contrainte du nombre de véhicules transitant dans le réseau, et résolvent ce sous-problème grâce à l'utilisation d'AGs et d'une fonction d'évaluation calculée par un modèle d'affectation ou un réseau de neurones. De même, Chakroborty and Wivedi (2002 puis 2003) proposent des méthodes de construction d'un réseau efficient dont la fonction objectif peut s'adapter pour englober les contraintes du contexte choisi.

La conception de réseau de transport en commun prend nécessairement en compte les intérêts opposés de l'opérateur et des passagers. La littérature témoigne que les métaheuristiques sont efficaces pour traiter cette fonction objectif complexe et résoudre des instances de taille réelle. Les travaux successifs ont permis de construire des algorithmes performants capables de traiter des instances correspondant à des cas réels. Le développement de ces méthodes de résolution ont aussi fait évoluer la modélisation du problème de dessin des routes et de calcul des fréquences : il est possible de s'éloigner d'une formulation plus classique des contraintes pour définir plutôt un réseau de routes réalisable et intéressant. Les contraintes de faisabilité stipulent ainsi dans des projets plus récents la connectivité du réseau et le service de chacun de ses nœuds, l'interdiction de cycles dans les routes, l'unicité des routes dont le nombre maximal peut être fixé, le respect pour chacune d'elles d'un intervalle de fréquences de parcours ainsi que d'une longueur maximale, l'adéquation de la valeur d'un facteur de charge avec les objectifs, la prise en compte d'un nombre maximal de véhicules disponibles dans la flotte ou encore des pénalités liées aux transferts. Les travaux de Mumford (2013) puis d'Arbex and da Cunha (2015) se réfèrent par exemple à ces définitions.

Nous pouvons cependant observer que la nécessité de trajets directs n'apparaît pas dans la

littérature. La minimisation du nombre de transferts figure néanmoins parfois la fonction objectif, comme dans les travaux de Zhao et al. (2003) et de Hu et al. (2005). Il a aussi été observé que le confort des passagers augmente lorsque le nombre de transferts diminue, et il est communément acquis que si plus de deux transferts sont nécessaires, les utilisateurs choisissent un autre moyen de transport (Guhaire and Hao, 2008).

Nous remarquons également que la contrainte de LIFO que nous devons prendre en compte n'a pas été étudiée jusqu'ici dans les problèmes de conception de réseau de transport en commun. Cette contrainte est caractéristique du transport des personnes handicapées, plus souvent modélisé comme un PDP dans les problèmes de *Dial-a-ride*. Nous avons donc analysé la formulation de la contrainte de LIFO dans ces problèmes.

3.2 Les PDP avec contrainte de LIFO

Le PDP est un problème NP-complet dont l'objectif est de construire des routes visitant des paires de lieux qui précisent à quel endroit chaque item considéré doit être chargé ou déchargé du véhicule. Il est défini sur un graphe $G = V \cup P$, où $V = \{1, \dots, n\}$ est l'ensemble des lieux de ramassage et $P = \{n+1, \dots, 2n\}$ l'ensemble des lieux de livraison. Ces problèmes ont pour objectif de construire des routes de coût minimal visitant chaque lieu une unique fois, de telle sorte que tous les items considérés ont été ramassés puis livrés correctement. Ces problèmes présentent les contraintes classiques des problèmes de tournées de véhicules (capacité, durée maximale d'une route, fenêtres de temps, contraintes de sous-tours), ainsi que des contraintes de précédence du lieu de ramassage d'un objet par rapport à son lieu de livraison sur le plan de route et de présence de ces deux lieux sur la même route. La contrainte de LIFO apparaît lorsque le coût engendré par le réarrangement des objets dans le véhicule pendant le voyage dépasse les coûts de transport, ce qui peut arriver lorsque les objets sont volumineux, fragiles ou dangereux. Son ajout au PDP (qui devient le PDPL) date de 1984, mais les premières méthodes de résolution sont plus récentes. Cette contrainte ajoute à la complexité du problème. Les méthodes exactes actuelles telles que le *branch-and-bound* (Carrabs et al., 2007), le *branch-and-cut* (Cordeau et al., 2010) ou, plus récemment, le *branch-price-and-cut* (Cherkesly et al., 2015) permettent de résoudre des instances comportant jusqu'à 75 noeuds. Les instances plus grandes sont résolues à l'aide d'heuristiques ou de métahéuristiques telles que le recuit simulé (Pacheco, 1997a) ou la recherche à voisinage variable (VNS) (Carrabs et al., 2007). Le PDP se généralise à des problèmes impliquant plusieurs véhicules (MVPDP). Une solution devient alors un ensemble de routes réalisables. Les méthodes de résolutions utilisées sont similaires à celles étudiées pour le PDP (Gao et al., 2011; Benavent et al., 2015). Pour simplifier le mieux possible la formulation de la contrainte de LIFO dans notre

problème et l'adapter aux différentes phases du problème où nous en tenons compte, nous avons recherché comment elle est traduite dans la littérature.

Cordeau et al. (2010) expliquent que si l'ordre des lieux visités sur une route respecte la contrainte de LIFO, alors c'est un palindrome : tous les lieux de chargement doivent être visités avant les lieux de déchargement, et les lieux de déchargement doivent l'être dans l'ordre inverse des lieux de chargement. Ils appuient ensuite leur formulation de la contrainte de LIFO sur les travaux de Volchenkov (1982). Celui-ci s'est intéressé le premier aux structures de graphes qui respectent ou non la contrainte de LIFO dans le domaine informatique pour trouver un ordre des opérations à réaliser (équivalent des lieux à visiter dans le PDP) qui satisfasse le fonctionnement d'une pile linéaire. Il a démontré que la structure d'un graphe composé de couples dont le noeud de chargement et le noeud de déchargement sont reliés par une arête respecte la contrainte de LIFO s'il est possible d'en trouver une représentation planaire. En effet, si un lieu de déchargement est visité entre un lieu de chargement et le lieu de déchargement correspondant, la contrainte de LIFO est violée et alors deux arêtes se croiseront nécessairement. Ses travaux ont été poursuivis par Levitin (1986) puis Levitin and Abezaouz (2003) qui ont amélioré les algorithmes proposés, pour trouver la plus courte tournée visitant les noeuds d'un graphe en respectant la contrainte de LIFO.

Cherkesly et al. (2015) ont ajouté une contrainte de fenêtres de temps au PDPL, tout en relaxant la contrainte de durée maximale de la route. Ils utilisent aussi la structure de pile linéaire : dans leur formulation, un item ne peut être livré que s'il est le dernier dans la pile. Ils formulent le problème sur un graphe dont ils suppriment tous les arcs violant la contrainte de LIFO, c'est-à-dire ceux qui lient un lieu de ramassage au lieu de livraison d'un autre objet. Ils reprennent la formulation de la contrainte de LIFO de Cordeau et al. (2010), qui vise à supprimer les chemins irréalisables du graphe, c'est-à-dire les combinaisons d'arcs qui ne respectent pas la contrainte de LIFO.

Benavent et al. (2015) ont aussi travaillé sur le positionnement relatif des lieux sur la route, et sur les ordres de visite réalisables ou non. Ils traduisent la contrainte de LIFO comme l'obligation, pour tout véhicule visitant une origine, de visiter sa destination ou une autre origine. Ils s'inspirent de la formulation de Miller-Tucker-Zemlin pour le problème du voyageur de commerce pour définir trois heuristiques qui construisent les solutions initiales de leur recherche tabou :

- une heuristique de Clarke et Wright qui insère une demande à la position optimale telle que la contrainte de LIFO est respectée ;
- une heuristique qui insère les lieux de livraison juste après les lieux de ramassage ; et
- une heuristique qui insère chaque demande telle que l'origine se trouve après le dernier

lieu de ramassage et la destination avant son lieu de livraison tant que les autres contraintes du problème sont respectées.

Ils utilisent un ensemble de variables binaires pour définir les lieux où chaque item peut être ramassé ou livré et pour traduire, pour tout couple de lieux $i \in V$ et $k \in P$ si l'item devant être livré en k se trouve dans le véhicule lorsque celui-ci quitte le lieu i . Ils formulent ainsi que si un item est chargé à un lieu, le lieu visité juste après sur la route ne peut pas être le lieu de livraison d'un autre item. Cette formulation les amène à définir que la contrainte de LIFO impose que pour tout couple de lieux $(i, n+i)$, le chargement du véhicule lorsqu'il arrive en i et quand il quitte $n+i$ doit être identique. Dans le contexte du transport de personnes, cela signifie que les passagers à bord d'un véhicule dans lequel un patient p embarque au lieu i seront toujours à bord du véhicule juste après le débarquement du patient $n+i$ à sa destination, et qu'aucun autre passager ne sera à bord en plus de ceux-ci.

Tu et al. (2010) introduisent une formulation des solutions réalisables pour le problème de voyageur de commerce avec contrainte de LIFO (TSPPDL) sous forme d'arbres ordonnés, dans lequel chaque couple de lieux $(i, n+i)$ est un noeud. Cette représentation garantit que la route dessinée par le parcours des noeuds de l'arbre respecte la contrainte de LIFO, et propose une structure de données plus simple que les listes qui étaient choisies jusqu'ici pour représenter les routes. Elle est reprise par Carrabs et al. (2007) puis Li et al. (2011) pour le TSPPDL, et par Gao et al. (2011) puis Cheang et al. (2012) qui résolvent le cas d'une flotte de plusieurs véhicules avec limite sur la durée des routes (MTSPPD-LD).

De leur côté, Zachariadis et al. formulent en 2015 un PDPL avec ramassage et livraison simultanés, deux dimensions de charge et la contrainte de LIFO pour le transport d'objets rectangulaires non superposables qui ne peuvent pas être réarrangés dans le véhicule au cours du trajet. Plutôt que l'ordre de visite, il considère des plans de chargement des objets à chaque lieu visité. Les contraintes LIFO sont alors formulées comme des contraintes de séquence, déjà évoquées par Carrabs et al. (2007) : aucun item ne doit être placé entre l'item i et la porte du véhicule quand l'item i doit être chargé ou déchargé. Cela correspond respectivement à des chargements et déchargements sans réarrangement. Cette autre formulation se retrouve dans sa méthode de résolution, qui considère séparément le dessin des routes et l'organisation de la charge : les routes sont construites par une méthode de recherche locale et les plans de transport à l'aide d'une heuristique de remplissage (packing).

Comme le montre cet état de l'art, la contrainte de LIFO ajoute à la complexité du problème de tournées de véhicules avec ramassage et livraison, qu'un ou plusieurs véhicules soient considérés. Les méthodes de résolution exacte rencontrées dans la littérature s'appuient sur des méthodes de plans coupants. La mét-heuristique principalement utilisée est la recherche

à voisinage variable. Ses résultats sont améliorés par une formulation en arbre des solutions travaillées qui garantit que nous nous déplaçons uniquement dans l'espace des solutions réalisables.

3.3 Le partitionnement d'objets (clustering)

Au contraire des cas d'applications classiques de conception de réseau pour le transport public, la densité de la matrice OD des demandes est faible dans notre projet : une paire OD est demandée entre 1 et 579 sur les 25 semaines considérées, la moyenne étant de 9 fois (écart type de 28). De plus, la contrainte de LIFO et l'interdiction des transferts compliquent la construction des routes à grande échelle. Nous avons donc préféré tracer des routes au sein de zones géographiques. Ce principe rejoint de plus un trait organisationnel apprécié des patients : si leur transport est assuré par un petit nombre de chauffeurs, ils les connaissent et se sentent d'autant plus en confiance lors de leurs déplacements. Ceci augmente donc leur qualité de vie. Nous baserons donc notre méthode de résolution sur le partitionnement des demandes.

Le clustering est un outil d'exploration de données utilisé dans de nombreux domaines comme l'intelligence commerciale, la biologie ou la sécurité. Il permet de répondre à l'abondance de données qui peuvent maintenant être collectées, en proposant des moyens de découvrir les caractéristiques intéressantes d'une base de données, même très grande. Han et al. (2012) le définissent dans leur manuel sur l'exploration de données comme un "processus de création de groupes d'objets au sein d'un ensemble tel que les objets d'un même groupe soient très similaires, mais qu'ils présentent une grande différence avec les objets des autres groupes". Le clustering diffère de la classification d'objets en ce sens que lors d'une opération de classification, les catégories permettant de regrouper les données sont connues et définies, alors qu'elles ne le sont pas lors d'un regroupement. Après une courte présentation des méthodes dites "basiques" de clustering, nous aborderons son utilisation dans les problèmes liés au transport. Nous nous intéresserons aussi à quelques méthodes utilisant plusieurs niveaux de partitionnement.

Les méthodes basiques de clustering

Les méthodes dites "basiques" de partitionnement d'objets dont l'approche est guidée par les données sont les méthodes de clustering (1) basées sur le partitionnement, (2) hiérarchique, (3) basées sur la densité. Pour chacune, l'objectif est de déterminer la partition optimale des n objets de l'ensemble \mathcal{D} en $k \leq n$ groupes (clusters). Les objets trop éloignés des autres

pour former avec eux des groupes suffisamment intéressants peuvent être mis de côté : ils forment le bruit.

Les méthodes de clustering basées sur le partitionnement construisent k clusters contenant chacun au moins un objet. Elles partitionnent l'ensemble des objets en trois étapes. La première définit un ensemble de k objets appelés *centroïdes* des groupes. La deuxième ajoute ensuite chaque objet au groupe dont le centroïde est le plus proche de lui. La troisième étape réaffecte les objets pour obtenir la partition finale. Des exemples classiques de ces méthodes sont le *k-means* et le *k-medoïde*. Elles sont simples à implémenter, mais la démarche suivie est telle que la partition obtenue est comparable à un diagramme de Voronoï dont les cellules seraient les groupes d'objets. Les groupes obtenus sont donc nécessairement convexes (Ester et al., 1996). De plus, ces méthodes sont sensibles au bruit : tous les objets de \mathcal{D} sont affectés à un cluster, donc un objet très éloigné de tous les autres peut déteriorer la qualité de son groupe.

Les méthodes de regroupement hiérarchique réalisent un découpage hiérarchique des objets (Han et al., 2012). Ce découpage peut être effectué par agglomération (chaque objet est un groupe puis les groupes sont fusionnés à chaque itération) ou par division (un seul groupe rassemble tous les objets ; à chaque itération les groupes sont divisés en deux) de l'ensemble \mathcal{D} . Les méthodes agglomératives sont les plus utilisées. Cette méthode de clustering propose de visualiser la partition obtenue sur un dendrogramme et ne nécessite donc pas obligatoirement comme paramètre le nombre de groupes souhaités. En revanche, elle présente des étapes irréversibles et elle reste sensible au bruit. Parmi les algorithmes classiques basés sur le regroupement hiérarchique nous retrouvons *Balanced Iterative Reducing and Clustering using Hierarchies* (BIRCH) (Zhang et al., 1996) ou Chameleon (Kumar et al., 1999). Ce dernier peut surpasser les algorithmes de regroupement par densité mais est très coûteux : sa complexité est en $\mathcal{O}(n^2)$ dans le pire cas (Han et al., 2012).

Le regroupement basé sur la densité crée une partition dont les groupes correspondent à des régions denses de l'espace, séparées par des régions peu denses. Han et al. (2012) expliquent qu'un groupe d'objets peut donc s'étendre tant que la densité de son voisinage est suffisante en regard d'un seuil fixé. Cette densité est mesurée en fonction du nombre μ d'objets se trouvant à une distance inférieure ou égale à une distance ε choisie de chaque objet de l'ensemble de données. Ce type de regroupement d'objets présente plusieurs intérêts. Il permet d'obtenir des groupes de n'importe quelle forme, et d'en séparer le bruit. Des algorithmes classiques utilisant cette méthode sont *Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise* (DBSCAN) (Ester et al., 1996) et *Ordering Points to Identify the Clustering Structure* (OPTICS) (Ankerst et al., 1999). Ces algorithmes présentent une efficacité intéressante même

sur de grandes bases de données, et les mesures de similarités nécessaires peuvent s'adapter facilement pour prendre en compte la dimension temporelle des objets par exemple. Nanni and Pedreschi (2006) ont par exemple révisé OPTICS, créé pour partitionner un ensemble de points de l'espace, pour réaliser le regroupement de trajectoires d'objets mobiles.

Le Tableau 3.1 résume les caractéristiques de ces méthodes basiques de clustering. Selon la méthode de regroupement choisie, les objets à traiter doivent être définis, ainsi qu'une mesure de similarité.

Tableau 3.1 Caractéristiques des méthodes de clustering

Base de la méthode	Partitionnement	Hiérarchie	Densité
Type de partition	stricte	stricte	stricte
Niveau de partitionnement	1	multiple	multiple
Mesure de similarité	distance	distance ou densité et continuité	distance
Forme des clusters	convexe	convexe	arbitraire
Paramètres d'entrée	k	aucun	ε et μ
Gestion du bruit et des exceptions	mauvaise	clusters propres	filtrage
Complexité des algorithmes usuels	$\mathcal{O}(n * k)$	$\mathcal{O}(n^2 \log n)$	$\mathcal{O}(n \log n)$

Le partitionnement d'objet dans les problèmes de transport

Les méthodes de résolution de problèmes de transport, notamment de personnes, introduisent régulièrement une étape de regroupement d'objets. Cette section de notre revue de littérature a pour objectif d'étudier des objets ainsi que des méthodes de clustering et des mesures de similarité qui peuvent être choisis lors de ces étapes de regroupement. Nous choisissons de rapporter ici plus en détail les travaux dont les objets se rapprochent des demandes de transport considérées dans notre projet.

Un premier problème faisant largement appel au regroupement d'objet est le problème de tournées de bus scolaires. Deux stratégies sont proposées lors de l'étape de positionnement des arrêts de bus : la stratégie de *localisation - affectation - création des routes* (LAR) et celle d'*affectation - création des routes - localisation* (ARL) (Park and Kim, 2010). La stratégie ARL repose sur la création de groupes d'étudiants au sein desquels une unique route est tracée. Chaque groupe est ensuite affecté à un arrêt de bus. Ces étudiants sont répartis géographiquement. Bowerman et al. (1995) proposent de générer les groupes à l'aide d'une heuristique basée sur la résolution d'un problème de tournées de véhicules. La capacité des

véhicules étant une contrainte du problème, le nombre de groupes (i.e. de routes) à obtenir est égal au ratio suivant :

$$M_k = \left\lceil \frac{\text{nombre d'étudiants}}{\text{capacité d'un bus}} \right\rceil \quad (3.1)$$

Les méthodes de construction de tournées de bus scolaire peuvent aussi s'appuyer sur le clustering pour générer les routes de la solution. Deux approches existent ici : *cluster-first*, *route-second* et *route-first*, *cluster-second*. Dans la première, le regroupement concerne les étudiants. Dans la seconde, une longue route est créée par résolution d'un problème de voyageur de commerce en fonction des arrêts positionnés. Cette route est ensuite découpée par une méthode de regroupement pour minimiser le trajet total parcouru en respectant les contraintes du problème (Beasley, 1983). Les métaheuristiques construites pour résoudre le problème de tournées de bus scolaires s'inspirent aussi du regroupement d'objets. Par exemple, Corberán et al. (2002) basent l'une des deux heuristiques d'entrée de sa méthode de recherche par dispersion sur le partitionnement hiérarchique de routes (agglomération). Initialement, chaque lieu à visiter est une route. A chaque itération, les paires de routes sont ordonnées selon leur proximité et les deux routes les plus proches sont fusionnées, en ajoutant l'une à la suite de l'autre. Une fusion est réalisable si elle respecte les contraintes du problème. Dans ce cas, la distance entre les deux routes correspond au temps de trajet minimal ajouté en rassemblant les deux routes en une.

Les PDP sont souvent utilisés dans le contexte du transport de personnes, en particulier pour les personnes handicapées. Les personnes doivent être transportées seules ou en groupe d'une origine à une destination données. L'objectif est de trouver la partition optimale, qui regroupe les requêtes qui peuvent être combinées dans des routes de façon à minimiser la flotte nécessaire tout en respectant des contraintes telles que des fenêtres de temps. Ce problème est résolu par des métaheuristiques, (Toth and Vigo, 1997; Rekiek et al., 2006), des systèmes d'aide à la décision (Ruiz et al., 2004; Tarantilis et al., 2004). (Desrosiers et al., 1991) ont proposé un algorithme basé sur la même définition des clusters, qu'ils appellent mini-groupes. En revanche, ils souhaitent ajouter plusieurs routes pour former l'itinéraire complet d'un véhicule pour une journée. Ils s'éloignent donc de la définition classique des clusters et préfèrent créer les groupes de demandes de façon à maximiser la densité intra-groupe et à minimiser la distance entre deux mini-groupes. Kagaya et al. (1994) s'appuient sur la théorie des ensembles flous (*fuzzy theory*). Cette théorie stipule que chaque objet peut appartenir à plusieurs ensembles, avec une probabilité plus ou moins élevée (définie par une fonction d'adhésion de chaque objet à chaque groupe). Elle permet de composer un regroupement de demandes de transport plus flexible, notamment lorsque le nombre de requêtes à traiter est important.

Les méthodes de résolution de problèmes de transport qui utilisent le partitionnement ont tendance à construire des solutions en deux étapes : une de regroupement et une de création de routes. Les objets considérés diffèrent selon l'ordre d'exécution de ces étapes. Parce que l'origine d'un trajet et sa destination sont liées dans les PDP, l'étape de clustering y cherche directement à construire des routes.

Le regroupement d'objets multi-niveaux

L'exploration de données peut être étendue en utilisant des méthodes basées sur plusieurs niveaux de clustering. Nous avons donc regardé également quels travaux précédents créent des partitions à plusieurs niveaux.

Les multiples phases de regroupement peuvent avoir pour objectif de réduire la taille du problème considéré. Bard and Jarrah (2009) introduisent par exemple une méthode de regroupement de points en trois phases pour réduire les coûts fixes d'un exploitant de navires de ligne. L'objectif est de regrouper les lieux de ramassage et de livraison en zones denses, au sein desquelles les tournées seront construites. La première phase de regroupement agrège les points spatialement proches, en tenant compte de la capacité maximale des bateaux. Les groupes sont ensuite formés par une procédure de recherche adaptative, étape suivie par une phase de post-optimisation sous la résolution d'un problème de couverture.

L'organisation de l'évacuation des personnes et des biens prend place lors des catastrophes humanitaires. Une procédure construite pour cette deuxième phase suit le principe du *cluster-first, route-second*, l'étape de regroupement étant basée sur une méthode hiérarchique. L'étape de regroupement considère les lieux entre lesquels des tournées devront être réalisées. Ces lieux sont des hôpitaux, des magasins et divers points de livraison. Les routes sont construites par la résolution exacte d'un programme linéaire. Si un groupe de lieux est trop important pour pouvoir résoudre le problème rapidement, les lieux de livraison sont subdivisés. Le problème sera reporté dans chacun des sous-groupes (Özdamar and Demir, 2012).

Réaliser plusieurs étapes de regroupement permet dans certains cas d'améliorer la qualité de la partition obtenue. Cheu et al. (2004) expliquent ainsi que les méthodes de clustering à plusieurs niveaux permettent d'obtenir 5 à 30% d'objets mieux regroupés. Certaines méthodes trouvent aussi des clusters que des méthodes à un seul niveau ne découvrent pas. Dans un contexte tout à fait différent de notre projet, nous pouvons ainsi trouver l'exemple de l'exploration non supervisée de classes acoustiques (Gracia et al., 2013). L'exploration en deux phases leur permet de découvrir des groupes de classes acoustiques à la fois suffisamment pertinents et assez peu nombreux pour être exploitables. Le clustering étant une exploration non guidée des données, fixer des paramètres en entrée des méthodes de partitionnement,

comme le nombre de clusters souhaités, peut biaiser les résultats obtenus. Pour s'affranchir de cela, Cabanes and Bennani (2007) ont aussi exploité cette amélioration de la qualité du partitionnement qu'apportent deux niveaux de clustering. Pour obtenir de meilleurs résultats que des algorithmes combinant des méthodes de partitionnement basiques et de *machine learning*, ils proposent une méthode de partitionnement à deux niveaux simultanés utilisant chacun la méthode de *self organizing map* (SOM). Les deux niveaux construits permettent d'itérativement réduire la dimension du problème et d'améliorer le regroupement obtenu. La procédure proposée permet ainsi d'obtenir une partition finale de meilleure qualité que celle obtenue par des méthodes traditionnelles et dont les groupes ne sont pas nécessairement convexes. L'algorithme *TRAjectory CLUSTering* (TRACLUS) s'appuie aussi sur deux phases : la première partitionne des trajectoires et la seconde regroupe les segments obtenus. Il découvre ainsi des sous-trajectoires communes plus précises (Lee et al., 2007).

De leur côté, Lai et al. (2010) ont appliqué deux phases de regroupement de granularités temporelles différentes, pour traiter des séries temporelles. Le premier niveau de regroupement considère les séries temporelles dans leur ensemble. Les groupes obtenus sont à nouveau regroupés, en fonction de leur sous-séquence commune. Ce partitionnement à deux niveaux informe selon des points de vue différents. Cet enrichissement possible de l'information intéresse des cas d'applications, en particulier médicaux. Ces points de vue complémentaires sont aussi recherchés dans l'étude des profils de passagers d'un réseau de transport en commun par exemple. Briand et al. (2016) utilisent ainsi deux niveaux de clustering pour réduire le problème par un partitionnement des passagers selon l'aspect temporel de leurs déplacements puis caractériser les types de trajets des différents groupes de passagers. Ils permettent ainsi aux opérateurs de transport de mieux connaître leurs clients.

La succession de plusieurs niveaux de clustering d'un ensemble de données permet de réduire la taille du problème considérée, et d'améliorer la qualité de la partition obtenue. Si les objets considérés lors des différentes étapes de partitionnement sont différents, plusieurs angles de caractérisation des données peuvent apporter des points de vue complémentaires.

CHAPITRE 4 MÉTHODE DE RÉSOLUTION

Notre projet étant d'étudier la possibilité d'implanter un réseau de transport adapté aux patients d'une ville, nous nous intéresserons seulement aux trois premiers sous-problèmes liés à la conception de notre réseau, qui sont les plus importants selon Guihaire and Hao (2008) : tant l'intérêt économique du réseau que sa capacité à répondre à la demande dépendent d'eux.

La demande en transport de patients sur l'Ile-de-Montréal est caractérisée par une faible densité de la matrice OD. Certaines demandes sont très éloignées des autres dans le temps ou l'espace. Il n'y a donc aucun intérêt économique et temporel à les combiner avec d'autres demandes. De plus, aucun transfert n'étant possible, inclure une route dans le réseau pour les servir équivaut à créer une route personnalisée pour la demande considérée. Nous préférons donc sélectionner une partie de la demande, à partir de laquelle le réseau de transport sera construit. Afin de biaiser le moins possible cette sélection, nous choisissons de réaliser un partitionnement des demandes de transport capable d'en filtrer une partie. Nous souhaitons ensuite créer un réseau de transport constitué de l'union des sous-réseaux dessinés dans chaque groupe de la partition finale obtenue.

Pour le partitionnement des demandes de transport, nous recherchons donc une méthode de clustering capable de filtrer le bruit. Cette capacité de filtrage nous permet en plus d'observer le type de réseau que nous pouvons construire selon la part des demandes retenues pour le créer. La partition des demandes que nous souhaitons obtenir doit aussi être stricte, c'est-à-dire que chacun des objets doit appartenir à un unique groupe ou au bruit. Nous voulons regrouper des demandes de transport qui pourront être combinées sur une même route. La partition sera donc composée de groupes de forme indéfinie. Selon les critères et les caractéristiques des différentes méthodes présentées dans le Tableau 3.1 une méthode de regroupement basée sur la densité semble la plus pertinente pour créer nos groupes aux deux niveaux de partitionnement, même si un regroupement hiérarchique au second niveau pourrait aussi donner de bons résultats.

Nous présentons dans ce chapitre la méthode utilisée pour concevoir et évaluer notre réseau de transport adapté. Nous proposons une méthode en deux phases : une phase de création du réseau et une phase d'affectation de la demande. Nous la présentons d'abord d'une manière générale, puis nous en précisons chaque phase. Nous débutons ce chapitre par la définition de quelques concepts que nous utiliserons par la suite.

4.1 Définitions

Partitionnement hebdomadaire de la demande : Le premier niveau de partitionnement choisi concerne les demandes de chaque semaine. Nous appellerons donc ce premier niveau de regroupement le *regroupement (ou partitionnement) hebdomadaire de la demande*.

Zone : Une zone est un super-groupe construit lors du second niveau de partitionnement. Il est composé de groupes de demandes (définis, eux, lors du partitionnement hebdomadaire).

Routes initiales du réseau : Les routes du réseau construites à l'issue de l'étape de dessin des routes sont appelées les *routes initiales* du réseau.

Routes déviées : Lors de l'étape d'affectation des demandes, certaines requêtes seront insérées dans les routes initiales du réseau en les déviant. Les routes créées par ce procédé seront désignées comme les *routes déviées* du réseau.

4.2 Présentation générale de la méthode de construction du réseau et d'affectation de la demande

La méthode de résolution proposée comprend deux phases. La première phase constitue la création du réseau lui-même par la construction de routes locales fixes. Pour cela, l'ensemble des demandes subit un regroupement à deux niveaux : un regroupement hebdomadaire des requêtes, puis un regroupement spatial des groupes obtenus en zones. Une heuristique construit alors des routes dans chaque zone du territoire. Le réseau final est composé de l'union des sous-réseaux construits dans les zones. La seconde phase est une phase d'affectation des demandes au réseau. Elle tente d'abord d'insérer les requêtes dans les routes initiales du réseau créé lors de la première phase. L'heuristique employée essaie ensuite de dévier les routes qui le peuvent afin de servir un plus grand nombre de demandes. L'affectation des patients aux routes obtenues permet d'apprécier la réponse du réseau aux objectifs de coûts de transport et de qualité de service. Elle détermine aussi les fréquences d'ouverture des routes et les horaires de passage des véhicules à chaque lieu visité. L'évaluation du service rendu par le réseau permet de mettre en perspective les mesures réalisées lors des différentes étapes de l'algorithme global. Le cheminement suivi par la méthode de résolution est repris par l'Algorithme 1.

Algorithme 1 : Méthode de création du réseau adapté et d'affectation de la demande

```

// Phase I. Création du réseau
1 Partitionner les demandes de chaque semaine;
2 Partitionner les groupes de demandes;
3 pour chaque zone de la partition obtenue faire
4   | Créer les routes du sous-réseau correspondant à la zone;
5 Regrouper tous les sous-réseaux pour obtenir le réseau final;

// Phase II. Affectation des demandes de transport
6 Affecter les demandes qui peuvent être servies par les routes initiales du réseau;
7 Affecter les demandes qui peuvent être insérées dans une route en la déviant;

```

4.3 Phase I : Création du réseau

La création du réseau est réalisée par une heuristique qui combine une étape de partitionnement des demandes de transport et une étape de création des routes dans les zones définies par la partition obtenue. Afin d'assurer un partitionnement des demandes moins coûteux en temps de calcul et en mémoire nécessaire, le partitionnement des demandes est effectué à deux niveaux. Cette structure s'appuie sur le caractère saisonnier de la demande qui peut être observé, hebdomadaire dans notre cas. Nous effectuons donc dans un premier temps un partitionnement des demandes de chaque semaine. Ensuite, afin de définir les zones dans lesquelles les routes seront construites, un second niveau de partitionnement permet de rassembler les groupes de requêtes contenant le plus grand nombre de demandes de mêmes paires OD dans des super-groupes que nous appellerons *zones*.

Les sections suivantes définissent les concepts utilisés par les méthodes de partition d'objets basées sur la densité. Nous présentons ensuite plus précisément les objets des ensembles partitionnés et les différentes mesures utilisées pour évaluer la distance entre les objets et apprécier les partitions obtenues. A la suite de cela, l'étape de création des routes vise à construire des routes au sein de chaque zone de la partition finale obtenue. Les routes dessinées à l'issue de cette opération doivent permettre, lors de la phase d'affectation des demandes au réseau, que les contraintes du problème soient vérifiées.

4.3.1 Heuristique de double partitionnement

Comme introduit en début de section, nous avons écrit une heuristique de partitionnement à deux niveaux pour obtenir les groupes au sein desquels les routes du réseau sont ensuite construites (voir Algorithme 2). La construction de l'heuristique de double partitionnement est illustrée sur la Figure 4.1, où Φ représente un territoire quelconque et Ψ_{sj} la demande

apparaissant le jour j de la semaine s .

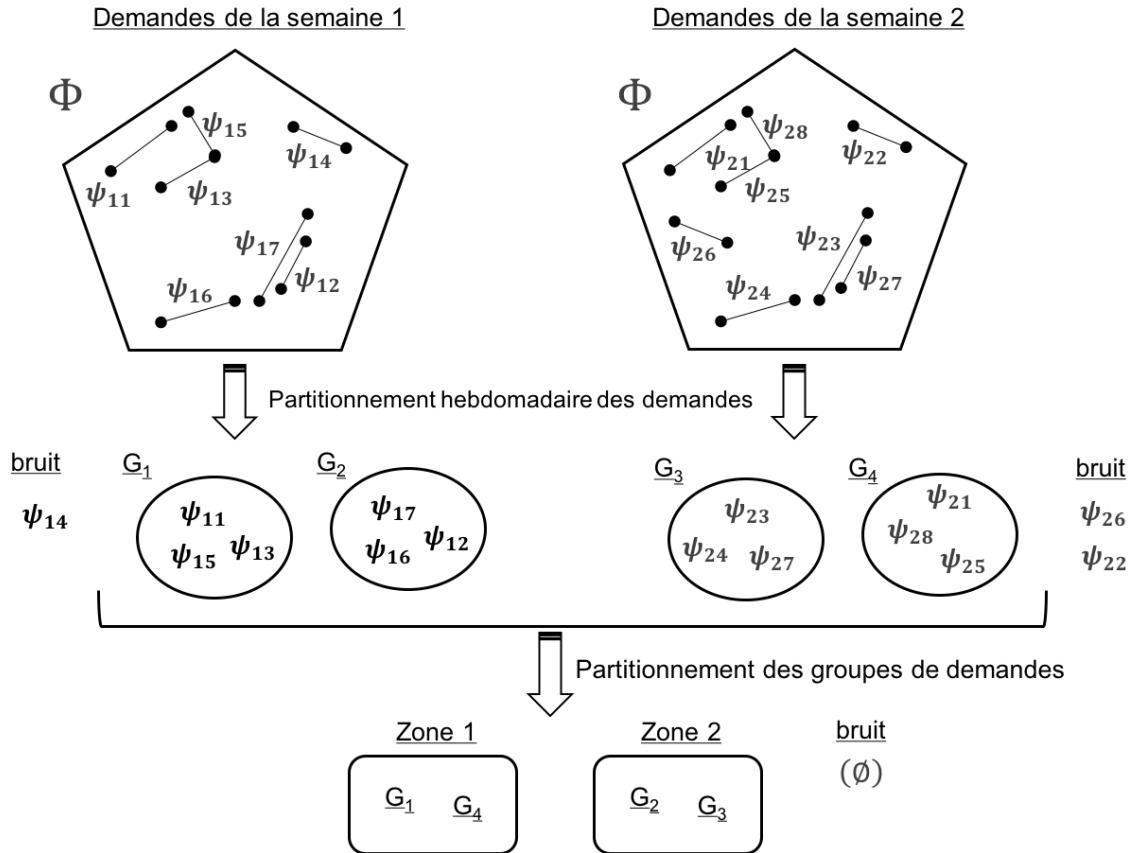


Figure 4.1 Etapes de l'heuristique de double partitionnement des demandes de transport

Algorithme 2 : Heuristique de partitionnement à deux niveaux de la demande

// Niveau I. partitionnement hebdomadaire des demandes

- 1 pour chaque semaine de la période étudiée faire
 - 2 Ordonner les demandes de transport avec OPTICS;
 - 3 Créer les groupes de demandes avec la fonction de DBSCAN;

// Niveau II. partitionnement des groupes de demandes

- 4 Ordonner les groupes de demande avec OPTICS;
 - 5 Créer les zones avec la fonction de DBSCAN;
-

Ayant choisi pour notre partitionnement des demandes une méthode basée sur la densité, nous nous sommes tournés vers un algorithme classique qui l'implémente : l'algorithme DBSCAN. Notre objectif était d'observer comment la partition des demandes créée influence le dessin

du réseau de transport. Nous souhaitions donc réaliser plusieurs partitionnements pour un même ensemble d'objets. Nous avons choisi d'implémenter l'algorithme OPTICS pour créer un ordre des demandes de transport de l'ensemble, à partir duquel nous pouvions construire nos groupes de demandes pour différentes valeurs des paramètres. Cet algorithme a été initialement construit pour regrouper des points dans l'espace, mais il peut être adapté à d'autres objets et dimensions.

Les algorithmes que nous utilisons s'appuient sur quelques concepts propres au partitionnement basé sur la densité. Nous reprenons quelques définitions nécessaires à la compréhension des paramètres utilisés dans la sous-section suivante. Les autres définitions supportant les algorithmes DBSCAN et OPTICS sont présentées en Annexe A, avec leurs pseudo-codes.

4.3.2 Quelques définitions liées au partitionnement basé sur la densité

Les concepts que nous résumons ici ont été introduits par Ester et al. (1996) pour démontrer la justesse théorique de leur algorithme DBSCAN.

L'objectif du partitionnement basé sur la densité est de rassembler les objets d'un ensemble en groupes denses et d'en séparer le bruit (ensemble des objets trop éloignés des autres pour pouvoir appartenir à un groupe dont la densité est assez significative). La définition de la densité minimale s'appuie sur une *distance génératrice* notée ε et un nombre minimal d'objets noté μ . Un groupe doit donc contenir des points permettant de respecter cette densité.

Pour construire les groupes de points, on définit l' ε -voisinage d'un point p comme l'ensemble des points dont il est séparé par une distance inférieure ou égale à la distance génératrice ε . Basiquement, si un point p possède au moins μ ε -voisins, lui et ses voisins peuvent constituer un groupe. Ester et al. (1996) expliquent cependant que l' ε -voisinage, peut varier d'un objet à un autre au sein d'un même groupe. En effet, l' ε -voisinage des objets centraux d'un groupe sera plus important que celui des objets qui se trouvent à sa bordure. Parmi les objets d'un groupe, on distinguera donc les *points-cœurs* et les *points frontaliers*. Les premiers contiennent au moins μ points dans leur ε -voisinage. Par opposition, les seconds ne possèdent pas μ ε -voisins. Les différentes caractérisations possibles des objets d'un ensemble de données sont illustrées sur la Figure 4.2. Sur cette figure, les points contenus dans le cercle en pointillé forment l' ε -voisinage de son point central.

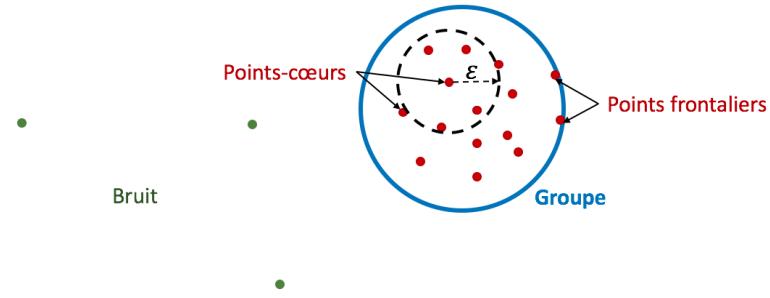


Figure 4.2 ε -voisinage, points-cœurs, points frontaliers et bruit dans un ensemble de données

Un groupe de points pourra s'étendre par densité aux ε -voisins de tous les ε -voisins d'un point p initial s'ils sont des points-cœurs, et de même aux ε -voisins successivement inclus.

Ankerst et al. (1999) ont constaté que pour une valeur de μ choisie, plusieurs niveaux de densité apparaissent dans les groupes d'objets construits à partir de la distance génératrice ε (voir Figure 4.3). Pour pouvoir atteindre ces différents niveaux de densité sans réitérer l'algorithme DBSCAN, il est possible de traiter les objets de l'ensemble dans un ordre précis et d'identifier ainsi tous les groupes existants, quelle que soit leur densité. Pour cela, il faut à chaque étape sélectionner l'objet accessible par densité le plus proche de l'objet courant. De cette façon, les groupes d'objets les plus denses seront construits d'abord et inclus, comme le prévoit l'intuition, dans les groupes moins denses auxquels ils appartiennent par inclusion. Leur algorithme, dont la rigueur est démontrée à l'aide de nouveaux concepts, est détaillé en Annexe A.

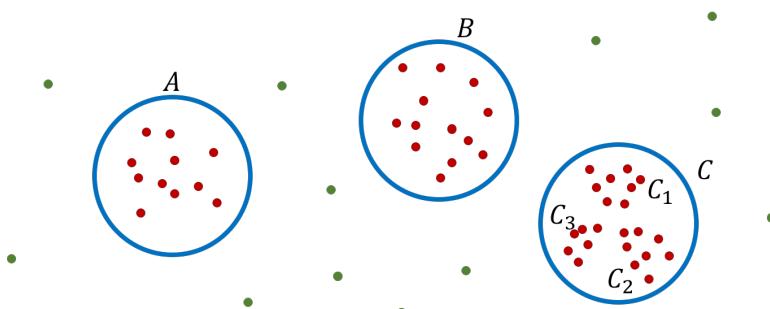


Figure 4.3 Niveaux de densité des groupes observables dans un ensemble de données (Ankerst et al., 1999)

4.3.3 Paramètres de l'heuristique de double partitionnement

Lors du partitionnement hebdomadaire, les demandes de chaque semaine sont ordonnées par l'algorithme OPTICS. Les groupes sont ensuite construits à partir de la fonction de construction écrite pour l'algorithme DBSCAN. L'ensemble des groupes de demandes de toutes les semaines constitue la base de données d'entrée du regroupement des groupes de demandes, qui suit le même schéma.

Notre heuristique appelle en entrée la base de données des demandes à partitionner, les lieux constituant des origines ou destinations des requêtes (qui sont des noeuds potentiels du réseau qui sera créé) ainsi que deux dictionnaires de paramètres qui permettent de fixer les valeurs choisies des distances génératrice et de création des clusters ε et ε_i et du nombre minimal de voisins μ pour le partitionnement des demandes puis des groupes de demandes. Elles sont telles que recensées dans le Tableau 4.1. Par construction d'OPTICS, la distance génératrice est fixée à la plus petite distance telle qu'un seul cluster peut être obtenu. Lors du partitionnement hebdomadaire des demandes, les valeurs de $\varepsilon_{h,s}$ et $\mu_{h,s}$ sont propres à chaque semaine considérée.

Tableau 4.1 Valeurs des paramètres ε et μ dans chaque type de dictionnaire

	Partitionnement hebdomadaire des demandes	Partitionnement des groupes de demandes
distance génératrice ε	ε_h	ε_g
distance de création des clusters ε_i	$\varepsilon_{h,s}$	$\varepsilon_{g,i}$
Nombre minimal de voisins μ	$\mu_{h,s}$	μ_g

Ils contiennent également :

- le type de mesure choisie pour la distance
- pour le partitionnement hebdomadaire des demandes, des valeurs de paramètres nécessaires pour les tests utilisant la mesure de distance spatio-temporelle :
 - les capacités maximales pour chaque type de charge Q_c et Q_f
 - les marges autorisées pour définir les fenêtres de temps d'arrivée à destination des patients α_{min} et α_{max}
 - la durée maximale autorisée pour le voyage d'un patient ζ

4.3.4 Partitionnement hebdomadaire des demandes

Les objets que nous regroupons lors du partitionnement hebdomadaire sont les demandes de transport telles que définies dans le chapitre 2. Afin de comparer les résultats possibles si l'aspect temporel des demandes est pris en compte ou non dès leur partitionnement, nous définissons deux mesures de distance entre deux requêtes de transport. La première est purement spatiale alors que la seconde prend en compte l'aspect temporel dans le regroupement des demandes.

Mesure de distance spatiale

Une première mesure de distance entre deux demandes peut prendre uniquement en compte l'aspect spatial de leur proximité. Nous la définissons comme la somme des distances entre les origines et les destinations des deux demandes étudiées :

$$D(\psi_i, \psi_j) = dist(O_i, O_j) + dist(D_i, D_j) \quad (4.1)$$

Le fait de calculer les distances respectivement entre les origines et les destinations permet de prendre en compte la proximité spatiale des lieux et le sens des trajets considérés. Cette distance semble plus à même de rassembler des déplacements dont les patients embarqueraient puis débarqueraient à l'un à la suite de l'autre, quand les paires OD des requêtes ne sont pas identiques.

Mesure de distance spatio-temporelle

Afin de prendre en compte les contraintes temporelles du problème étudié, nous définissons également une distance spatio-temporelle telle que :

$$D(\psi_i, \psi_j) = \begin{cases} \delta & \text{si } \psi_i \text{ et } \psi_j \text{ peuvent être servies par une même route,} \\ \infty & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.2)$$

A cause des contraintes de LIFO, seuls quatre trajets différents peuvent servir les paires OD de deux demandes ψ_i et ψ_j . Par symétrie, nous pouvons réduire ces quatre trajets à deux combinaisons possibles de visites des paires OD définies ci-dessous et illustrées sur les Figures 4.4 et 4.5.

$$O_i \rightarrow D_i \rightarrow O_j \rightarrow D_j \quad (4.3)$$

$$O_i \rightarrow O_j \rightarrow D_j \rightarrow D_i \quad (4.4)$$

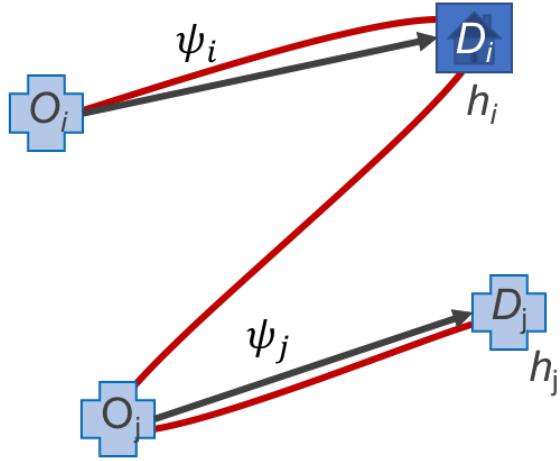


Figure 4.4 combinaison ODOD (4.3)

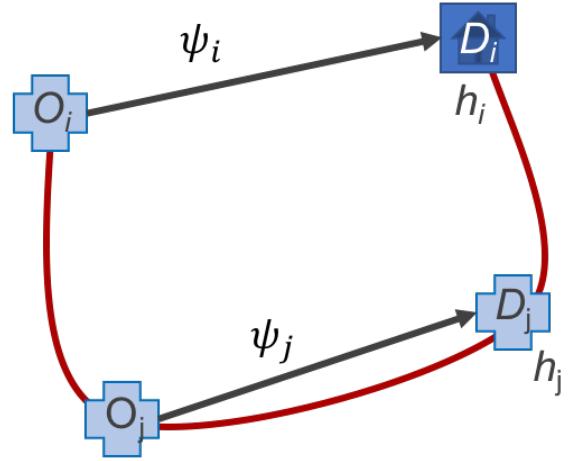


Figure 4.5 combinaison OODD (4.4)

Pour que deux demandes i et j puissent être servies par la même route, il faut qu’au moins l’une de ces deux combinaisons soit réalisable, c'est-à-dire qu’elle respecte les contraintes temporelles déterminées par le contexte. Une combinaison des demandes est donc réalisable si (1) la durée totale de la route obtenue ne dépasse pas la durée maximale autorisée τ , si (2) le trajet de chaque patient ne dure pas plus que le temps médicalement autorisé ζ et si (3) les patients arrivent à destination à l’intérieur des fenêtres de temps imposées $[\underline{\omega}, \bar{\omega}]$. Posons t_s le temps de service à un lieu, correspondant au temps nécessaire pour embarquer un patient en fauteuil roulant dans le véhicule ou l’en débarquer. Si une combinaison des deux demandes de transport sur une même route est possible, la distance entre les deux demandes est la distance additionnelle que le véhicule doit parcourir s’il sert les deux requêtes sur la même route (en comparaison du transport indépendant de chaque patient).

Une combinaison ODOD (4.3) est donc réalisable si la contrainte (1) est respectée et si le véhicule, quittant la destination du premier patient (le patient i) le plus tard possible (i.e. à l’heure h_i), peut rejoindre le lieu d’origine du second patient puis le déposer à sa destination à temps, i.e. :

$$\underline{\omega}_j \leq h_i + t_{D_i, O_j} + t_{O_j, D_j} + 2 * t_s \leq \bar{\omega}_j \quad (4.5)$$

Si la combinaison est réalisable, la distance entre les deux demandes est définie par la distance parcourue en plus par le véhicule si les deux demandes sont servies par une même route plutôt que par deux routes individuelles :

$$\delta = d_{D_i, O_j} \quad (4.6)$$

Une combinaison OODD (4.4) est réalisable si elle respecte la contrainte (1) et les contraintes (2) et (3) pour le premier patient dans le cas extrême où le second patient embarqué est laissé à destination à la borne supérieure de sa fenêtre de temps :

$$t_{O_i, O_j} + t_{O_j, D_j} + t_{D_j, D_i} + 3 * t_s \leq \zeta \quad (4.7)$$

$$\underline{\omega}_i \leq \bar{\omega}_j + t_{D_j, D_i} + t_s \leq \bar{\omega}_i \quad (4.8)$$

Si cette combinaison est réalisable, la distance entre les deux demandes s'exprime comme l'augmentation de la distance parcourue lorsque les deux demandes sont servies par une même route plutôt que par deux routes distinctes :

$$\delta = d_{O_i, O_j} + d_{D_j, D_i} - d_{O_i, D_i} \quad (4.9)$$

4.3.5 Partitionnement des groupes de demandes

Définition des objets

Au second niveau de partitionnement, les objets considérés sont les groupes de demandes formés lors du partitionnement hebdomadaire des demandes. L'objectif est de réunir en zones les groupes de demandes présentant des paires OD semblables, c'est-à-dire les groupes dont les requêtes à servir sont les plus identiques, au facteur temporel près.

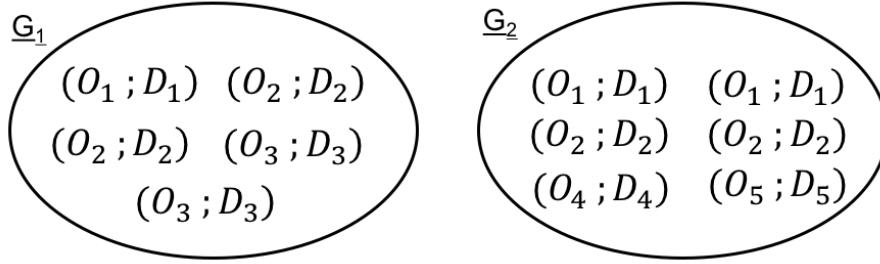
Mesure de distance de l'intersection de deux groupes de demandes

La distance entre deux groupes de demandes est mesurée en fonction de leur intersection. Considérons deux groupes de requêtes G_1 et G_2 ; leur intersection représente une part de chacun de ces groupes relative à leur taille et à leur composition. La proximité de deux groupes peut donc être mesurée comme la moyenne des parts que représente leur intersection pour chacun d'eux. A l'opposé, la distance qui les sépare représente la part moyenne des

demandes qui diffèrent entre eux. Nous la définissons telle que :

$$dist(G1, G2) = 1 - \frac{\frac{|G_1 \cap G_2|}{|G_1|} + \frac{|G_1 \cap G_2|}{|G_2|}}{2} \quad (4.10)$$

La Figure 4.6 illustre un exemple de mesure de la distance entre deux groupes de demandes.



$$G_1 \cap G_2 = \{(O_1; D_1), (O_2; D_2)\}$$

Cette intersection représente 60% des demandes de G_1 et 67% des demandes de G_2 , donc

$$dist(G_1, G_2) = 1 - \frac{0.60+0.67}{2} = 36.5\%$$

Figure 4.6 Exemple de calcul de la distance entre deux groupes de demandes

4.3.6 Description des partitions obtenues

Afin d'apprécier une partition construite, le plus sûr est de la comparer à la partition optimale. Cependant, celle-ci est souvent inconnue (Han et al., 2012). Dans ce cas, l'exploration non supervisée de données s'appuie sur des mesures de qualité pour évaluer les partitions formées. Dans notre contexte, nous voulons observer l'influence du partitionnement des demandes sur le réseau obtenu. Nous utiliserons donc deux mesures de qualité pour caractériser les partitions obtenues.

La première mesure que nous utiliserons est définie par Lee et al. (2007) à partir de l'Erreur Quadratique Moyenne (EQM), sommée sur tous les clusters. Dans chaque cluster, l'EQM mesure la distance entre tous les objets deux à deux. Une pénalité calculée en fonction du bruit est ajoutée, calculée de manière analogue. Cette mesure doit donc être d'autant plus faible que les groupes de la partition sont denses et que la part des objets rejetés dans le bruit est faible. Définissons la notation suivante :

- x, y, w, z sont des points de l'ensemble de données
- C_i est le cluster $i, i \in \{1, \dots, k\}$

- \mathcal{B} représente le bruit de la partition

Cette mesure de qualité s'écrit alors telle que :

$$Q_m = EQM_{total} + Pénalité_{bruit} \quad (4.11)$$

$$= \sum_{clusters} \left(\frac{1}{2 |C_i|} \sum_{x \in C_i} \sum_{y \in C_i} dist(x, y)^2 \right) + \frac{1}{2 |\mathcal{B}|} \sum_{w \in \mathcal{B}} \sum_{z \in \mathcal{B}} dist(w, z)^2 \quad (4.12)$$

La seconde mesure de qualité calcule les coefficients de silhouette $s(o)$ des objets o de la partition obtenue (Han et al., 2011). Ces coefficients apprécient la forme de la partition. Il est possible de mesurer la compacité du groupe auquel l'objet o appartient comme la distance moyenne entre o et les autres objets de son groupe C_i . Ce coefficient a est tel que :

$$a(o) = \frac{\sum_{o' \in C_i, o \neq o'} dist(o, o')}{|C_i| - 1} \quad (4.13)$$

Le coefficient $b(o)$ estime dans quelle mesure o est éloigné des objets des groupes C_j auxquels il n'appartient pas. Dans une partition de k groupes d'objets, il est calculé comme suit :

$$b(o) = \min_{C_j, 1 \leq j \leq k, j \neq i} \left\{ \frac{\sum_{o' \in C_j} dist(o, o')}{|C_j|} \right\} \quad (4.14)$$

Le coefficient de silhouette d'un objet o de la partition est ensuite calculé tel que :

$$s(o) = \frac{b(o) - a(o)}{\max\{a(o), b(o)\}} \quad (4.15)$$

Ce coefficient de silhouette est compris entre -1 et 1. Il permet d'apprécier si les groupes d'une partition ont tendance à être compacts et éloignés les uns des autres (il est alors proche de 1) ou au contraire à être peu compacts et proches les uns des autres (il tend alors vers -1).

A partir de ces deux mesures, nous pouvons donc analyser la forme de chaque partition créée en fonction des paramètres ε et μ . Selon les évaluations des partitions obtenues, nous pourrons choisir les paramètres d'entrée des partitionnements de chaque niveau et évaluer le réseau créé de cette façon.

4.3.7 Création des routes du réseau

Les zones cre es par l'heuristique de double partitionnement définissent des restrictions spatiales de l'ensemble des demandes au sein desquels des routes du réseau vont pouvoir être dessin es. Le réseau final sera l'union des routes trac es dans chacune de ces zones. La création des routes du réseau s'appuie sur les contraintes impos es par le contexte de notre projet : (1) les capacités maximales des véhicules en termes de sièges classiques et d'emplacements de fauteuils roulants, (2) la contrainte de LIFO, (3) la durée maximale autoris e pour le voyage d'un patient et (4) la durée maximale d'une route. Afin de réduire le nombre d'insertions test es, les positions réalisables d'insertion de la destination d'une paire OD dans une route sont d etermin es en fonction de la position d'insertion de l'origine de la paire, de manière à respecter la contrainte de LIFO. Nous reprenons ici les conclusions de Cordeau et al. (2010), selon lesquelles un trajet respecte la contrainte de LIFO si chaque couple origine-destination visité est séparé par un nombre pair de lieux et si aucune destination n'est visit e entre l'origine et la destination d'une même demande. Les combinaisons de positions d'insertion possibles sont r esum es dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 Positions d’insertion possibles pour la destination d’une paire OD en fonction de la position d’insertion de l’origine

Position de l’origine	Positions possibles de la destination
Début de route	<ul style="list-style-type: none"> • juste après l’origine, • ou après chaque destination pour laquelle tous les passagers embarqués ont été débarqués
Fin de route	<ul style="list-style-type: none"> • juste après l’origine
Entre une origine et sa destination	<ul style="list-style-type: none"> • juste après l’origine
Entre deux destinations	<ul style="list-style-type: none"> • juste après l’origine
Entre deux origines O_1 et O_2	<ul style="list-style-type: none"> • toute position pour laquelle les trois conditions suivantes sont réunies : <ul style="list-style-type: none"> ◦ après la D_2, ◦ avant D_1, ◦ après une destination
Entre une destination D_1 et une origine O_2	<ul style="list-style-type: none"> • toute position pour laquelle les trois conditions suivantes sont réunies : <ul style="list-style-type: none"> ◦ après D_2, ◦ avant la destination de la dernière origine se trouvant avant O_2 et dont la destination n’a pas encore été visitée, ◦ après une destination

Le sous-réseau d’une zone est créé en parallèle par insertion successive des demandes dans des routes respectant les contraintes du problème. Instinctivement, nous pouvons supposer que si nous privilégions le service des requêtes dont les paires OD sont les plus récurrentes lors de la construction du réseau, nous accroîtrons son taux de prise en charge de la demande lors de la phase d’affectation des patients. Pour tendre vers un tel résultat, nous avons choisi d’insérer les demandes dans l’ordre décroissant de la fréquence d’apparition de leurs paires OD dans chaque zone. Les fréquences d’occurrence de deux paires OD sont comparées selon le nombre de groupes de demandes dans lesquels elles se présentent, puis le nombre moyen de fois où elles apparaissent dans un groupe. Afin de réduire les temps de calcul lors de la phase d’affectation des patients, une étape réduit ensuite le nombre de routes obtenues dans

chaque zone du réseau. L'Algorithme 3 illustre l'heuristique imaginée pour créer les routes du réseau. Elle s'inspire du principe suivi par la troisième heuristique de Benavent et al. (2015). Les sous-sections suivantes présentent les fonctions d'insertion d'une demande dans les routes d'une zone et de diminution du nombre de routes.

Algorithme 3 : Heuristique de création des routes du réseau

```

1 Données : zones, dictionnaires de paramètres
2 Résultat : Réseau de routes
3 pour chaque zone faire
    // I. création des routes
    4   pour chaque paire OD de la zone dans l'ordre décroissant des fréquences
        d'occurrence faire
        5     Insérer les demandes ayant cette paire OD dans les routes de la zone;
        // II. réduction du nombre de routes
        6     Réduire le nombre de routes du sous-réseau;
    7 Fusionner tous les sous-réseaux pour obtenir le réseau final

```

Construction des routes par insertion parallèle des demandes

Itérativement pour chaque paire OD, toutes les demandes correspondantes sont insérées dans les routes de la zone. La fonction réalisant cette insertion est décrite par l'Algorithme 4. Chaque demande est insérée dans la première route qui peut l'intégrer en respectant les contraintes suivantes :

1. LIFO : pour chaque demande servie par la route un nombre pair de lieux sépare l'origine de la destination.
2. précédence : l'origine de chaque demande est visitée avant sa destination
3. capacité en terme de sièges classiques et d'emplacement de fauteuils
4. durée maximale du voyage de chaque patient
5. durée maximale de la route dessinée
6. arrivée à destination du patient à l'intérieur de sa fenêtre de temps

Pour réduire le temps de calcul nécessaire, toute contrainte non respectée entraîne l'arrêt des tests et le rejet de la route. Les contraintes de LIFO et de précédence sont les premières testées, car elles nécessitent seulement un parcours des demandes insérées dans la route alors que les autres contraintes nécessitent de calculer des indicateurs de capacité et de temps à

chaque lieu visité.

Si la route est réalisable, son coût est calculé en fonction de sa longueur. Parmi toutes les combinaisons d'insertion testées, la route réalisable de coût minimum est conservée comme la route de la zone qui intègre la demande traitée. Si une requête n'a pu être intégrée dans aucune route, une nouvelle route l'incluant est créée dans la zone.

Algorithme 4 : Fonction d'insertion d'une demande dans le réseau de routes d'une zone

```

1 Données : demande à insérer, ensemble des routes d'une zone, dictionnaires de paramètres
2 Résultat : Ensemble des routes de la zone mis à jour
3 pour chaque route de la zone faire
  4 si L'insertion de la demande dans la route respecte les contraintes (1) à (6) alors
    5 Insérer la demande dans la route;
    6 arrêt;
  7 si la demande n'a été insérée dans aucune route alors
    8 Créer une nouvelle route qui sert la demande;

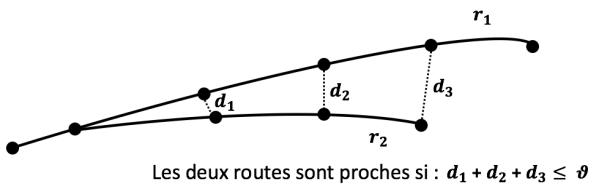
```

Réduction du nombre de routes dans le réseau

Les routes de chaque zone sont construites en parallèle en traitant les demandes dans un ordre précis. Imaginons deux groupes de requêtes tels pour chaque demande du premier groupe, il existe une demande de paire OD identique, mais dont le rendez-vous a lieu exactement une semaine plus tard (l'organisation des traitements rend possible cette configuration) dans le second groupe, et réciproquement. Alors par définition des heuristiques et mesures précédentes, il existe une zone incluant ces deux groupes de demandes, puis un ensemble de routes R_i sert les demandes de chaque groupe G_i de cette zone. Négligeons le caractère temporel des routes obtenues. Alors par construction de l'heuristique de création des routes, $R_1 = R_2$. Pour connaître les routes de la zone, il suffit donc de connaître les routes de l'un des deux groupes de demandes. La fonction de réduction du nombre de routes vise ainsi à supprimer tous les doublons de routes. Pour chaque couple de routes du sous-réseau d'une zone, si la première est incluse dans la seconde, nous la supprimons.

Cette fonction permet de réduire la taille du réseau d'un facteur 10 en moyenne. Cependant, les réseaux dessinés comportaient encore trop de routes. A cause de cela, l'heuristique d'affectation des patients était trop longue à procéder, même sur des instances relativement petites (nous avons arrêté des tests d'affectation de 3 000 demandes après plus de 24h de processus). Pour réduire encore la taille du réseau, nous avons défini une seconde étape de

réduction des routes. Définissons la proximité de deux routes comme la somme des distances entre chaque couple de lieux que chacune visite. D'une part, si deux routes visitent des lieux proches, nous pouvons instinctivement dévier la plus longue pour servir les demandes de la plus courte. D'autre part, éliminer en priorité les routes qui servent les demandes les moins fréquentes permettra de dévier moins de routes lors de la phase d'affectation des patients. Pour conclure sur la proximité de deux routes, nous regardons la distance minimale qui sépare les lieux de chacune d'elles. Cette distance est représentée sur la Figure 4.7. Le paramètre ϑ représente la somme de distances maximale, en dessous de laquelle nous considérons que deux routes sont proches. Ces deux considérations ont complété la réduction du réseau. L'union des sous-réseaux de routes obtenus ainsi pour toutes les zones constitue le réseau final.



4.4 Phase II : Affectation des demandes

Une fois le réseau dessiné, nous entamons une phase d'affectation des demandes pour évaluer la qualité de son service. Souvenons-nous que lors de l'étape de partitionnement des demandes, une partie des requêtes a nécessairement été rejetée dans le bruit. Ces requêtes ne peuvent certainement pas être servies par les routes du réseau qui ont été tracées à partir des paires OD des demandes qui avaient pu être regroupées. De plus, le volume de la demande de transport de patients est relativement faible en comparaison du trafic transitant par un réseau de transport public classique. Nous pouvons donc supposer que les véhicules parcourant les routes ne seront pas toujours utilisés à leur pleine capacité si nous nous limitons à servir les requêtes dont les paires OD sont visitées exactement par les routes du réseau. Dans ce cas, ces véhicules seraient capables servir des requêtes nécessitant une légère déviation de leur route, et ces déviations pourraient se révéler profitables, car le rendement du réseau pourrait s'en trouver augmenté. Nous avons donc élaboré une méthode d'affectation des patients aux routes du réseau à deux étapes. La première privilégie l'insertion exacte de chaque requête dans les routes du réseau. La seconde réalise un nouvel essai pour les requêtes qui n'ont pas pu être intégrées aux routes originelles en les déviant. Les demandes de transport qui ne peuvent pas transiter par le réseau à l'issue de ces deux étapes sont confiées à une flotte de

transporteurs externes, qui transportent les patients individuellement.

4.4.1 Insertion des demandes dans les routes originelles du réseau

A cause de la contrainte de LIFO, les routes peuvent réaliser des sous-tours. Une route peut donc visiter plusieurs fois l'un des lieux de la paire OD d'une demande. Cela correspond, sur la route, à plusieurs positions possibles pour l'insertion de la demande. Pour chaque requête que la boucle essaie d'insérer dans les routes du réseau, nous souhaitons que les patients passent le moins de temps possible à bord du véhicule. Un couple de positions d'insertion d'une demande est donc d'autant meilleur que la position de l'insertion de l'origine et de la destination sont proches. Pour chaque parcours de la route déjà programmé et jusqu'à ce qu'une affectation soit trouvée, les insertions possibles sont testées. Si les contraintes de LIFO, de capacité et de durées maximales de voyage et de la route sont respectées, les horaires de passage du véhicule à chaque lieu visité sont ajustés de la manière suivante. Nous calculons pour chaque demande le laps de temps existant entre l'heure de débarquement du patient à destination et la borne supérieure de la fenêtre de temps correspondante. Le laps de temps minimal constitue le délai critique. L'heure de départ du parcours de la route est ajusté à partir de la destination correspondante.

Si une demande ne peut être intégrée à aucun parcours déjà programmé d'une route, mais que sont origine puis sa destination sont exactement visitées par cette route, un nouveau parcours de la route est programmé pour la servir. Chaque requête n'ayant pu être insérée dans aucune route lors de la première étape d'affectation des demandes est étudiée une nouvelle fois lors de la seconde, qui cherche une route qui pourrait être déviée pour la servir. L'entreprise *GIRO*, leader sur le marché des logiciels de planification et d'organisation des opérations pour les transporteurs publics et les organismes postaux, considère par expérience qu'il faut chercher, malgré les déviations, à suivre le plus possible le chemin initial. Il est donc préférable de réaliser des petits détours en revenant régulièrement sur le trajet primaire plutôt que de s'en éloigner trop et d'y revenir en fin de parcours. La recherche d'insertion d'une demande par déviation de routes est donc menée en privilégiant l'insertion qui demandera la déviation minimale de la route. Pour conserver un certain niveau de qualité de déplacement pour les passagers (qui s'inquiètent d'une déviation trop importante du plus court chemin entre leur origine et leur destination) nous nous interdirons d'imposer au chemin initial des détours de plus d'une quinzaine de minutes. Si une requête nécessite pour toutes les routes du réseau une déviation supérieure à cette déviation maximale Δ , elle est directement transférée aux compagnies de transport. L'insertion des demandes dans les routes initiales du réseau est illustrée par le processus représenté sur la Figure 4.8 et par l'exemple qui la suit.

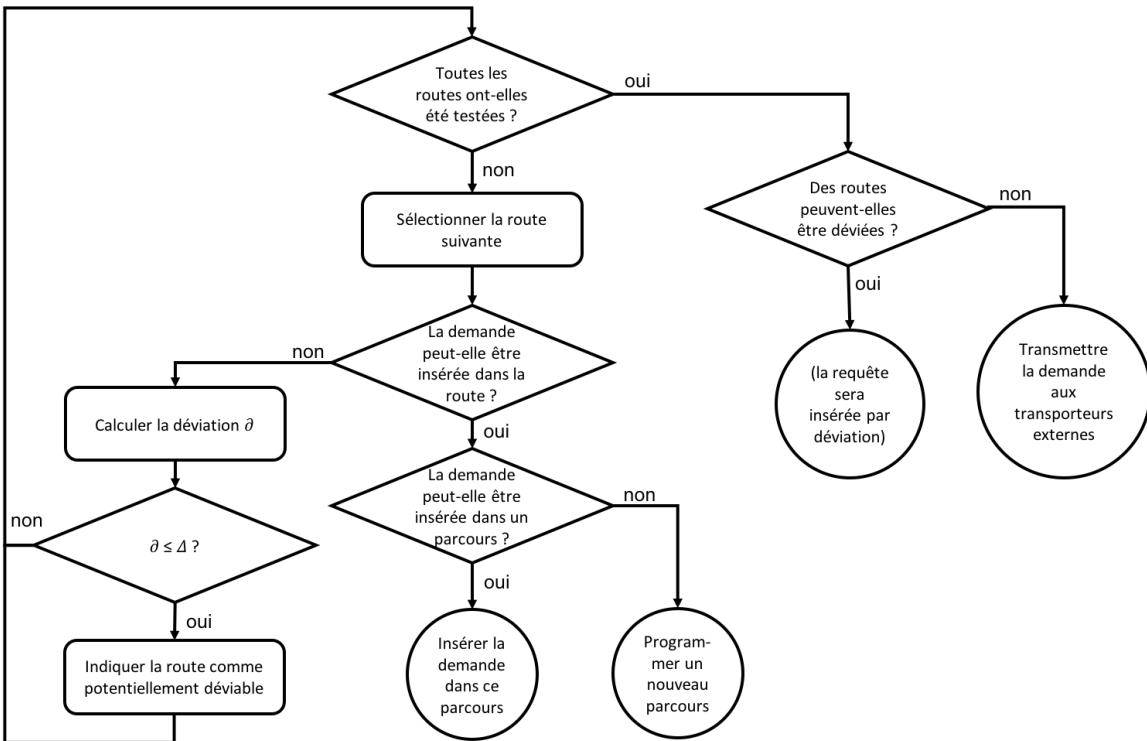


Figure 4.8 Processus d'affectation d'une demande dans les routes initiales du réseau

Exemple

Considérons un réseau composé des deux routes suivantes, où les entiers représentent les lieux visités par les routes :

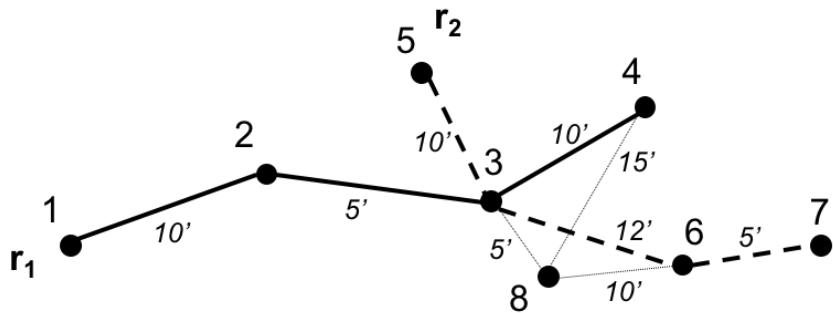


Figure 4.9 Réseau de deux routes (exemple)

Considérons les demandes :

- $\psi_1 = (1, 2, 10h)$;
- $\psi_2 = (3, 4, 10h30)$;

- $\psi_3 = (1, 2, 15h)$;
- $\psi_4 = (3, 8, 16h30)$.

L'heuristique d'affectation de ces demandes aux routes originelles du réseau suit alors les étapes suivantes :

1. ψ_1 peut être affectée à la route r_1 ; aucun parcours n'étant planifié pour cette route, nous programmons le parcours p_1 , dont le départ à 9h35 permet de rejoindre le lieu 2 à 9h50 (borne supérieure de la fenêtre de temps) ;
2. ψ_2 peut être affectée à la route r_2 ; et insérée dans le parcours programmé p_1 (le patient arrivera au lieu 4 à 10h15 (nous tenons compte des 5 minutes de temps de service), soit à l'intérieur de sa fenêtre de temps) ;
3. ψ_3 peut être affectée à la route r_1 , dans un nouveau parcours p_2 (départ à 14h35), car l'insérer dans le parcours p_1 ne permettrait pas de rejoindre le lieu 2 à l'intérieur de sa fenêtre de temps ;
4. ψ_4 a pour destination le lieu 8, qui n'est pas un noeud du réseau. Sélectionnons d'abord la route r_1 ; ψ_4 ne peut donc pas y être insérée. La déviation qu'il faudrait imposer à la route r_1 pour pouvoir y insérer ψ_4 serait de $5 + 10 = 15$ minutes, car il faudrait parcourir les lieux 1, 2, 3, 8, 6 et 7. Cette déviation n'excède pas la déviation maximale autorisée (15 minutes), donc on indique que la r_1 peut être déviée pour servir ψ_4 . Considérons ensuite la route r_2 ; le parcours nécessaire pour servir ψ_4 serait 5, 3, 8, 4, et la déviation nécessaire de $5 + 15 = 20$ minutes. Nous ne pouvons donc pas dévier la route r_2 pour lui affecter la demande ψ_4 . A l'issue de cette itération, au moins une route peut être déviée pour affecter ψ_4 donc la demande sera réétudiée lors de l'exécution de l'heuristique d'affectation des demandes par déviation des routes (sinon, elle aurait été transmise aux compagnies de transport externe).

4.4.2 Insertion des demandes dans les routes par déviation

Nous avons construit notre heuristique d'affectation des demandes par insertion par déviation des routes en nous inspirant de la deuxième heuristique d'insertion écrite par (Solomon, 1987) pour les problèmes de tournées de véhicules avec fenêtre de temps. Cette heuristique insère les clients à visiter dans les routes de façon à minimiser les coûts d'insertions. Ces coûts sont calculés en fonction de la distance parcourue et du temps total de parcours de la route si l'insertion est réalisée. Nous avons adapté cette heuristique pour prendre en compte le fait que l'insertion d'une demande signifie l'insertion d'une origine et d'une destination dans la route, en respectant les contraintes de LIFO et de fenêtres de temps. Notre heuristique est

donc telle que pour chaque demande sélectionnée dans l'ordre croissant des distances aux routes :

1. la route la plus proche spatialement de la demande est choisie
2. les couples de positions d'insertions possibles de O et D dans la route sont déterminées pour respecter la fenêtre de temps en D et la contrainte de LIFO
3. la demande est insérée suivant le premier couple d'insertion respectant les contraintes de capacité et de durées maximales de la route et des voyages des demandes servies par elle
4. si la demande ne peut pas être insérée aux positions observées en (2), nous retournons en (1); si aucune route ne peut plus être déviée, la demande est confiée aux transporteurs externes

CHAPITRE 5 EXPÉRIMENTATION ET RÉSULTATS

Ce chapitre présente la base de données à partir de laquelle nous avons pu réaliser nos tests. Nous expliquons ensuite comment nous avons fixé les paramètres de la méthode de résolution et proposons enfin une analyse des résultats obtenus.

5.1 Cadre de l'étude de cas : la construction d'un réseau de transport adapté

5.1.1 Analyse des données et estimations des entrées manquantes

Afin de nourrir les modèles développés, nous avons recueilli lors de nos visites des établissements les bases de données détaillant la demande de transport non urgent. Malheureusement, celles-ci étaient très incomplètes lorsqu'elles existaient. En nous appuyant sur les données transmises par les compagnies de transport, nous avons évalué les données manquantes pour constituer une base de données plausible et suffisamment représentative des déplacements réalisés au sein des CIUSSSs. A partir des données que nous avons pu reconstruire, nous avons arrêté la période étudiée aux 25 semaines pleines (du lundi au dimanche) s'étendant du 4 avril au 28 septembre 2016. Cette section présente les données dont nous avons pu disposer et la manière dont nous avons complété les valeurs manquantes.

Données des compagnies de transport adapté sans et avec support médical

Les compagnies de transport adapté sans et avec support médical nous ont fourni des extractions de leurs bases de données, rassemblant les demandes de transport qui leur ont été soumises sur la période choisie avec le détail nécessaire. Ces données représentent 54.7% des données recensées. Le graphe 5.1 présente la répartition des heures des rendez-vous des patients, dont les déplacements ont été organisés par ces prestataires externes. Pour chaque jour de la semaine est représenté le nombre moyen de rendez-vous programmés à chaque quart d'heure. Nous disposions, dans les bases de données des transporteurs externes, des horaires d'arrivée des patients à leurs destinations. Nous avons cependant considéré que la précision maximale possible pour fixer un rendez-vous était le quart d'heure, et avons considéré comme heures de rendez-vous l'arrondi au quart d'heure supérieur des heures connues. Sur le graphique, les lignes horizontales en pointillés marquent la valeur moyenne de la demande de la journée figurée dans la même couleur. Nous pouvons observer que la demande est en moyenne plus forte le mardi et le jeudi, et très faible en fin de semaine (en comparaison des jours ouvrables). Les déplacements sont très peu nombreux la nuit car il s'agit de retours de

rendez-vous tardifs et parce que les horaires de services de ces compagnies s'étendent de 5h à minuit. Les patients se déplacent pour arriver à destination entre 7h et 20h environ. La demande présente six pics : autour de 11h, 13h, 13h30, 14h et 16h. La demande atteint alors jusqu'à six fois la demande moyenne de la journée. Autour de 9h30 et de 18h, elle double par rapport à la demande moyenne.

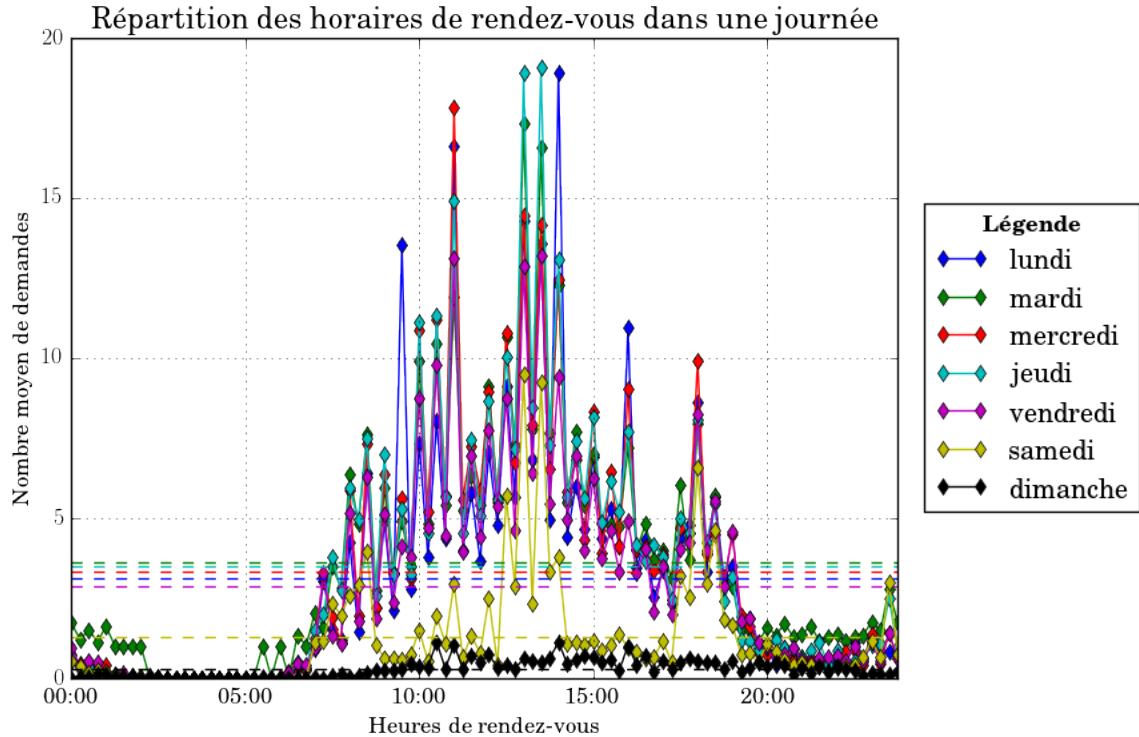


Figure 5.1 Répartition des horaires des rendez-vous dont les déplacements sont servis par les compagnies de transport adapté sans et avec support médical dans la journée

Les déplacements pour lesquels les CIUSSSs font appel aux services de ces compagnies sont générés par tout type de rendez-vous. Leur distribution peut donc être considérée comme représentative de la répartition de la demande inconnue. Nous avons utilisé ces données, obtenues auprès des prestataires de service externes, pour estimer les dates et les horaires de rendez-vous lorsqu'ils étaient inconnus. Comme les séries de ces données temporelles ne suivent aucune loi de probabilité classique, nous avons reconstitué des séries respectant les distributions de chaque jour grâce au logiciel *Minitab*.

Estimation des valeurs manquantes

Selon les moyens de transport utilisés, les données disponibles étaient plus ou moins complètes. Pour certaines flottes internes, seuls des tableaux de l'année précédente étant disponibles, nous les avons transposés à la période retenue pour notre étude. De leur côté, les compagnies de taxis ordinaires se sont entendues avec les CIUSSSs sur un fonctionnement par coupons. Chaque établissement possède des billets, qui sont donnés aux chauffeurs de taxi lors des déplacements et sur lesquels ceux-ci peuvent préciser le montant de la course. Les seules statistiques disponibles pour ce moyen de transport étaient donc des recensements réalisés par les agents administratifs des établissements ou des unités rencontrés. Ces tableaux comportaient généralement les dates des transports et leurs destinations. Selon les informations manquantes, nous avons procédé comme suit pour estimer les données.

Lorsque seul un volume de transport nous était donné, nous avons estimé les types de déplacements réalisés par les patients des établissements concernés ainsi que leurs destinations majeures avec l'aide des agents administratifs. Nous avons ensuite déterminé un volume de trajets plausible grâce à la volumétrie des bases de données des compagnies de transport adapté. Les parts du volume total que représentent les trajets simples et les allers-retours suivent aussi celles de leurs bases de données (en termes de réseau), ainsi que les indications des commis (en termes de volumes). Lorsque nécessaire, nous avons estimé les dates et les horaires des transports comme expliqué plus haut.

En ce qui concerne le matériel requis lors des transports, nous nous sommes basés pour l'estimer sur les descriptions des patients que le personnel rencontré lors des entrevues a pu nous donner. Les critères retenus pour le choix du type de véhicule réservé pour le déplacement nous ont également aidés. Par exemple, les commis ont pu nous décrire le type de patients dans leur CHSLD et la part approximative de patients utilisant chaque type de matériel. Il est aussi certain que les patients empruntant des taxis ordinaires n'utilisent pas de fauteuil roulant. Pour les données d'un CIUSSS, les demandes de transport en taxi adapté avec support médical ne précisait pas le type de fauteuil dans lequel se déplaçaient les patients. Selon les entrevues réalisées, il ne peut s'agir que de fauteuils hors dimension, qui appartenaient aux patients car ils n'ont pas été loués à la compagnie. Cependant, ce prestataire facture plus cher la prise en charge d'un patient si celui-ci circule en fauteuil gériatrique et nous ne pouvions pas estimer précisément quelle part de ces patients a exigé ce type de fauteuil. Nous avons donc choisi de conserver l'information d'un FHD de type inconnu et d'évaluer la variation du coût total de service selon les cas extrêmes où tous ou aucun de ces fauteuils seraient des fauteuils gériatriques. Les autres types de matériel sont utilisés dans peu de transports et n'influencent pas le calcul de la capacité nécessaire pour transporter un patient. Nous les

laissons donc de côté.

Afin de lier les trajets d'un aller-retour, nous avons estimé une durée de rendez-vous. La seule information disponible étant qu'un rendez-vous dure entre trente minutes et quatre heures, nous avons réalisé pour chaque trajet concerné un tirage aléatoire du temps passé par le patient à destination.

A partir des données recueillies et estimées, nous avons constitué une base de données recensant 77 314 demandes de transport servies sur une période de vingt-cinq semaines pleines de l'année 2016 : du 4 avril au 28 septembre 2016. L'analyse qui suit propose, après quelques statistiques globales, trois axes : la distribution temporelle puis spatiale de la demande, la répartition du matériel utilisé lors des transports et enfin les coûts engendrés par le transport au sein des CIUSSSs.

5.1.2 Analyse de la base de données constituée

Statistiques générales

La base de données que nous avons construite à partir des informations recueillies se veut représentative des déplacements réalisés par les patients à la charge des CIUSSSs. Le tableau 5.1 en résume quelques statistiques générales et la part des données correspondant à chaque CIUSSS. Une présentation de chaque attribut des demandes important dans ce projet fait suite à ces premiers chiffres.

Tableau 5.1 Statistiques générales de la base de données utilisée

	CSI	EDI	ODI	NDI	TOTAL
Nombre de demandes	32 988	12 409	18 003	13 914	77 314
Part des demandes	43%	16%	23%	18%	100%
Coût total	896 520\$	504 665\$	495 545\$	452 355\$	2 349 090\$
Part du Coût total	38.2%	21.5%	21%	19.3%	100%

Les établissements font actuellement appel à la compagnie de transport adapté sans support médical pour déplacer le plus grand nombre de leurs patients (44%). Les compagnies de taxi ordinaires sont également très sollicitées (31%). Le reste des déplacements se répartit entre les flottes internes et le transport médical. La STM adapté correspond aux trajets réalisés par les patients qui ont des rendez-vous réguliers tels que les traitements d'hémodialyse. Cette répartition des moyens de transport est représentée sur le diagramme à secteurs 5.2.

Selon l'équivalence des niveaux de service précisée plus haut, cette répartition de l'utilisation des flottes de transport disponibles correspond à la répartition des niveaux de service nécessaires lors du transport des patients, (Figure 5.3). Les niveaux de services majoritairement nécessaires sont le transport ordinaire et le transport adapté sans support médical (44% des transports chacun).

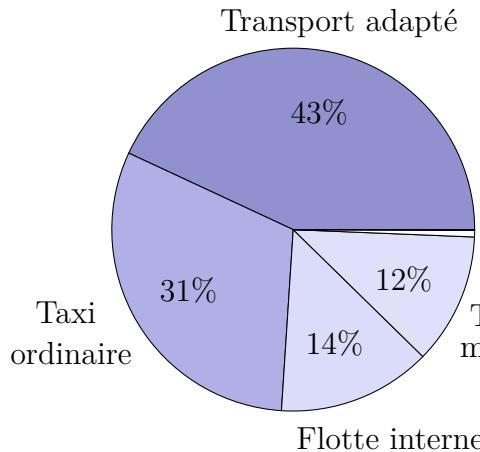


Figure 5.2 Moyens de transport actuels

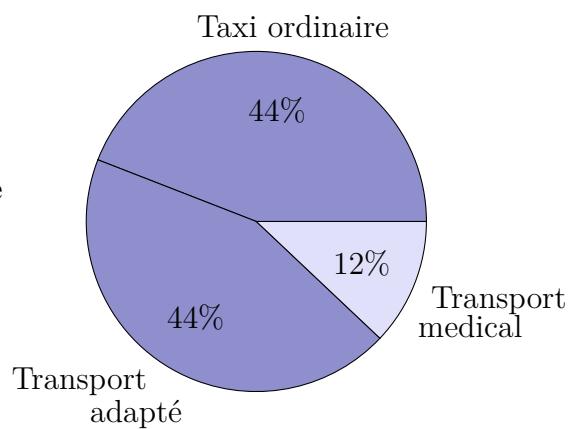


Figure 5.3 Niveaux de services équivalents

Distribution temporelle de la demande

La demande en transport varie irrégulièrement au cours des mois, comme le figure l'histogramme 5.4 (les demandes des premiers jours d'avril et des derniers jours de septembre ont été prises en compte pour ce graphe). Le nombre de requêtes est en moyenne de 13 561 demandes mensuelles (écart type de 602 demandes). Le mois le moins achalandé est le mois de juillet, au cours duquel 12 740 demandes ont été enregistrées (6% de moins que la demande moyenne). Le mois présentant le plus grand nombre de demandes est le mois d'avril, qui présente 14 252 requêtes soumises (5% de plus qu'un mois moyen). La demande varie donc au cours des mois.

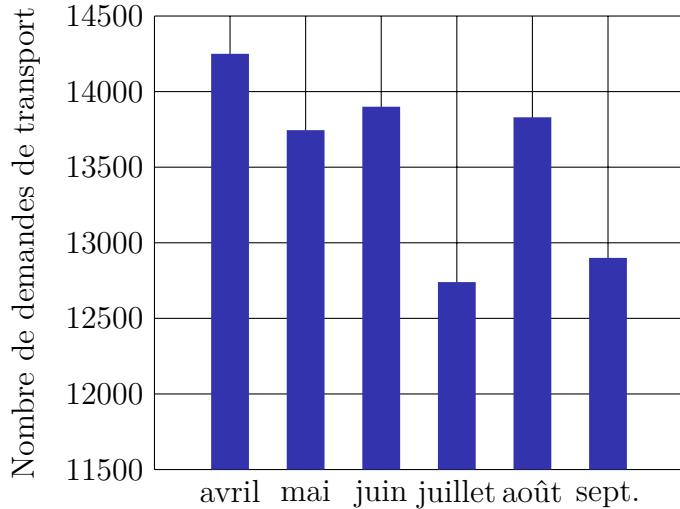


Figure 5.4 Répartition de la demande sur les mois

La demande en transport suit une saisonnalité hebdomadaire, comme nous pouvons l'observer sur le graphique 5.5. Nous retrouvons l'évolution observée pour la demande servie par les transporteurs externes. Le nombre de déplacements réalisés le samedi et le dimanche correspondent respectivement à environ 40% et 8% du volume moyen de la demande lors d'un jour ouvrable.

Sur le graphique 5.5, la semaine moyenne est représentée en pointillés noirs. Selon les jours, l'écart type varie entre 27 et 61 demandes en semaine (ce qui représente entre 4 et 12% de la demande moyenne d'une journée). Il est autour de 12 demandes en fin de semaine, ce qui représente 6% de la demande le samedi, et près du quart de la demande dominicale (la part que représente la variation est d'autant plus grande que la quantité de déplacements est faible le dimanche).

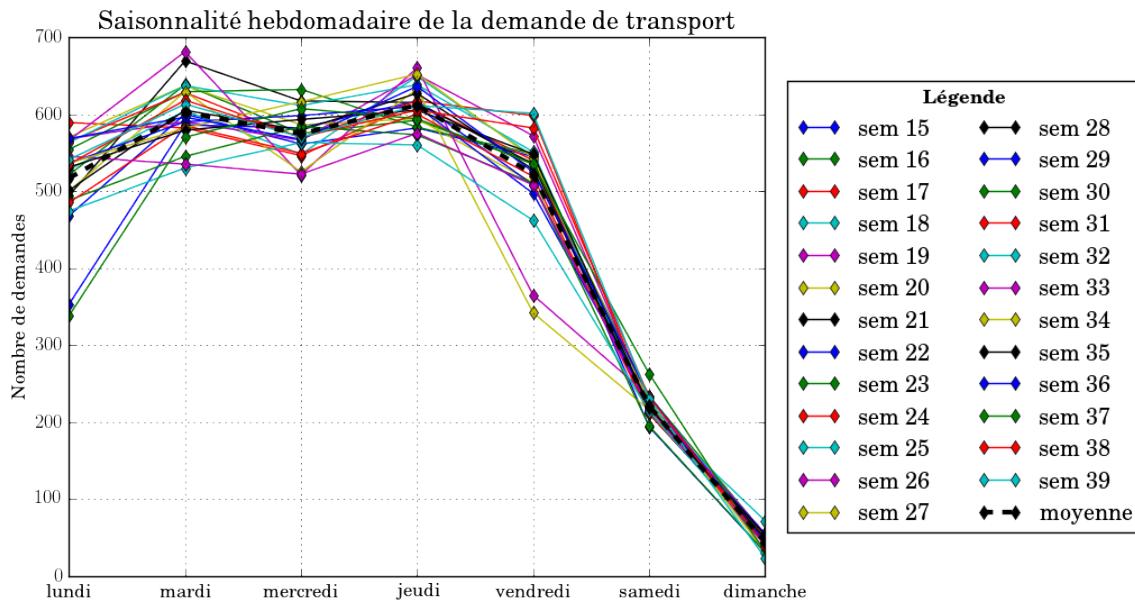


Figure 5.5 Saisonnalité hebdomadaire de la demande

Au cours d'une journée, les déplacements des patients s'organisent majoritairement pour des rendez-vous ayant lieu entre 7h00 et 22h (80% des déplacements concernent des rendez-vous planifiés entre 9h30 et 18h30), tel que présenté sur le graphe 5.6. L'évolution de la demande reconstituée suit celle de la demande servie par les transporteurs externes.

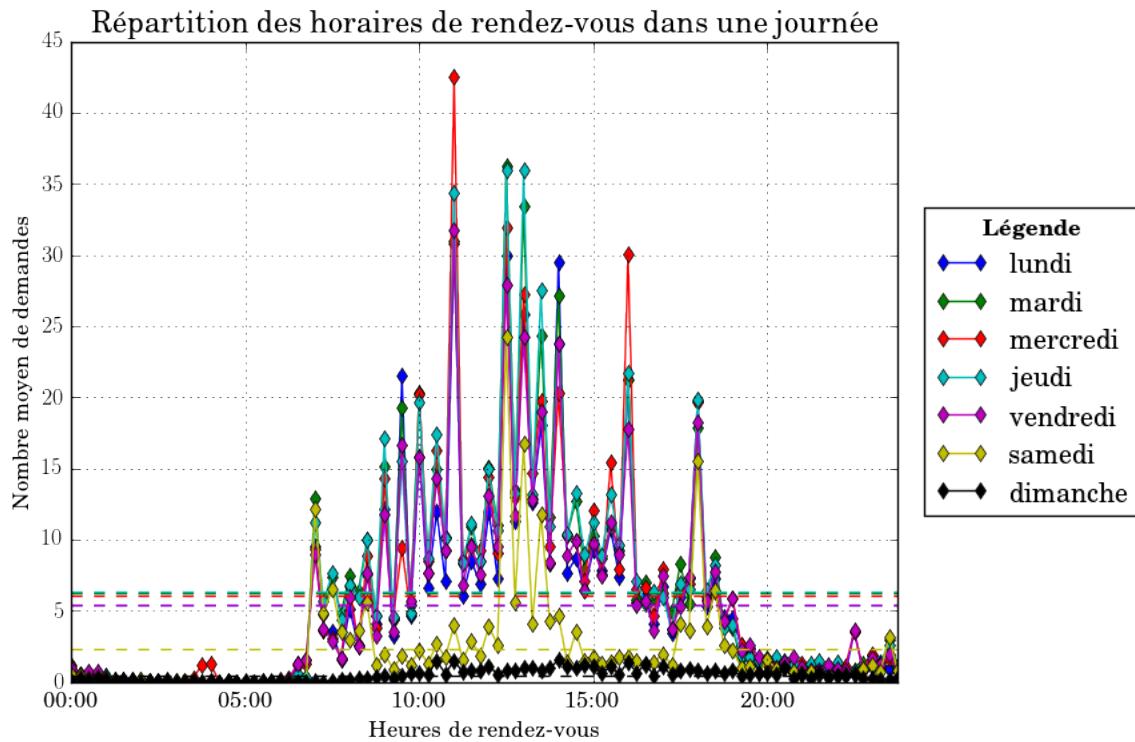


Figure 5.6 Répartition des horaires de rendez-vous au cours de la journée

Les demandes apparues pendant ces vingt-cinq semaines constituent 8 369 paires OD, qui apparaissent entre 1 et 579 fois sur la période étudiée. Cela correspond à une occurrence entre 0.04 et 23.16 fois par semaine soit entre 0.006 à 3.31 fois par jour en moyenne. Comme illustré par l'histogramme 5.7, quarante-huit paires OD correspondent à un trajet requis au moins sept fois par semaine. Ces paires OD sont concentrées dans un réseau de vingt-huit noeuds. En effet, pour trente-quatre de ces paires OD, les origines et les destinations se correspondent à l'inverse.

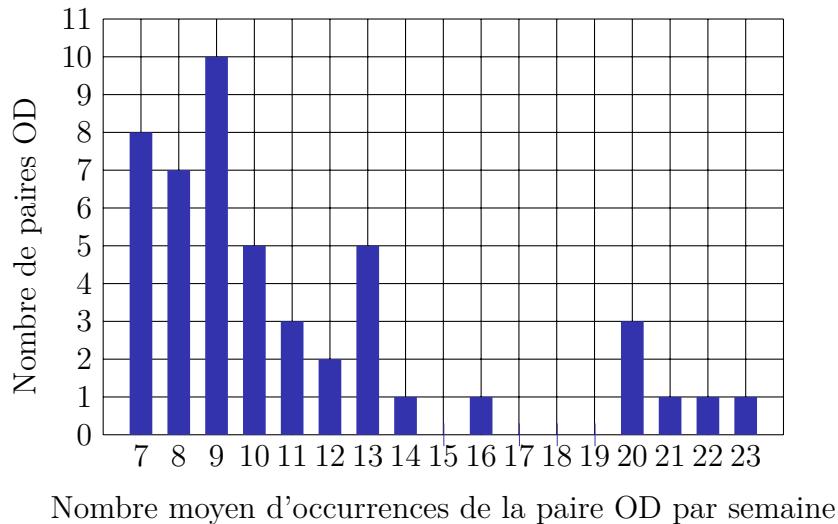


Figure 5.7 Nombre de demandes répétées au moins sept fois par semaine en moyenne

Cette fréquence d'apparition plus importante de certaines paires OD s'explique par des rendez-vous récurrents et planifiés sur le long terme des patients, tels que les traitements pour l'hémodialyse ou en hôpital de jour et les activités en centre de jour. Ce type de déplacement représente 22% des requêtes de la base de données. Des corridors de service existent aussi entre certains établissements, qui se transféreront automatiquement les patients selon les spécialités médicales nécessaires. S'ils semblent souvent plus le fruit d'une habitude que celui de l'application d'une entente formelle, ces corridors de service privilégient les déplacements entre certains établissements et, en ce sens, influencent l'organisation des trajets. La majorité des transports récurrents observés est ainsi réalisée entre des domiciles et l'hôpital de Verdun (HV - 36%), le centre de jour Dorval-Lachine-LaSalle (CJ DLL - 26%) et l'hôpital de jour de Dorval-Lachine-LaSalle (HJ DLL - 15%). Ces 3 centres sont donc l'objet de 76% des transports réguliers.

Cette considération nous amène à observer les origines et destinations majeures du réseau.

Origines majeures du réseau : Parmi les 3314 lieux du réseau, 1193 constituent des origines de déplacements (36% des lieux). 80% des trajets ont pour origine 73 lieux du réseau parmi les 1193 lieux d'origine (6% de ces lieux).

Destinations majeures du réseau : 3056 lieux du réseau constituent des destinations de trajets, ce qui représente 92% des nœuds. 80% des trajets ont pour destination l'un des 169 lieux de destination les plus rejoints (6% des destinations).

Nœuds majeurs du réseau : Définissons les six noeuds les plus actifs du réseau comme étant ceux qui sont l'origine ou la destination d'au moins 6% des trajets réalisés. Ces lieux sont l'hôpital de Verdun, l'hôpital Maisonneuve-Rosemont (HMR), l'hôpital Sacré-coeur-de-Montréal (HSCM), l'hôpital Santa Cabrini (HSC), le Centre de jour DLL et le CHSLD Champlain (CHSLD C). La part des trajets dont ils constituent l'origine ou la destination est résumée dans le tableau 5.2. Ils sont à la fois parmi les origines et les destinations les plus actives du réseau.

Tableau 5.2 Les six nœuds les plus actifs du réseau

	HV	HMR	HSCM	HSC	CJ DLL	CHSLD C
Nombre demandes (origine)	8 023	6 376	4 418	3 540	2 500	2 093
Part des demandes	10%	8%	6%	5%	3%	3%
Nombre demandes (destination)	6 783	3 743	2 692	829	2 500	2 192
Part des demandes	9%	5%	3%	1%	3%	3%

Distribution spatiale de la demande

Les distances (calculées à vol d'oiseau) des trajets varient entre 17m et 480km. Elles sont distribuées comme le représente le diagramme 5.8. La médiane se trouve à 4km, et 75% des trajets ont une distance à vol d'oiseau inférieure ou égale à 7,2km. La distance moyenne d'un trajet est 5,4km, pour un écart type de 6,4km. La grande majorité des trajets est donc de moins de 8km. En comparaison, les dimensions maximales de l'Ile-de-Montréal sont d'environ 50km de long et 16km de large (Montréal and Statistiques-Canada).

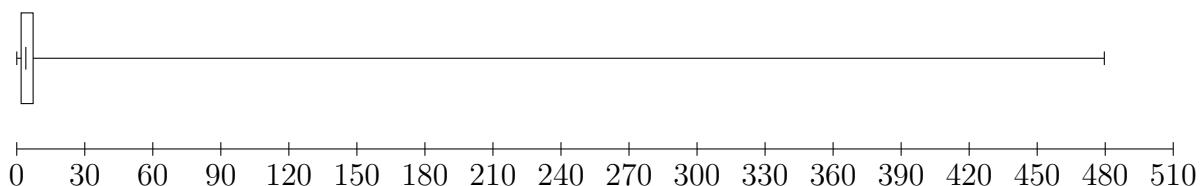


Figure 5.8 Distribution de la distance à vol d'oiseau des trajets (km)

Matériel utilisé

D'un point de vue matériel, un peu plus de la moitié des trajets (54%) nécessite du matériel médical. Les patients utilisent pour se déplacer un fauteuil roulant et un nombre minime d'entre eux requièrent une bonbonne d'oxygène (771 demandes) ou un moniteur (42 demandes) en plus. La répartition de l'utilisation des fauteuils est représentée sur le diagramme secteur 5.9.

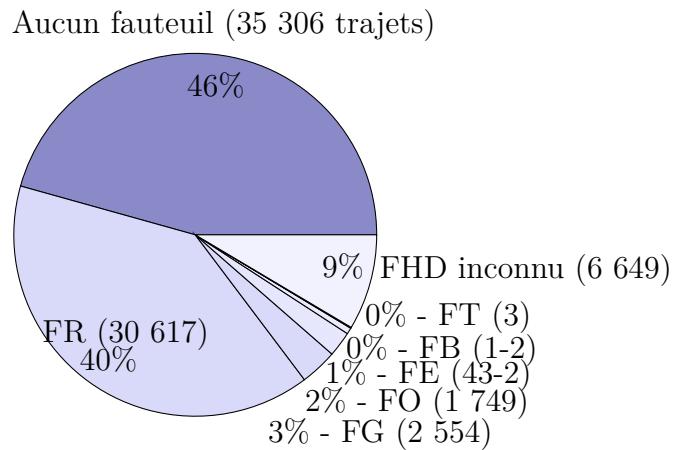


Figure 5.9 Types de fauteuils utilisés lors des transports

Coûts engendrés par les transports des patients

Lorsque les déplacements des patients sont confiés aux compagnies de transport externe, les tarifs dépendent du niveau de service et de la distance parcourue. Les capacités des véhicules et les tarifs de prise en charge offerts par les différents transporteurs externes sont résumés dans le tableau 5.3. L'analyse des coûts suivante se concentre sur la variation des coûts selon les moyens de transport empruntés par le patient, la distance parcourue et le matériel utilisé. Les autres facteurs de coûts sont négligés dans cette étude. Dans les tableaux suivants, le terme PEC signifie *prise en charge*.

Tableau 5.3 Caractéristiques du service des transporteurs externes en 2016.

	Taxi Médical ⁽¹⁾	Taxi Adapté	Taxi Ordinaire ⁽⁵⁾
Capacité si FHD	1FHD + 1FR	-	-
Capacité si FR	3FR	3FR	-
Capacité siège classique	3	3	3
Heure début de service	6h	5h	7h
Heure fin de service	0h	0h	23h
Tarif PEC intra-territorial	59.95\$	15.65\$	18\$
Tarif km intra-territorial	3.99\$	1.48\$	1.7\$
Tarif PEC extra-territorial ⁽⁰⁾	69.95\$	10\$(⁽³⁾)	18\$
Tarif km extra-territorial ⁽⁰⁾	3.99\$	2\$(⁽³⁾)	1.7\$
Tarif PEC à l'étage	0\$	0\$	7\$
Tarif Destination à l'étage	0\$	0\$	7\$
Augmentation PEC si fauteuil gériatrique	10\$	-	-
Tarif 2e client	40\$	15.65\$	-
Tarif 2e homme	59.95\$	40\$	-
Location housse	0\$	-	-
Location FR	10\$	2\$	-
Location fauteuil gériatrique	10\$(⁽²⁾)	12\$	-
Location autres FHD	10\$	-	-
Location O2	10\$	10\$(⁽⁴⁾)	-
Location Moniteur cardiaque	40\$	-	-
Tolérance Attente	15 min	15 min	10 min
Facturation Attente	2\$	0.67\$/m	0.63\$/m
Facturation Annulation jour même	59.95\$	10\$	20\$

Certaines variations de tarifs existent, selon les conditions géographiques des CIUSSSs et le service offert. Elles sont tel que :

⁽⁰⁾ Les trajets extra-territoriaux sont les trajets dont l'origine ou la destination se trouve hors du grand Montréal (Montréal ou Laval). Le prestataire de transport adapté considère que tout trajet dont la distance excède 45km est un trajet extra-territorial.

⁽¹⁾ Pour le CIUSSS NDI, les coûts facturés par le prestataire de transport médical sont un

peu différents :

Tableau 5.4 Frais de service en transport médical pour le CIUSSS du Nord en 2016

	NDI
Tarif PEC intra-territorial	49.95\$
Tarif km intra-territorial	2.20\$
Tarif km extra-territorial	2.20\$
Tarif fauteuil (tout type)	18\$
Tarif Annulation jour même	49.95\$

(2) Si le patient circule en fauteuil gériatrique, le tarif de prise en charge est augmenté de 10\$.

(3) Pour le secteur Centre, qui regroupe une majorité des établissements du CSI, le tarif de prise en charge extra-territorial (hors Montréal et Laval) est de 5\$ et le taux kilométrique extra-territorial est de 1.70\$. Le secteur correspond à celui auquel appartient l'établissement qui est facturé.

(4) Le prestataire de transport adapté facture 10\$ de plus le transport d'un patient qui a de l'O₂. L'O₂ n'est pas fourni par le transporteur.

(5) Les prix des taxis ordinaires sont une estimation calculée à partir des prix indiqués pour les principales distances parcourues.

Chaque CIUSSS possède une ou plusieurs flottes internes pour certains des trajets de ses patients. Le CIUSSS CSI possède des véhicules pour deux de ses CHSLD (un par centre), qui peuvent transporter trois personnes ambulantes et l'équivalent de trois fauteuils roulants. Le CIUSSS EDI possède un véhicule utilisé pour un service équivalent. Le CIUSSS NDI possède quatre véhicules ainsi qu'un véhicule de dépannage. Tous sont de plus grande taille : ils peuvent accueillir selon leur configuration jusqu'à une douzaine de patients. Nous avons estimé les coûts relevant de ces flottes à partir des frais enregistrés par les CIUSSSs. Le kilométrage total parcouru sur une année n'étant pas connu pour le CIUSSS CSI, nous l'avons estimé grâce à l'outil de simulation d'Elisa Dubois (Dubois, 2018). Il était cohérent de considérer que les coûts des véhicules de l'autre établissement du CIUSSS CSI et de celui du CIUSSS EDI, pour lesquels nous n'avions aucune donnée, étaient équivalents aux coûts obtenus pour cet établissement. Le CIUSSS ODI, de son côté, fait appel à un chauffeur externe pour son hôpital de jour. Le contrat stipule un coût horaire de 100\$/h. La vitesse réelle autorisée sur l'Ile-de-Montréal variant entre 30 et 50km/h, le coût au kilomètre équivaut

peut être estimé à 3\$. Les patients empruntant ce véhicule doivent financer leur trajet à hauteur de 1.50\$. Ce CIUSSS possède également un véhicule pour transporter les groupes de patients de son Centre de Jour (CJ). Pour tous les véhicules, nous avons considéré un amortissement sur dix ans afin d'estimer un coût d'achat par année. Le tableau 5.5 précise les coûts de revient de ces flottes internes. Les données précisées pour le CSI et l'EDI concernent un véhicule estimé représentatif de ces flottes. Les chiffres présentés pour la flotte du CIUSSS NDI totalisent les coûts de ses cinq véhicules.

Tableau 5.5 Coûts de revient au kilomètre des flottes internes des CIUSSSs

	CSI et EDI	CJ ODI	HJ ODI	FI NDI
Coût d'achat du véhicule par an ⁽¹⁾	6 500\$	-	-	54 300\$
Frais assurance + administration	-	-	-	7 000\$
Frais de permis et de licence	-	-	-	2 000\$
Salaire annuel des chauffeurs	50 000\$	-	100\$	209 000\$
Coût fixe annuel	56 500\$	69 500\$	-	272 300\$
Frais d'entretien et de réparation	20 000\$	-	-	82 000\$
Frais de combustible sur 1 an	4 000\$	-	-	33 000\$
Distance totale sur la période	12 000km	19 550km	-	86 000km
Coût kilométrique	2\$	1.76\$	3\$	1.30\$

⁽¹⁾ Nous considérons que l'achat d'un véhicule s'amortit sur un an.

Un trajet coûte actuellement entre et aux CIUSSSs entre 0\$ et 1 125\$, si l'on compte le kilométrage parcouru selon la distance à vol d'oiseau entre les lieux. Les trajets de coût nul correspondent à des déplacements de patients qui se rendent à l'hôpital de jour DLL via le bus de l'hôpital : ils doivent participer aux frais à hauteur de 1.50\$. Les distances prises en compte dans les calculs étant inférieures aux distances réellement parcourues, ces prix peuvent être nuls. Le coût moyen d'un trajet est de 30.40\$, ce qui correspond au prix de 75% des trajets (le 3^e quartile est à 31\$). L'écart type de cette distribution est de 26.60\$. Les prix varient donc beaucoup selon le type de transport emprunté, le matériel loué et la distance parcourue.

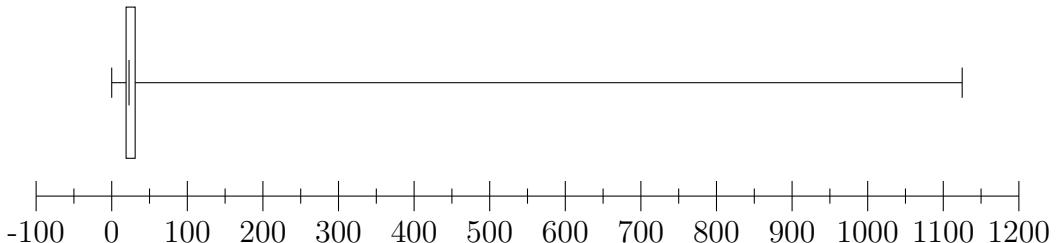


Figure 5.10 Distribution du coût actuel d'un trajet

5.2 Paramètres généraux fixés en fonction du contexte

L'analyse du contexte du problème et de la base de données constituée nous a permis de fixer certains paramètres du problème, que nous détaillons ici et résumons dans le Tableau 5.6.

Fenêtres de temps

Actuellement, les patients peuvent arriver à destination jusqu'à 45 minutes avant l'heure de leur rendez-vous. Nous conservons cette avance possible. Afin que les patients puissent se rendre à l'heure à la salle de leur rendez-vous, nous imposons que leur débarquement du véhicule ait été effectué au plus tard 10 minutes avant le début de leur rendez-vous. Les fenêtres de temps définies pour cette application sont donc tel que :

$$[\underline{\omega}, \bar{\omega}] = [h_{rdv} - 45min, h_{rdv} - 10min] \quad (5.1)$$

Longueur maximale d'une route du réseau

Les chauffeurs des flottes internes des différents CIUSSSs ont des horaires de travail semblables. Leurs journées de travail durent huit heures, de 7h à 15h ou de 8h à 16h. Une pause d'une heure environ leur permet de dîner. Nous avons donc fixé la durée maximale d'une route du réseau à quatre heures. Nous avons autorisé une marge aussi grande pour la construction des routes afin d'observer comment le réseau se construit.

Durée maximale du voyage d'un patient

Médiamente, la durée maximale du voyage d'un patient ne peut excéder 1h15.

Temps de service en un nœud du réseau

Au contraire d'un réseau de transport classique, l'embarquement et le débarquement des patients circulant en fauteuil nécessitent plusieurs opérations : le chauffeur doit attacher ou détacher les harnais de sécurité qui immobilisent le fauteuil dans le véhicule, et une plateforme doit être abaissée pour permettre le déplacement du patient. Ce service demande du temps, proportionnellement au nombre de patients à embarquer ou débarquer au lieu visité. Nous avons pu suivre au cours d'une matinée le chauffeur de l'Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal (IUGM), qui a estimé une moyenne de cinq minutes par patient en fauteuil pour le temps de service en un nœud du réseau.

Célérité des véhicules sur le réseau

La vitesse autorisée sur l'Ile-de-Montréal varie entre 30 et 50km/h. Elle est en réalité un peu moindre, à cause des conditions de circulation existantes. Pour cette application, nous avons dû considérer les distances à vol d'oiseau plutôt que les distances réelles dans nos calculs. Afin de retrouver des temps de trajets équivalents, nous considérons une vitesse de 25km/h.

Coût kilométrique

Nous considérons des véhicules dont la capacité se situe entre celle des véhicules actuels du CIUSSS CSI et celles des véhicules du CIUSSS NDI. D'après les descriptions des flottes internes présentées plus haut, nous considérons donc un coût kilométrique de 2\$.

Résumé des paramètres généraux

Tableau 5.6 Paramètres correspondants aux contraintes du problème

Contrainte	Notation	Valeur fixée
Capacité maximale (sièges classiques)	Q_c	8 sièges
Capacité maximale (fauteuils)	Q_f	8 emplacements de FR
Avance maximale autorisée à l'arrivée	α_{max}	45 minutes
Avance minimale autorisée à l'arrivée	α_{min}	10 minutes
Durée maximale d'un voyage	ζ	75 minutes
Durée maximale d'une route	τ	4 heures
Célérité des véhicules sur le réseau	ν	25km/h
Temps de service	t_s	5 minutes
Coût kilométrique	ξ	2\$

5.3 Création du réseau basée sur un partitionnement spatial des demandes

Pour réaliser nos tests, nous avons aussi fixé les paramètres ε , ε_i et μ pour les heuristiques de double partitionnement, la distance maximale ϑ définissant deux routes proches lors de la création des routes, et la déviation maximale Δ pour l'affectation des patients. Les sous-sections suivantes présentent les valeurs choisies pour ces différents paramètres.

Il est intéressant d'observer que l'algorithme OPTICS ordonne les objets d'un ensemble dans un ordre précis : à chaque étape, il sélectionne l'objet accessible par densité le plus proche de l'objet courant. Il est donc déterministe et un seul test était nécessaire pour chaque ensemble de paramètres testés.

5.3.1 Paramètres choisis pour le partitionnement hebdomadaire des demandes

Nous avons d'abord considéré la mesure de distance spatiale définie dans la section 4.3.4 (page 35) pour le partitionnement hebdomadaire des demandes. Expérimentalement, nous avons fixé la distance génératrice ε à 300km pour obtenir un seul cluster lors du partitionnement hebdomadaire. Pour déterminer ε_i , nous avons limité la distance considérée pour que le temps de trajet entre deux demandes qui pourraient être combinées sur la même route n'excède pas 10 à 15 minutes. Nous avons donc fait varier ε_i entre 1 et 5 km. Nous avons ensuite testé deux approches pour fixer μ et évaluer les partitions hebdomadaires de demandes obtenues grâce aux deux mesures de qualités selon ces deux approches.

Nous avons, pour une première approche, repris l'idée de Lee et al. (2007), qui considère que pour construire des groupes d'objets représentatifs, le nombre minimal de voisins μ que doit posséder un point-cœur doit être au moins égal au nombre moyen de voisins $avg_{|N_\varepsilon(L)|}$ qu'un objet de l'ensemble de données possède pour une distance ε donnée. Nous avons donc fait varier μ entre 19 et 140 en fonction des semaines.

Dans un second temps, nous avons considéré que l'objectif était de créer des routes, et donc de combiner au moins deux demandes à l'intérieur de ces groupes, nous avons réduit le nombre minimal de voisins permettant de désigner une demande comme un point-cœur. Nous avons donc étudié les partitions de demandes obtenues en faisant varier μ entre 3 et 10 demandes. Les valeurs faibles de μ augmentent la possibilité que le phénomène de *simple-linkage* apparaisse. Nous avons souhaité étudier aussi quel réseau pourrait se dessiner dans ce cas, où nous pouvons prévoir d'obtenir des clusters moins denses et plus rapprochés, et l'avons donc conservé.

Pour ces deux approches, nous avons analysé la mesure de qualité Q_m et le coefficient de silhouette moyen \bar{s} obtenus en fonction des paramètres ε_i et μ fixés. Pour cela, nous avons observé leur évolution en fonction de la part de la demande rejetée dans le bruit. Les figures 5.11 à 5.14 illustrent ces évolutions. Chaque point y représente une partition obtenue en fixant ε_i et μ .

Si nous fixons ces paramètres selon la première approche testée, entre 37% et 58% de la demande est rejetée dans le bruit (valeurs extrêmes sur toutes les partitions hebdomadaires réalisées). Les valeurs extrêmes obtenues pour la mesure de qualité Q_m sont 5 913 km², obtenue lorsque 43% des demandes sont rejetées dans le bruit, et 37 489 km², obtenue lorsque 53% des demandes étaient filtrées. Nous pouvons observer que Q_m est d'autant meilleure que la part de la demande rejetée dans le bruit est grande (voir Figure 5.11). Ce comportement signifie que lorsque la part de demandes rejetées est grande, la compacité des groupes de demande augmente suffisamment fortement pour dépasser l'augmentation de la distance entre les demandes filtrées, qui ne peuvent pourtant pas être regroupées. Les demandes se concentrent donc dans de très petites zones du territoire. Ce comportement paraît incohérent. Il peut signifier que les demandes rejetées dans le bruit pourraient aussi former des clusters. Les valeurs de μ choisies sont donc trop grandes. Nous pouvons aussi observer, sur la Figure 5.12, que la part de la demande rejetée dans le bruit n'a pas d'influence notable sur la forme des groupes construits avec ces paramètres.

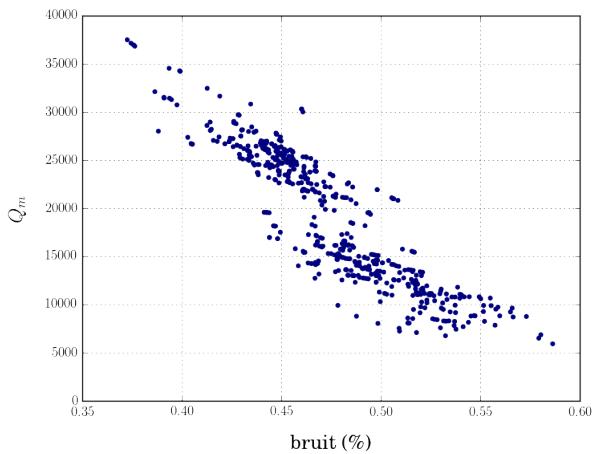


Figure 5.11 Mesure de qualité de la partition en fonction de la part des demandes rejetées dans le bruit (1^{ère} approche)

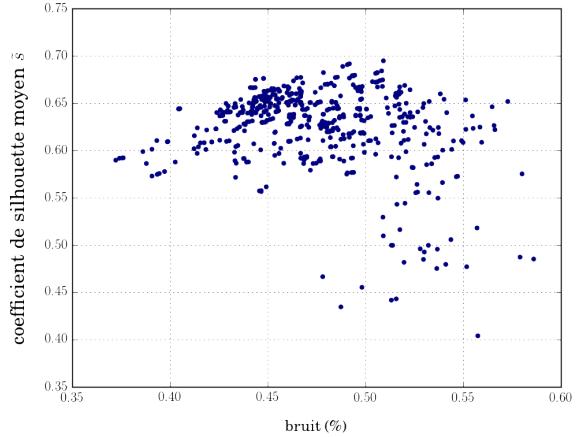


Figure 5.12 Coefficient de silhouette des partitions en fonction de la part des demandes rejetées dans le bruit (1^{ère} approche)

Les partitions construites en fixant μ selon la seconde approche rejettent entre 1% et 53% de la demande dans le bruit. La mesure de qualité Q_m varie entre 4 533 et 732 736km², comme le montre la Figure 5.13. Nous pouvons observer que lorsque très peu de demandes sont filtrées, Q_m est très grande. Elle chute fortement dès qu'environ 10% de la demande est rejetée dans le bruit. Les clusters obtenus deviennent donc plus compacts à ce pas. Elle reste ensuite minimale quelle que soit la part de la demande filtrée.

Le coefficient de silhouette moyen des partitions, en revanche, augmente fortement avec la part du bruit, tel que nous pouvons le voir sur la Figure 5.14. Lorsque la quasi-totalité de la demande est regroupée, le coefficient de silhouette tend à être négatif. Cela signifie que les groupes de demandes sont plus proches les uns des autres qu'ils ne sont compacts. Ces partitions sont celles obtenues lorsque μ vaut 3. Cela traduit donc le phénomène de *simple linkage*. Lorsque la part de demandes filtrées augmente, les groupes de demandes deviennent plus compacts et plus éloignés les uns des autres, ce qui semble naturel. Les partitions présentant un coefficient de silhouette moyen maximal sont celles obtenues lorsque ε est faible (1 ou 2) et μ grand (entre 8 et 10 pour la majorité des semaines).

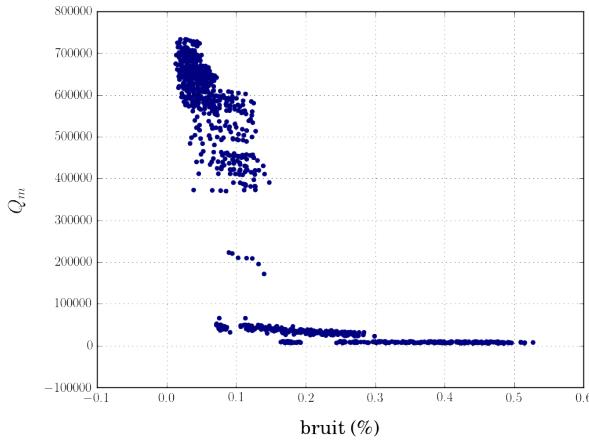


Figure 5.13 Mesure de qualité des partitions en fonction de la part des demandes rejetées dans le bruit (2^{nde} approche)

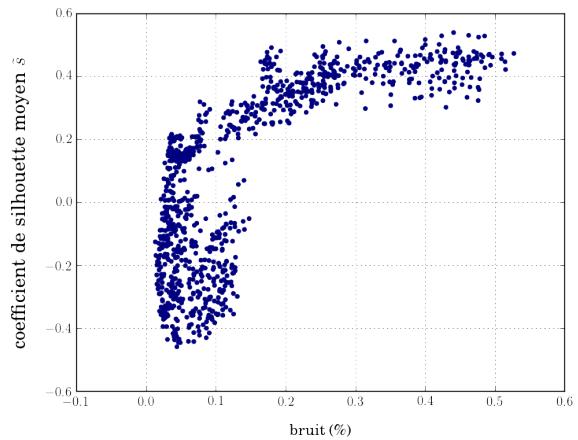


Figure 5.14 Coefficient de silhouette des partitions en fonction de la part de la demande rejetée dans le bruit (2^{nde} approche)

Avec ces paramètres de regroupement, nous pouvons observer des partitions de la demande dont la mesure de qualité est importante lorsque le coefficient de silhouette moyen est faible. Lorsque le coefficient de silhouette moyen des partitions atteint 0.2, Q_m tend vers sa valeur minimale. Ces valeurs correspondent aux partitions qui présentent une part de bruit de plus de 10%, dont les coefficients de silhouette moyens sont importants et la mesure de qualité minimale.

Après avoir observé les variations des mesures des partitions hebdomadaires des demandes, nous avons choisi d'étudier les réseaux obtenus lorsque pour chaque semaine, la partition des demandes présente :

1. la meilleure mesure de qualité Q_m , c'est-à-dire la plus faible ; nous fixons alors ε_i à 1km et μ à 10 voisins ;
2. le meilleur coefficient de silhouette moyen \bar{s} , soit le plus grand ; dans ce cas, ε_i varie entre 1 et 2km, et μ entre 3 et 10 voisins ;
3. la part de demandes rejetée dans le bruit la plus faible ; nous fixons alors ε_i à 5km et μ à 3 voisins.

Nous pouvons observer que les paramètres minimisant Q_m recherchent une plus grande densité des clusters, tandis que ceux minimisant la part de la demande rejetée dans le bruit auront tendance à construire des groupes de demandes plus étendus et moins denses. Les paramètres qui maximisent \bar{s} sont plus proches de ceux qui minimisent Q_m . Le tableau re-

censant précisément les paramètres ε et μ correspondants à ces trois objectifs se trouve en Annexe B.

5.3.2 Paramètres choisis pour le partitionnement des groupes de demandes

Nous avons observé que 80% des groupes de demandes possèdent un voisin lui ressemblant à au moins 75%. Nous avons donc fixé la distance génératrice ε_i à 25%. Pour fixer μ , nous avons à nouveau testé deux approches. Nous avons d'abord défini comme point-cœur tout groupe de demandes possédant au moins deux voisins. Pour apprécier le type de partitions des groupes obtenues, nous avons aussi réalisé un partitionnement des groupes en imposant qu'un groupe soit un point-cœur s'il est suffisamment représentatif des groupes de sa zone, c'est-à-dire s'il se répète au moins une semaine sur deux sur la période considérée. Nous avons alors fixé $\mu = 13$.

Le Tableau 5.7 présente les mesures prises des partitions des groupes de demandes obtenues en fonction des paramètres de partitionnement hebdomadaire et de la valeur de μ choisie pour la création des zones. Nous pouvons observer que lorsque nous augmentons μ , la part des groupes rejetée dans le bruit augmente et la mesure de qualité s'améliore vraiment. Le coefficient de silhouette, lui, reste semblable. Cela signifie que des clusters rejetés dans le bruit sont proches et pourraient former des zones. Nous allons donc conserver $\mu = 2$ pour construire les réseaux. Nous pouvons aussi observer que la partition construite à partir des paramètres permettant de minimiser Q_m rejette moins de groupes de demandes. Les groupes construits lors du partitionnement hebdomadaire sont donc plus homogènes.

Les paramètres permettant de maximiser \bar{s} créent des groupes de demandes moins homogènes : un peu plus de deux fois plus de groupes sont filtrés lors de la création des zones. Par rapport à la partition précédente, les zones créées sont d'une densité équivalente mais sont moins éloignées les unes des autres, et les groupes extrêmes en sont plus proches. En conséquence, Q_m n'augmente que d'un facteur 2 par rapport aux paramètres précédents.

En revanche, si l'on vise la minimisation du bruit lors du partitionnement hebdomadaire, $\frac{1}{5}$ des groupes de demandes formés sont rejettés. Selon les mesures prises, les zones sont pourtant de densité équivalente à celles obtenues avec des paramètres minimisant Q_m . Selon la mesure de qualité, les groupes de demandes rejetés sont proches les uns des autres. Ces paramètres ne permettent donc pas d'obtenir une partition de forme intéressante. Nous conservons donc, pour la création des réseaux, les partitions obtenues lorsque, pour regrouper les demandes, nous avons cherché à minimiser Q_m et à maximiser \bar{s} .

Tableau 5.7 Réseaux dessinés selon les paramètres choisis

	Nombre de groupes créés	$\mu = 2$					$\mu = 13$				
		%bruit	\bar{a}	\bar{b}	\bar{s}	Q_m	%bruit	\bar{a}	\bar{b}	\bar{s}	Q_m
$Q_{m_{min}}$	1 091	6%	0.15	0.94	0.82	25.93	31%	0.12	0.98	0.87	10.13
\bar{s}_{max}	1 820	13%	0.16	0.82	0.77	49.88	54%	0.13	0.97	0.85	14.04
$\%bruit_{min}$	441	20%	0.12	0.88	0.82	6.67	51%	0.06	0.99	0.94	1.26

5.3.3 Création des réseaux

Nous avons dessiné des réseaux en faisant varier la distance maximale ϑ en dessous de laquelle deux routes ´etaient consid r es proches. Les caractéristiques des réseaux obtenus sont recens es dans le Tableau 5.8.

Sans exécution de l'heuristique de réduction des routes du réseau ($\vartheta = 0$), la construction des routes dessine environ 20 000 routes. Cette quantité est d mesur e si nous considérons un réseau construit ´a l'échelle d'une ville. De plus, elle rend impossible la résolution de l'affectation des patients : lorsque les réseaux comportent plus de 1 000 routes, les algorithmes peuvent s'exécuter pendant plus de 24 heures sans résultat.

Comme expliqué dans la présentation de la méthode de résolution (voir section 4.4.1, page 45), une déviation de route de 15 minutes pour visiter un autre lieu paraît acceptable. Cela autorise ´a modifier un trajet pour atteindre un lieu situé jusqu' 3km du lieu normalement visité. Comme les routes des réseaux dessinés comportaient jusqu' environ 25 lieux, nous avons créé des réseaux en considérant que deux routes ´etaient proches lorsque la somme des distances des lieux qu'elles visitaient était inférieure  80km, ce qui correspond  une déviation moyenne de 15 minutes par lieu.

Nous pouvons observer que pour chaque ensemble de paramètres, les valeurs mesur es sont conformes  la construction propos e par l'heuristique. Le nombre de routes et donc la longueur totale du réseau diminue lorsque la proximité consid r e pour deux routes augmente. La réduction du nombre de routes se révèle vraiment profitable, car elle permet de diviser par un peu plus de 5 et 6 le nombre de routes du réseau obtenu  partir des paramètres visant $Q_{m_{min}}$ et \bar{s}_{max} (respectivement) dès que la proximité maximale autoris e est 1km. Les routes visitant le plus grand nombre de lieux sont conserv es, car elles incluent les routes supprim es. A partir d'une distance de proximité de 50km, les réseaux obtenus sont semblables ; la distance maximale autoris e n'a donc plus aucune influence. Cela rejoint la distance génératrice fix e pour obtenir ces réseaux, qui valait 1 ou 2km : les zones dans lesquelles les routes ont été créées regroupent des demandes dont les voisins se situent  1 ou 2km. Nous appliquerons l'étape d'affectation des patients sur les réseaux accentués en gras dans le Tableau 5.8.

Tableau 5.8 Réseaux dessinés selon les paramètres choisis

Para - mètres	Proximité (km)	Nb. de routes	Longueurs des routes (km)				Nb. de lieux dans le réseau	Nb. de lieux sur une route		
			totale	minimale	moyenne	maximale		minimal	moyen	maximal
$Q_{m_{min}}$	0	18330	110969.06	0.09	6.06	59.64	1 073	2	4	24
$Q_{m_{min}}$	1	3392	44981.68	0.48	13.26	59.64	823	3	8	24
$Q_{m_{min}}$	5	1445	30320.71	1.41	20.98	59.64	629	3	11	24
$Q_{m_{min}}$	10	820	21152.58	1.41	25.8	59.64	544	3	13	24
$Q_{m_{min}}$	20	361	9608.7	1.41	26.62	59.64	414	3	14	24
$Q_{m_{min}}$	30	172	3101.58	1.41	18.03	59.64	269	3	9	24
$Q_{m_{min}}$	50	140	1753.77	1.41	12.53	59.64	197	3	7	24
$Q_{m_{min}}$	60	138	1680.1	1.41	12.17	59.64	179	3	6	24
$Q_{m_{min}}$	70	140	1738.06	1.41	12.41	59.64	176	3	6	24
$Q_{m_{min}}$	80	140	1750.60	1.41	12.50	59.64	181	3	6	24
\bar{s}_{max}	0	21250	138873.65	0.08	6.54	63.78	1 274	2	4	25
\bar{s}_{max}	1	3411	49128.27	0.43	14.4	63.78	972	3	8	25
\bar{s}_{max}	5	1847	36261.76	0.43	19.63	63.78	777	3	10	25
\bar{s}_{max}	10	1101	25455.93	0.43	23.12	63.78	686	3	11	25
\bar{s}_{max}	20	563	12774.38	0.43	22.67	63.78	528	3	11	25
\bar{s}_{max}	30	369	5910.82	0.43	16.02	63.78	365	3	7	25
\bar{s}_{max}	50	314	3876.25	0.43	12.34	63.78	251	3	6	25
\bar{s}_{max}	60	314	3869.54	0.43	12.32	63.78	260	3	6	25
\bar{s}_{max}	70	320	3944.90	0.43	12.33	63.78	259	3	6	25
\bar{s}_{max}	80	314	3855.06	0.43	12.28	63.78	266	3	6	25

5.4 Mesure de la déviation maximale d'une route pour l'étape d'affectation des patients

Comme expliqué dans la section 4.4.1 (page 45), une route ne peut pas être trop déviée pour assurer un certain confort de déplacement aux patients. Nous regarderons donc la variation du comportement du réseau si la déviation maximale autorisée pour insérer une demande dans une route est de 15, 10 ou 5 minutes.

5.5 Calcul des coûts de transport et estimation de l'intérêt d'un réseau

Pour estimer l'intérêt d'un réseau dessiné, nous analysons d'abord son intérêt financier. Nous estimons d'abord le coût de service total dans une fourchette, afin de prendre en compte la possibilité que les fauteuils hors dimension de type inconnus soient tous des fauteuils gériatriques (qui coûtent 10\$ de plus lors de la prise en charge par un transporteur externe) ou non (voir section 5.1.1, page 51). En fonction du coût total de service de la demande par le réseau, nous estimons la taille de la flotte qui pourrait être déployée en conservant un coût total de service inférieur au coût actuel. Selon la flotte qu'il est possible d'acquérir, nous pourrons déterminer si un réseau est réalisable ou non. En toute rigueur, il faudrait résoudre le sous-problème de dimensionnement de la flotte de véhicule (Ceder and Wilson, 1986), mais cette estimation est suffisante au vu des résultats observés. Pour chaque valeur de la déviation maximale possible testée, nous étudions aussi la part de la demande servie par le réseau, ainsi que le nombre de patients transportés par une route du réseau et la répartition du coût moyen comptabilisé pour le trajet d'un patient qui transite par lui.

Nous étudions ensuite le confort de transport proposé par le réseau aux patients. Pour cela, nous regardons la durée de leur voyage et l'avance avec laquelle ils arrivent à destination pour leur rendez-vous lorsqu'ils transitent par le réseau.

Pour alléger la lecture des résultats obtenus, nous désignerons chaque réseau dessiné par l'objectif visé lors du choix des paramètres et la distance maximale en deçà de laquelle deux routes étaient considérées proches. Ainsi, le réseau dessiné avec les paramètres permettant d'obtenir une valeur minimale de Q_m lorsque deux routes sont considérées proches si leur distance n'excède pas 30km est noté Q_{m30} . Lorsqu'il nous a semblé intéressant de représenter les valeurs sous forme de diagrammes en boîte à moustache, les valeurs extrêmes figurent le premier et le dernier 5%, sauf sur le graphe illustrant le nombre de patients transitant sur les routes du réseau. Elles représentent alors les nombres de patients minimal et maximal qui ont transité par les routes du réseau.

5.5.1 Intérêt économiques des réseaux construits

Les Figures ci-dessous résument des comparaisons des réseaux évalués. Nous nous sommes intéressés au coût minimal total de service (Figure 5.15), à la part de la demande pouvant transiter par le réseau (Figure 5.16) et à la répartition du coût de service d'une demande par le réseau (Figure 5.17).

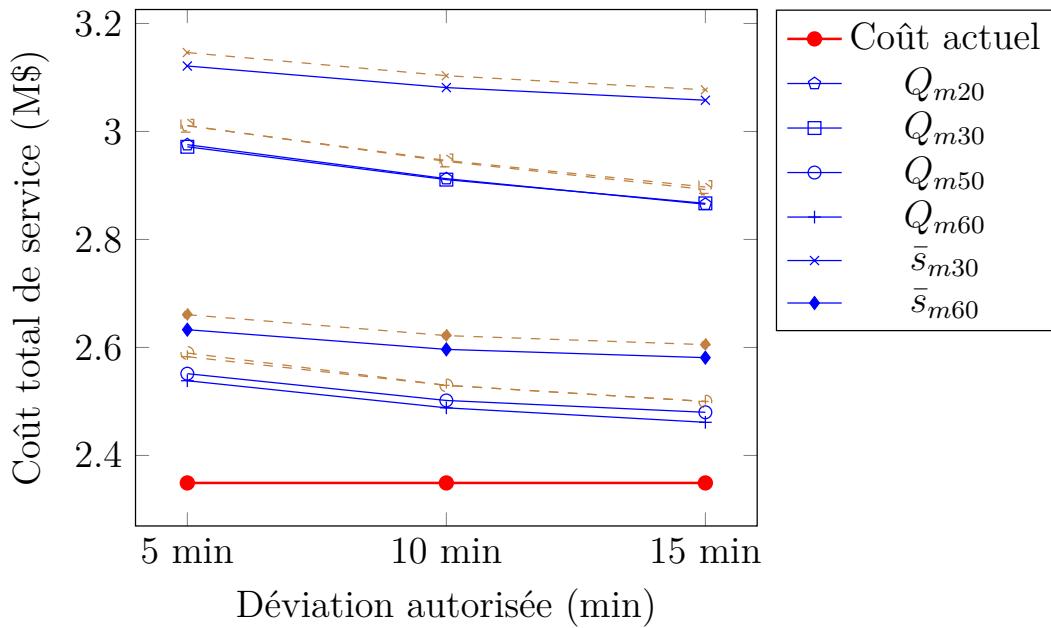


Figure 5.15 Comparaison du coût total de service des réseaux selon la déviation autorisée

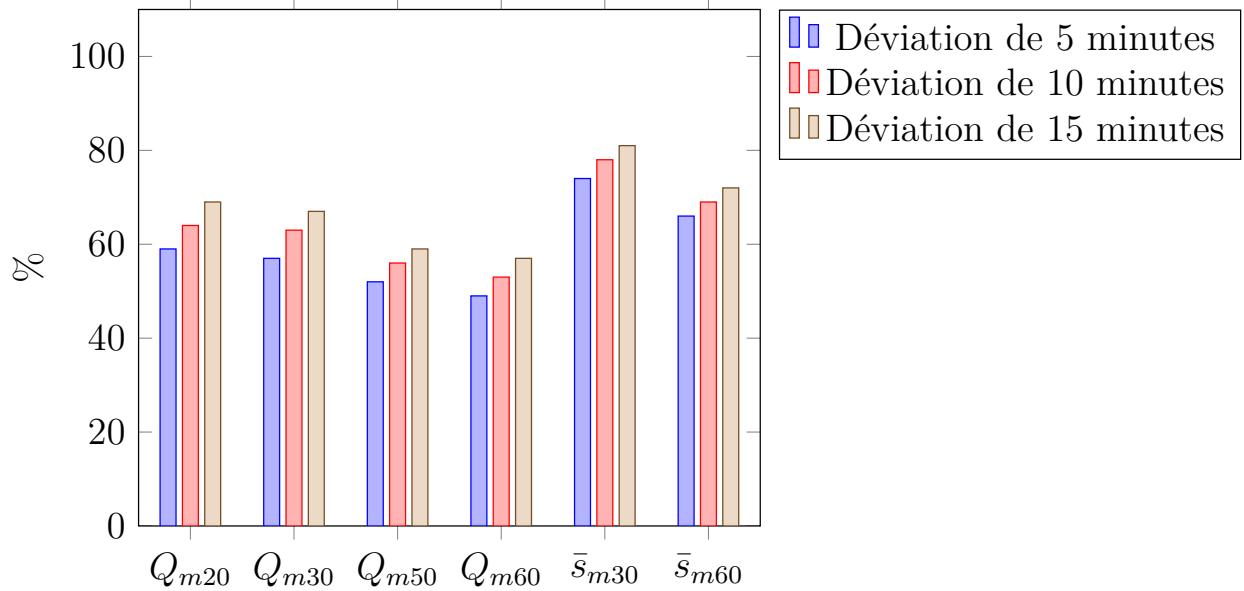


Figure 5.16 Comparaison de la part de la demande servie par les réseaux

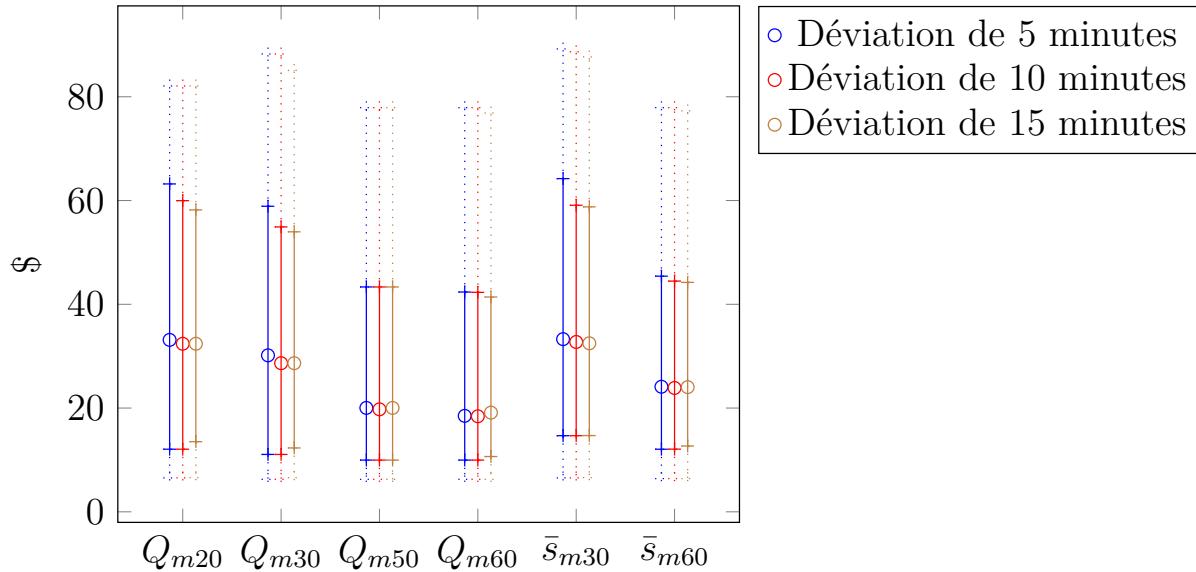


Figure 5.17 Comparaison du coût d'un voyage sur les réseaux en fonction de la déviation maximale autorisée

Nous pouvons observer que les réseaux construits et testés permettent de faire transiter plus de la moitié des patients, voire près de 75% d'entre eux (voir Figure 5.16). Cependant, le service qu'ils proposent n'est économiquement pas intéressant : sans compter les coûts inhérents à l'entretien d'une flotte de véhicules (les 80 véhicules de transport adapté sans

support médical ne suffisent actuellement pas à répondre aux 43% de la demande qui le sollicitent). A cause de cela, les réseaux construits engendrent une augmentation du coût actuel estimé de 6% à 30% (voir les coûts de service reportés sur la figure 5.15).

Ce coût de service très élevé peut s'expliquer par le fait que la quasi-totalité des routes ne transporte en réalité qu'un ou deux patients, comme nous pouvons le voir sur la Figure 5.18. Or ces routes peuvent s'étendre sur 60km (voir Tableau 5.8) et, suivant le fonctionnement d'un réseau de transport en commun, le parcours d'une route visite chacun des lieux programmés, même si aucun passager ne doit embarquer. De plus, lorsque plus d'un passager transite par une route du réseau, le taux moyen d'occupation du véhicule (ratio moyen du nombre de sièges occupés par rapport à la capacité du véhicule) sur la route est de 0,2 passager en siège classique et 0,7 passager en fauteuil roulant. Il est sensiblement le même pour tous les tests menés : lors de 75% des trajets, le véhicule ne transporte que 0,4 passager en siège classique et 0,8 passager en FR parce qu'en général, si plusieurs passagers transitent par une même route, ils sont embarqués puis débarqués l'un après l'autre. Le réseau construit est alors équivalent au service actuel qui transporte chaque patient seul. En conséquence de cette organisation, le trajet d'un patient transitant par le réseau coûte en moyenne le même prix qu'actuellement, et si la médiane peut avoisiner les 20\$, le 3^e quartile augmente par rapport à la situation actuelle et dépasse 40\$ (voir la Figure 5.17).

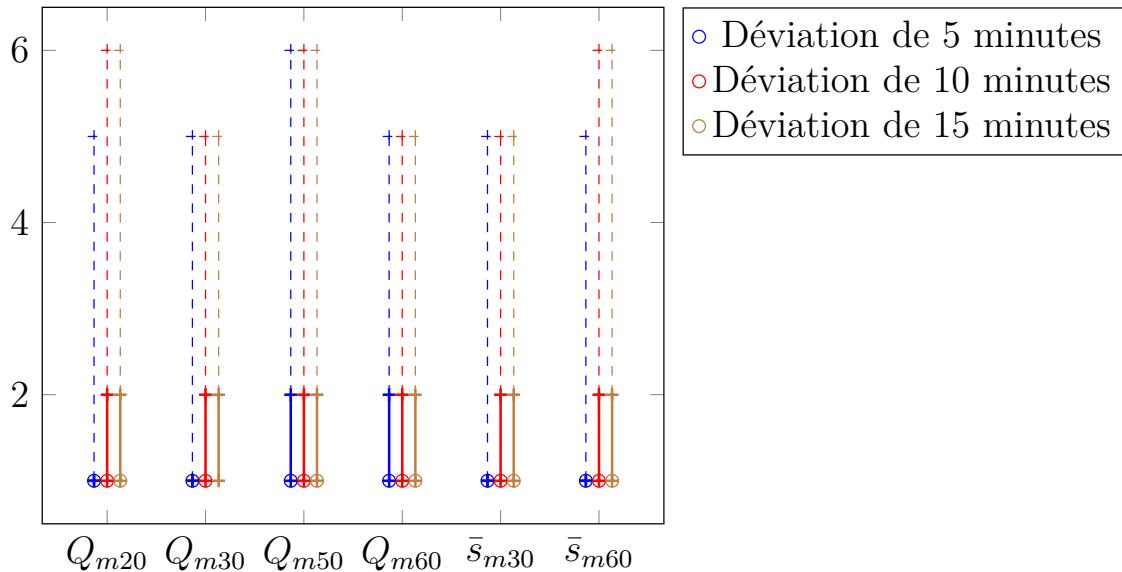


Figure 5.18 Comparaison du nombre de patients servis par une route de réseau en fonction de la déviation maximale autorisée

Pour diminuer suffisamment le coût de transport d'un patient, il faudrait donc pouvoir mieux

adapter le fonctionnement du réseau à ce type de demande. Mais, au vu de la construction actuelle, cela demanderait de beaucoup reconstruire les routes pour les adapter à la demande. Nous retrouverions alors un problème de transport à la demande, qui est déjà utilisé dans le contexte du transport de personnes à mobilité réduite, qui pourrait constituer une variation du problème étudié ici, au niveau de la création des routes qui serviront les demandes.

5.5.2 Niveau de service proposé aux patients

La Figure 5.19 représente pour chaque réseau construit et chaque déviation maximale autorisée lors des tests la répartition du temps de voyage des patients transitant par le réseau. Nous pouvons observer que les réseaux construits proposent un niveau de service relativement élevé aux patients. Les temps de trajets sont tous inférieurs à la durée maximale autorisée. 75% d'entre eux peuvent même atteindre leur destination en 45 minutes ou moins, ce qui est considéré comme très confortable par les CIUSSSs.

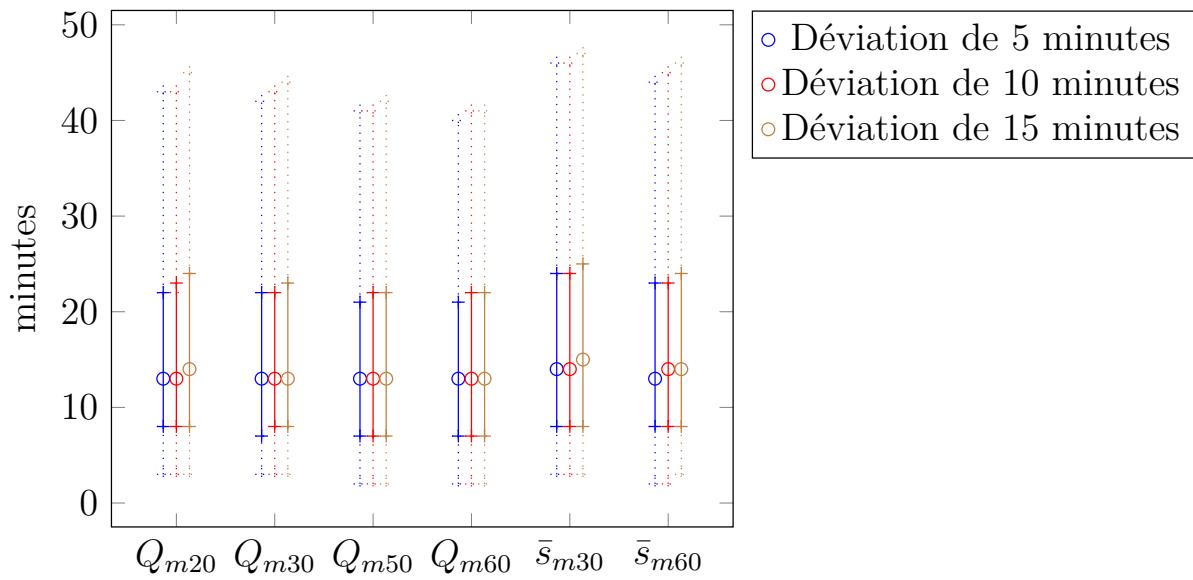


Figure 5.19 Comparaison du temps de voyage sur les réseaux en fonction de la déviation maximale autorisée

De plus, tous peuvent arriver à temps pour leur rendez-vous (voir Figure 5.20). Ils peuvent avoir au maximum 35 minutes d'avance, ce qui reste raisonnable et à l'intérieur des contraintes posées. La distribution de l'avance des patients à leur arrivée suggère même qu'avec cette organisation, ce délai pourrait être encore réduit, car elle est très catégorisée : la majorité des patients arrive juste à la borne supérieure de la fenêtre de temps autorisée, ou bien avec

35 minutes d'avance. Cela s'explique aussi par le fait que, par construction, les passagers transportés par les compagnies externes arrivent juste à temps, et parce que de nombreuses routes transportent seulement un ou deux patients : pour prévenir tout retard dû à l'insertion d'une nouvelle demande dans une route, nous avons inséré le premier patient en lui imposant 45 minutes d'avance.

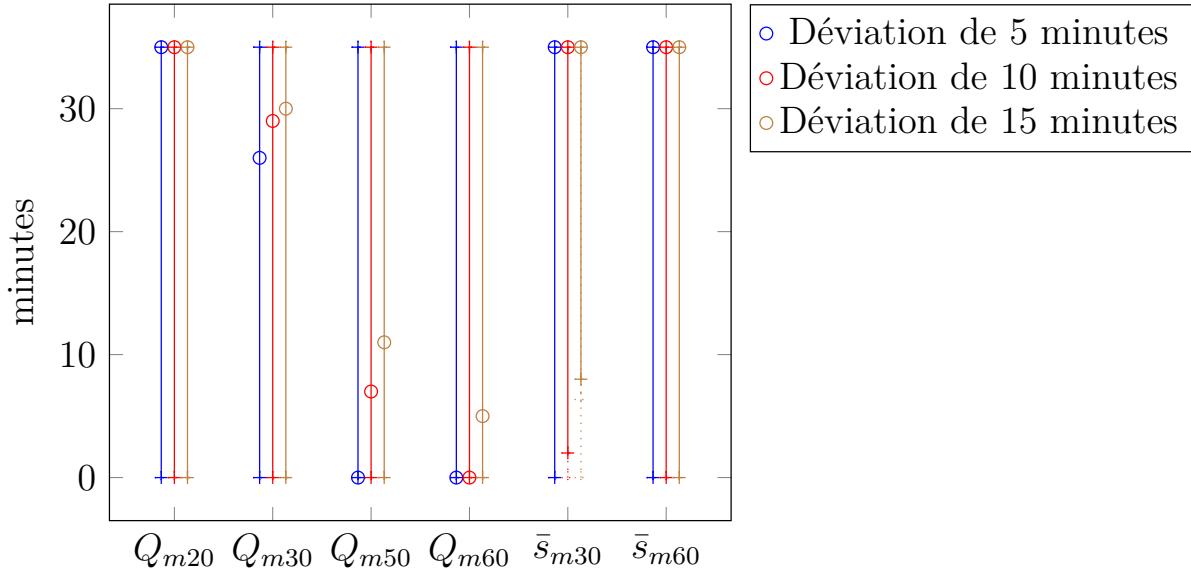


Figure 5.20 Comparaison de l'avance des patients à leur RDV en fonction de la déviation maximale autorisée

5.5.3 Influence de la proximité des routes

Autoriser l'assimilation de routes plus éloignées l'une de l'autre crée un système de transport (réseau et transporteurs externes) dont le coût total de service est plus faible. Or, la répartition du service des demandes et les caractéristiques des trajets réalisés via le réseau sont similaires. Nous pouvons donc simplement émettre l'hypothèse qu'augmenter cette possibilité d'assimilation des routes permet de faire transiter par le réseau des patients dont le trajet, s'il est pris en charge par les transporteurs externes, est plus cher.

5.5.4 Influence de la déviation maximale autorisée des routes d'un réseau pour l'affectation des patients

La Figure 5.21 propose un exemple de route obtenue et des déviations qui en ont été faites pour servir d'autres demandes. La route y est représentée en noir et ses quatre déviations possibles en couleur. d_i y symbolise un domicile quelconque. Comme l'heuristique de construc-

tion n'impose pas l'unicité du passage en chaque lieu, les routes obtenues forment des étoiles lorsqu'un même lieu est visité plusieurs fois. Ici, nous pouvons observer une étoile dont le centre est l'Hôpital de Verdun. Les lieux les plus visités correspondent, naturellement, aux lieux majeurs relevés lors de l'analyse des données.

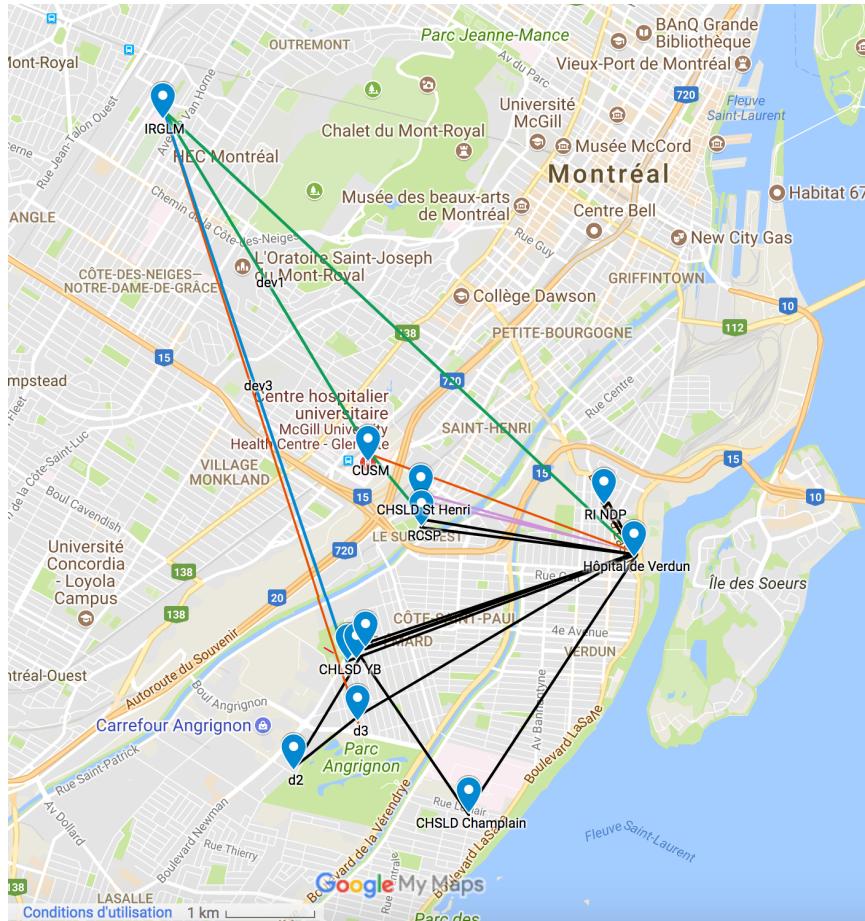


Figure 5.21 Une route et ses déviations

Relaxer plus ou moins la contrainte de déviation maximale d'une route permet d'augmenter le nombre de patients pris en charge par le réseau : en autorisant 15 minutes de déviation plutôt que 5, près de 10% de patients en plus peuvent transiter par le réseau. Au vu des routes obtenues, cela correspond en fait à un parcours légèrement différent.

Le coût total de service diminue aussi lorsque la déviation maximale autorisée augmente. Nous pouvons observer que le coût d'un voyage sur le réseau s'en trouve légèrement diminué. Dans le cas des réseaux Q_{m30} et \bar{s}_{m60} , cela s'explique en partie par le fait que plus de patients peuvent alors être transportés par une même route. Plus généralement, cela signifie que les 10% des patients qui peuvent transiter par le réseau lorsque ses routes sont plus déviées sont

des patients dont le transport par les compagnies externes est plus cher. Ce type de coûts est plus complexe à appréhender, car il peut s'expliquer de différentes manières. L'évolution de la fourchette du coût total de service permet de conclure que la part de patients en FG transportés par les compagnies externes est sensiblement équivalente, quelle que soit la déviation maximale autorisée. La diminution des coûts peut donc être due au type de transport nécessaire pour chaque patient, ainsi qu'au matériel devant être loué auprès du transporteur, qui fait évoluer le prix également.

L'évolution de la courbe des coûts en fonction de la déviation maximale autorisée peut laisser penser qu'en autorisant une déviation plus importante des routes, nous pourrions encore diminuer les coûts de service obtenus. Mais ce type de fonctionnement s'éloigne trop d'un réseau tel que pensé dans notre projet.

5.5.5 Influence du type de partitionnement sur le réseau construit

Nous pouvons remarquer que pour une même contrainte de proximité des routes, les réseaux \bar{s}_{max} comportent près de deux à trois fois plus de routes que les réseaux $Q_{m_{min}}$, alors que la cardinalité des zones obtenues est moindre : une zone obtenue pour les paramètres $Q_{m_{min}}$ et \bar{s}_{max} peut rassembler respectivement jusqu'à 4% et 2% des groupes de demandes. C'est une autre traduction d'une plus grande homogénéité des groupes obtenus en choisissant les paramètres du partitionnement hebdomadaire de manière à minimiser Q_m . Le plus grand nombre de lieux constituant les réseaux \bar{s}_{max} viennent appuyer cette hypothèse.

Les Figures 5.22 et 5.23 illustrent une autre comparaison de ces réseaux : pour une même définition de la proximité de deux routes lors de la construction du réseau, nous avons regardé quelle part de la demande servie par le réseau transite par ses routes initiales et ses routes déviées. Sur ces figures, nous désignons les réseaux en précisant la déviation maximale autorisée lors de l'affectation des patients. Nous pouvons observer sur la Figure 5.16 que les réseaux \bar{s}_{max} permettent de faire transiter jusqu'à près de 20% de patients en plus que les réseaux $Q_{m_{min}}$ (plus la déviation autorisée lors de l'affectation des patients est importante, plus l'écart se creuse). Ils utilisent aussi plus les routes initiales du réseau, même si entre 30% et 50% de la demande reste servie par déviation des routes. Cependant, ces réseaux génèrent un coût total de service plus élevé que les réseaux $Q_{m_{min}}$. Ainsi, des groupes de demandes un peu moins homogènes permettent d'obtenir des réseaux plus adaptés à la demande, mais plus coûteux. Cela s'explique par les nombres plus importants de routes et de lieux constituant les réseaux obtenus avec les paramètres maximisant \bar{s} .

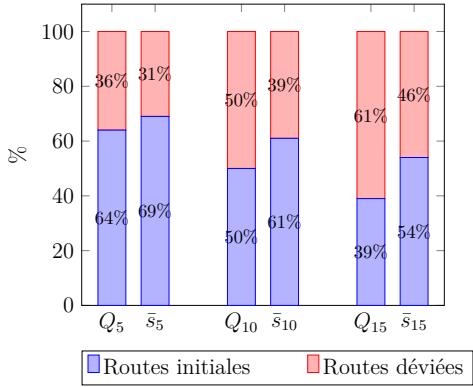


Figure 5.22 Part de la demande servie par les routes des réseaux $Q_{m_{min30}}$ et \bar{s}_{max30}

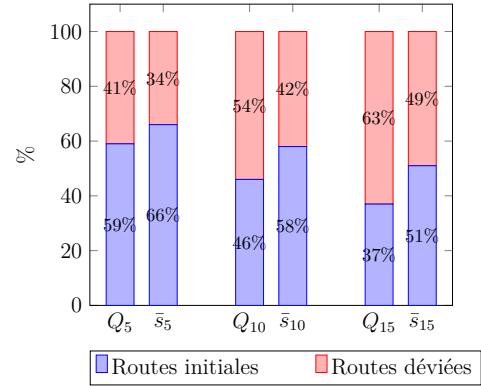


Figure 5.23 Part de la demande servie par les routes des réseaux $Q_{m_{min60}}$ et \bar{s}_{max60}

Suite au cheminement suivi, nous pouvons constater que plus les paramètres de partitionnement ε_i et μ tendent à créer des groupes de demandes homogènes (ε_i est alors faible et μ est grand), plus le réseau construit est épuré, dans le nombre de lieux et de routes qui le composent. En revanche, augmenter ε_i et diminuer μ (ce qui correspond à des groupes de demandes moins denses lors du partitionnement hebdomadaire) construit des groupes de demandes moins homogènes et dessine des réseaux comportant plus de lieux et plus de routes. Les premiers réseaux s'approchent plus d'une définition d'un réseau, mais sont moins adaptés à la demande actuelle que les seconds, qui proposent des routes plus diversifiées. Ces derniers visiteront les paires OD d'un plus grand nombre de requêtes et pourront servir une plus grande part de la demande d'une manière générale, et sans dévier leurs routes initiales. Diminuer la densité des groupes construits ou permettre lors du partitionnement des zones une moins grande homogénéité construit donc des routes plus adaptées à la demande, parce que plus nombreuses. Mais les réseaux obtenus ne peuvent pas être implantés en tant que tels, parce qu'ils possèdent un trop grand nombre de routes. Le partitionnement des demandes a une influence sur le réseau final dessiné. Mais, construites avec cette mesure de distance, les solutions obtenues ne sont pas intéressantes d'un point de vue économique ni organisationnel.

5.6 Résultats obtenus avec la mesure de partitionnement spatio-temporelle

Nous avions défini deux mesures de distance pour le partitionnement hebdomadaire des demandes, pour étudier l'influence de la prise en compte du temps dans ce niveau de clustering. Lors des tests, nous avons suivi une seconde fois les étapes décrites précédemment en utilisant la mesure spatio-temporelle définie dans la section 4.3.4 (page 35). La phase I de l'algorithme

construit des réseaux qui comportent un nombre de routes similaire. Cependant, ces routes sont beaucoup plus longues, puisqu'elles parcourent en moyenne entre 50 et 70kms, et peuvent atteindre 480kms. Ces longues distances s'expliquent par le fait que cette mesure de distance autorise le regroupement de deux demandes si elles sont combinables sur une même route. Selon le principe d'extension des clusters par densité, la mesure de distance spatio-temporelle permet donc d'inclure dans les groupes des demandes particulière (transportant un patient loin hors de l'Ile-de-Montréal par exemple) qui étaient rejetées dans le bruit en utilisant la mesure spatiale. Cependant, deux routes qui ont été regroupées dans un même cluster ne pourront peut-être pas être servies par la même route finalement, selon l'ordre de traitement des demandes dans l'heuristique de construction des routes. Nous avons aussi observé que l'heuristique de réduction des routes n'est pas aussi efficace sur les réseaux dessinés dans les zones construites avec cette mesure : pour obtenir des réseaux d'environ 400 routes, il faut considérer une proximité des routes bornée à 70kms. Nous remarquons enfin une certaine similitude dans les réseaux obtenus. Les paramètres de partitionnement ont donc une influence moindre lorsque l'aspect temporel est ajouté, et les routes construites sont très différentes les unes des autres car largement personnalisées pour répondre à la demande.

Nous avons exécuté la phase d'affectation des patients à partir des réseaux Q_{m80} et $\bar{s}_{max_{80}}$, qui comportent 196 et 197 routes. Ces réseaux permettent de faire transiter entre 80% et 90% des demandes de transports, mais, s'ils offrent aussi une bonne qualité de service aux patients, ils coûtent plus de 6M\$. De plus, nous retrouvons la situation précédente : les routes sont essentiellement déviées (entre la moitié et les deux-tiers des demandes sont servies par des rotues déviées) pour servir les demandes les unes après les autres. Il s'agit donc de servir successivement des demandes par des routes créées dans le sens d'un service individuel.

CHAPITRE 6 CONCLUSION

Ce projet est venu répondre à une recherche de quatre CIUSSSs de l'Île-de-Montréal d'optimiser l'organisation du transport externe non urgent de leurs patients afin d'en réduire les coûts, sans diminuer la qualité du service offert aux patients.

A partir de rencontres avec le personnel soignant et administratif intervenant dans les processus de choix des moyens de transport et de l'accompagnement, puis de l'organisation elle-même du transport des patients, nous avons pu mieux cerner les enjeux concernés. Outre l'aspect financier, l'humain est déterminant dans le domaine de la santé. Nous avons pu collecter, analyser et compléter des données existantes pour construire des bases de données reflétant la réalité des déplacements générés par les différents examens et activités des patients. Toutes ces étapes nous ont aidés à comprendre la complexité de l'organisation des transports des patients et ses différents angles à travers la prise en charge des patients, leur accompagnement, le matériel nécessaire et les aspects financier, spatial et temporel qui entrent en jeu.

Relevant les caractéristiques de cette organisation et de la demande, nous avons souhaité étudier si le service de ces requêtes de transport par un réseau de transport en commun adapté à ce type de demande pourrait constituer une piste de réduction des coûts intéressante pour les CIUSSSs. Nous avons donc défini un problème de conception de réseau adapté à des personnes à mobilité réduite. Ces adaptations concernent en particulier la formulation d'une contrainte de LIFO pour l'organisation des trajets, ainsi que l'interdiction de transferts entre des routes.

La matrice OD de la demande étant très peu dense, nous avons choisi de réduire la dimension du problème. Cela nous a amenés à réaliser un double partitionnement de la demande. Afin de filtrer le bruit sans introduire de biais, nous avons procédé à l'aide d'une méthode de partitionnement basée sur la densité, qui filtre automatiquement une partie des demandes. Ce type de méthode permet de plus de trouver des groupes de formes indéterminées. Deux mesures d'évaluation de la forme des partitions obtenues nous ont permis de définir des paramètres d'entrée pour les deux niveaux de partitionnement considérés. En fonction de ces paramètres initiaux, nous avons pu dessiner des réseaux, dont nous avons évalué la qualité de réponse lors d'une étape d'affectation des patients. La variation de l'homogénéité des zones géographiques construites influence la faisabilité des réseaux, et leur qualité finale : le regroupement des demandes en clusters plus compacts et distants les uns des autres permet de construire des réseaux auxquels nous pouvons ensuite affecter les demandes, alors qu'une

partition moins définie détériore la qualité des zones construites lors du second niveau de clustering. L'étude de l'influence de la compacité des clusters sur la qualité du réseau conçu pourrait être poursuivie choisissant une autre mesure de distance entre les demandes, puis en exploitant plus avant l'ordre structurel donné par l'algorithme OPTICS : plutôt que de considérer une distance ε de génération des clusters, nous pourrions orienter la recherche selon la densité souhaitée. Avec une mesure de distance plus adaptée, cette construction plus fine des clusters pourrait amener un dessin différent des réseaux.

Les réseaux construits par cette méthode comportent plus d'une centaine de routes, dont une plus petite part est réellement utilisée. Le nombre de routes déviées dans le réseau est au moins aussi important que le nombre de routes dont le trajet initialement construit est finalement suivi. De plus, les routes sont parcourues pour ne transporter qu'un ou deux patients en général qui, de plus, ne se trouvent pas toujours en même temps à bord du véhicule. Le parcours actuel des routes revient donc à transporter les patients les uns après les autres de manière personnelle, en parcourant des routes plus longues que nécessaire au service.

L'étape d'affectation a permis de conclure que selon l'organisation actuelle du transport des patients, il n'est pas intéressant, d'un point de vue financier et organisationnel, d'implanter un réseau de transport en commun pour déplacer les patients de ces CIUSSSs. En revanche, les réseaux définis permettent d'offrir un service très confortable aux patients, qui voyagent rapidement et arrivent à destination sans trop d'avance.

La méthode de construction des routes du réseau présente la faiblesse de trop vouloir accomoder la contrainte de LIFO. Les routes dessinées s'étendent donc et visitent plusieurs fois le même lieu. Les routes dessinées semblent donc moins celles d'un réseau. Ce type de route est aussi moins économique que des routes qui, en plus de satisfaire la contrainte de LIFO, ne visiteraient qu'une seule fois chaque lieu requis (Levitin and Abezgaouz, 2003). Cependant, les multiples contraintes à respecter (arrêt aux lieux d'origine et de destination des patients, aucun transfert autorisé) demandent une personnalisation des routes trop importante pour organiser les déplacements des patients au travers d'un réseau de transport en commun. Pour évaluer la réelle faisabilité d'une solution, il faudrait, de plus, prendre en compte la variabilité des horaires de retour de rendez-vous. Il faudrait donc construire le réseau sur une demande plus incertaine encore que celle qui a servi de base aux tests réalisés ici.

Dans la mesure où les routes ne servent qu'un ou deux patients, l'heuristique de réduction du nombre de routes n'est pas optimale. En effet, elle assimile les routes les plus courtes qui sont incluses ou proches de routes plus longues. Elle privilégie en ce sens de longs parcours au lieu de réduire la longueur totale des routes du réseau, et donc son coût potentiel. Une approche

visant à maximiser le nombre de paires OD présentes dans les routes conservées pour le réseau pourrait présenter de meilleures possibilités. De plus, le tracé des routes et de leurs déviations démontre que, par les nombreux allers-retours réalisés entre les lieux majeurs relevés lors de l'analyse des données, les routes construites forment des étoiles. Cela introduit une nouvelle façon de réduire les routes, qui supprimerait les pointes des étoiles pour n'ajouter les lieux que si nécessaire. Le réseau s'en trouverait épuré.

L'homogénéité spatiale observée des groupes constituant les zones du second niveau de partitionnement nous laissent penser qu'en détruisant l'organisation horaire actuelle des déplacements, nous pourrions étudier plus avant si une organisation en réseau des transports peut permettre de réduire les coûts de transport de manière suffisamment significative pour que l'effort de réorganisation des services qui serait nécessaire, et l'investissement matériel (flotte et matériel actuellement loué aux transporteurs externes) pourrait devenir rentable. Actuellement, les CIUSSSs émettent la possibilité de jumeler des transports lors de trajets répétés entre des établissements de santé. Cette première étape permettrait d'introduire dans le monde médical la possibilité de soumettre les emplois du temps des rendez-vous aux besoins des transports. A partir de là, la mise en place d'un système de transport à la demande à l'échelle de l'Ile-de-Montréal pourrait offrir la flexibilité nécessaire pour servir la demande de transport de manière rentable tout en respectant les multiples contraintes liées au contexte d'implantation de la solution.

RÉFÉRENCES

- J. Agrawal et T. V. Mathew, “Transit route network design using parallel genetic algorithm”, *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 248–256, 2004. DOI : 10.1061/(ASCE)0887-3801(2004)18:3(248). En ligne : <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290887-3801%282004%2918%3A3%28248%29>
- M. Ankerst, M. M. Breunig, H.-P. Kriegel, et J. Sander, “Optics : Ordering points to identify the clustering structure”, pp. 49–60, 1999. DOI : 10.1145/304182.304187. En ligne : <http://doi.acm.org/10.1145/304182.304187>
- R. O. Arbex et C. B. da Cunha, “Efficient transit network design and frequencies setting multi-objective optimization by alternating objective genetic algorithm”, *Transportation Research Part B : Methodological*, vol. 81, no. Part 2, pp. 355 – 376, 2015, optimization of Urban Transportation Service Networks. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.06.014>. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261515001435>
- M. Baaj et H. S. Mahmassani, “Hybrid route generation heuristic algorithm for the design of transit networks”, *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 3, no. 1, pp. 31 – 50, 1995. DOI : [https://doi.org/10.1016/0968-090X\(94\)00011-S](https://doi.org/10.1016/0968-090X(94)00011-S). En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0968090X9400011S>
- J. F. Bard et A. I. Jarrah, “Large-scale constrained clustering for rationalizing pickup and delivery operations”, *Transportation Research Part B : Methodological*, vol. 43, no. 5, pp. 542 – 561, 2009. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.trb.2008.10.003>. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261508001203>
- J. Beasley, “Route first—cluster second methods for vehicle routing”, *Omega*, vol. 11, no. 4, pp. 403 – 408, 1983. DOI : [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(83\)90033-6](https://doi.org/10.1016/0305-0483(83)90033-6). En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0305048383900336>
- V. Bélanger, E. Lanzarone, A. Ruiz, et P. Soriano, “The ambulance relocation and dispatching problem”, *Technical Report, Interuniversity Research Center on Enterprise Networks, Logistics and Transportation, CIRRELT-2015-59*, p. 17, 2015.
- E. Benavent, M. Landete, E. Mota, et G. Tirado, “The multiple vehicle pickup and delivery problem with lifo constraints”, *European Journal of Operational Research*, vol. 243, no. 3,

pp. 752 – 762, 2015. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.12.029>. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221714010479>

M. Bielli et P. Carotenuto, “A new approach for transport network design and optimization”, European Regional Science Association, ERSA conference papers ersa98p414, Août 1998. En ligne : <https://ideas.repec.org/p/wiw/wiwsa/ersa98p414.html>

R. Bowerman, B. Hall, et P. Calamai, “A multi-objective optimization approach to urban school bus routing : Formulation and solution method”, *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, vol. 29, no. 2, pp. 107 – 123, 1995. DOI : [https://doi.org/10.1016/0965-8564\(94\)E0006-U](https://doi.org/10.1016/0965-8564(94)E0006-U). En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0965856494E0006U>

A.-S. Briand, E. Côme, M. K. El Mahrsi, et L. Oukhellou, “A mixture model clustering approach for temporal passenger pattern characterization in public transport”, *International Journal of Data Science and Analytics*, vol. 1, no. 1, pp. 37–50, Apr 2016. DOI : [10.1007/s41060-015-0002-x](https://doi.org/10.1007/s41060-015-0002-x). En ligne : <https://doi.org/10.1007/s41060-015-0002-x>

G. Cabanes et Y. Bennani, “A simultaneous two-level clustering algorithm for automatic model selection”, 2007. DOI : DOI: 10.1109/ICMLA.2007.71

F. Carrabs, R. Cerulli, et J.-F. Cordeau, “An additive branch-and-bound algorithm for the pickup and delivery traveling salesman problem with lifo or fifo loading”, *INFOR : Information Systems and Operational Research*, vol. 45, no. 4, pp. 223–238, 2007. DOI : [10.3138/infor.45.4.223](https://doi.org/10.3138/infor.45.4.223). En ligne : <http://dx.doi.org/10.3138/infor.45.4.223>

A. Ceder, “Operational objective functions in designing public transport routes”, *Journal of Advanced Transportation*, vol. 35, no. 2, pp. 125–144, 2001. DOI : [10.1002/atr.5670350205](https://doi.org/10.1002/atr.5670350205). En ligne : <http://dx.doi.org/10.1002/atr.5670350205>

A. Ceder et H. M. Wilson, “Bus network design”, vol. 20B, no. 4, pp. 331–334, 1986.

P. Chakroborty et T. Wivedi, “Optimal route network design for transit systems using genetic algorithms”, *Engineering Optimization*, vol. 34, no. 1, pp. 83–100, 2002. DOI : [10.1080/03052150210909](https://doi.org/10.1080/03052150210909). En ligne : <http://dx.doi.org/10.1080/03052150210909>

B. Cheang, X. Gao, A. Lim, H. Qin, et W. Zhu, “Multiple pickup and delivery traveling salesman problem with last-in-first-out loading and distance constraints”, *European Journal of Operational Research*, vol. 223, no. 1, pp. 60–75, 2012. En ligne : <https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:ejores:v:223:y:2012:i:1:p:60-75>

- M. Cherkesly, G. Desaulniers, et G. Laporte, “Branch-price-and-cut algorithms for the pickup and delivery problem with time windows and last-in-first-out loading”, *Transportation Science*, vol. 49, no. 4, pp. 752–766, 2015. En ligne : <https://EconPapers.repec.org/RePEc:inm:ortrsc:v:49:y:2015:i:4:p:752-766>
- E. Y. Cheu, C. K. Kwok, et Z. Zhou, “On the two-level hybrid clustering algorithm”, 2004.
- E. Cipriani, G. Fusco, S. Gori, et M. Petrelli, “A procedure for the solution of the urban bus network design problem with elastic demand”, 2004, pp. 681–685.
- A. Corberán, E. Fernández, M. Laguna, et R. Martí, “Heuristic solutions to the problem of routing school buses with multiple objectives”, *Journal of the Operational Research Society*, vol. 53, no. 4, pp. 427–435, Apr 2002. DOI : 10.1057/palgrave.jors.2601324. En ligne : <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601324>
- J.-F. Cordeau, M. Iori, G. Laporte, et J. J. Salazar González, “A branch-and-cut algorithm for the pickup and delivery traveling salesman problem with lifo loading”, *Networks*, vol. 55, no. 1, pp. 46–59, 2010. DOI : 10.1002/net.20312. En ligne : <http://dx.doi.org/10.1002/net.20312>
- G. Desaulniers et M. Hickman, “Chapter 2 public transit”, vol. 14, 12 2007.
- J. Desrosiers, Y. Dumas, S. François, S. Taillefer, et D. Villeneuve, “An algorithm for mini-clustering in handicapped transport”, *Les Cahiers du GERAD*, vol. G-91-02, 1991.
- E. Dubois, “Comparaison de stratégies d’organisation du transport de patients à montréal à l’aide d’un modèle de simulation”, Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, january 2018.
- M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, et X. Xu, “A density-based algorithm for discovering clusters a density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise”, dans *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, série KDD’96. AAAI Press, 1996, pp. 226–231. En ligne : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=3001460.3001507>
- W. Fan et R. B. Machemehl, “Optimal transit route network design problem with variable transit demand : Genetic algorithm approach”, *Journal of Transportation Engineering*, vol. 132, no. 1, pp. 40–51, 2006. DOI : 10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:1(40). En ligne : <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-947X%282006%29132%3A1%2840%29>

G. Fusco, S. Gori, et M. Petrelli, “A heuristic transit network design algorithm for medium size towns”, dans *Proceedings of 9th Euro Working Group on Transportation*, 2002, pp. 652–656.

X. Gao, A. Lim, H. Qin, et W. Zhu, “Multiple pickup and delivery tsp with lifo and distance constraints : A vns approach”, pp. 193–202, 2011. DOI : 10.1007/978-3-642-21827-9_20. En ligne : https://doi.org/10.1007/978-3-642-21827-9_20

C. Gracia, X. Anguera, et X. Binefa, “Two-level clustering towards unsupervised discovery of acoustic classes”, 2013. DOI : 10.1109/ICMLA.2013.139

V. Guihaire et J.-K. Hao, “Transit network design and scheduling : A global review”, *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, vol. 42, no. 10, pp. 1251 – 1273, 2008. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.03.011>. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856408000888>

M. Guissé, “Sarcelles : ces patients de l'hôpital adeptes du covoiturage... d'ambulance!”. LeParisien, 2017. En ligne : <http://www.leparisien.fr>

J. Han, J. Pei, et M. Kamber, *Data mining : concepts and techniques*. Elsevier, 2011.

J. Han, M. Kamber, et J. Pei, *Data Mining : Concept and Techniques - Third Edition*. Elsevier, 2012.

J. Hu, X. Shi, J. Song, et Y. Xu, “Optimal design for urban mass transit network based on evolutionary algorithms”, dans *Advances in Natural Computation : First International Conference, ICNC 2005, Changsha, China, August 27-29, 2005, Proceedings, Part II*, L. Wang, K. Chen, et Y. S. Ong, éds. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2005, pp. 1089–1100. DOI : 10.1007/11539117_148. En ligne : https://doi.org/10.1007/11539117_148

S. Kagaya, S. Kikuchi, et R. A. Donnelly, “Use of a fuzzy theory technique for grouping of trips in the vehicle routing and scheduling problem”, *European Journal of Operational Research*, vol. 76, no. 1, pp. 143 – 154, 1994. DOI : [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90012-4). En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377221794900124>

K. Kepaptsoglou et M. Karlaftis, “Transit route network design problem : Review”, *Journal of Transportation Engineering*, vol. 135, no. 8, pp. 491–505, 2009. DOI :

10.1061/(ASCE)0733-947X(2009)135:8(491). En ligne : <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-947X%282009%29135%3A8%28491%29>

V. Kumar, E.-H. S. Han, et G. Karypis, “Chameleon : Hierarchical clustering using dynamic modeling”, *Computer*, vol. 32, pp. 68–75, 1999. DOI : doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/2.781637

C.-P. Lai, P.-C. Chung, et V. S. Tseng, “A novel two-level clustering method for time series data analysis”, *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no. 9, pp. 6319 – 6326, 2010. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.02.089>. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417410001284>

W. Lampkin et P. D. Saalmans, “The design of routes, service frequencies, and schedules for a municipal bus undertaking : A case study”, *OR*, vol. 18, no. 4, pp. 375–397, 1967. En ligne : <http://www.jstor.org/stable/3007688>

J.-G. Lee, J. Han, et K.-Y. Whang, “Trajectory clustering : A partition-and-group framework”, dans *Proceedings of the 2007 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, série SIGMOD ’07. New York, NY, USA : ACM, 2007, pp. 593–604. DOI : [10.1145/1247480.1247546](https://doi.acm.org/10.1145/1247480.1247546). En ligne : <http://doi.acm.org/10.1145/1247480.1247546>

G. Levitin, “Organization of computations that enables one to use stack memory optimally”, *Soviet Journal of Computer and System Science*, vol. 24(6), p. 151–9, 1986.

G. Levitin et R. Abezgaouz, “Optimal routing of multiple-load agv subject to lifo loading constraints”, *Computers and Operations Research*, vol. 30, no. 3, pp. 397–410, 2003. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(01\)00106-X](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(01)00106-X). En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030505480100106X>

Y. Li, A. Lim, W.-C. Oon, H. Qin, et D. Tu, “The tree representation for the pickup and delivery traveling salesman problem with lifo loading”, *European Journal of Operational Research*, vol. 212, no. 3, pp. 482 – 496, 2011. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.02.008>. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221711001391>

L. Liu, P. Olszewski, et e. M. t. C. b. T. y. . p. S. a. B. p. . a. A. i. . d. . u. h. Goh, Pong-Chai.

T. L. Magnanti et R. T. Wong, “Network design and transportation planning : Models and algorithms”, *Transportation Science*, vol. 18, no. 1, pp. 1–55, 1984. DOI :

10.1287/trsc.18.1.1. En ligne : <https://doi.org/10.1287/trsc.18.1.1>

C. E. Mandl, "Evaluation and optimization of urban public transportation networks", *European Journal of Operational Research*, vol. 5, no. 6, pp. 396 – 404, 1980. DOI : [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(80\)90126-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(80)90126-5). En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377221780901265>

Montréal et Statistiques-Canada, "Montréal en statistiques - caractéristiques géographiques". Montréal and Statistiques-Canada. En ligne : http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=6897,67859572&_dad=portal&_schema=PORTAL

C. L. Mumford, "New heuristic and evolutionary operators for the multi-objective urban transit routing problem", dans *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 2013.

M. Nanni et D. Pedreschi, "Time-focused clustering of trajectories of moving objects", 2006.

J. Pacheco, "Heuristico para los problemas de ruta con carga y descarga en sistemas lifo", *SORT, Statistics and Operation Research Transactions*, vol. 21, pp. 69–86, 1997a.

J. Park et B.-I. Kim, "The school bus routing problem : A review", *European Journal of Operational Research*, vol. 202, no. 2, pp. 311 – 319, 2010. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.05.017>. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037722170900349X>

S. B. Pattnaik, S. Mohan, et V. M. Tom, "Urban bus transit route network design using genetic algorithm", *Journal of Transportation Engineering*, vol. 124, no. 4, pp. 368–375, 1998. DOI : [10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1998\)124:4\(368\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1998)124:4(368)). En ligne : <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-947X%281998%29124%3A4%28368%29>

E. Petitdemange, "Le transoprt non urgent des patients entre les hôpitaux de montréal : un prototype pour l'automatisation du choix du transport et de l'accompagnement", Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, june 2017.

B. Rekiek, A. Delchambre, et H. A. Saleh, "Handicapped person transportation : An application of the grouping genetic algorithm", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 19, no. 5, pp. 511 – 520, 2006. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2005.12.013>. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197606000339>

R. Ruiz, C. Maroto, et J. Alcaraz, "A decision support system for a real vehicle routing problem", *European Journal of Operational Research*, vol. 153, no. 3, pp. 593 – 606, 2004,

eURO Young Scientists. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00265-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00265-0). En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221703002650>

M. M. Solomon, “Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints”, *Operations Research*, vol. 35, no. 2, pp. 254–265, 1987. En ligne : <http://www.jstor.org/stable/170697>

Statistique-Canada, “Projections démographiques pour le canada, les provinces et les territoires”, 2015. En ligne : <https://www.statcan.gc.ca/pub/91-520-x/2010001/part-partie3-fra.htm>

C. Tarantilis, D. Diakoulaki, et C. Kiranoudis, “Combination of geographical information system and efficient routing algorithms for real life distribution operations”, *European Journal of Operational Research*, vol. 152, no. 2, pp. 437 – 453, 2004, new Technologies in Transportation Systems. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00035-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00035-3). En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221703000353>

V. M. Tom et S. Mohan, “Transit route network design using frequency coded genetic algorithm”, *Journal of Transportation Engineering*, vol. 129, no. 2, pp. 186–195, 2003. DOI : 10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:2(186). En ligne : <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-947X%282003%29129%3A2%28186%29>

P. Toth et D. Vigo, “Heuristic algorithms for the handicapped persons transportation problem”, *Transportation Science*, vol. 31, no. 1, pp. 60–71, 1997. DOI : 10.1287/trsc.31.1.60. En ligne : <https://doi.org/10.1287/trsc.31.1.60>

D. Tu, S. Guo, H. Qin, W.-C. Oon, et A. Lim, “The tree representation of feasible solutions for the tsp with pickup and delivery and lifo loading”, dans *Proceedings of the Twenty-Fourth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, série AAAI’10. AAAI Press, 2010, pp. 191–196. En ligne : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2898607.2898638>

Y. Volchenkov, “Organization of calculations that allows the use of stack memory”, *Eng Cybernetics, Soviet J Comput SystSci*, vol. 20, pp. 109–115, 1982.

E. E. Zachariadis, C. D. Tarantilis, et C. T. Kiranoudis, “The vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries and two-dimensional loading constraints”, *European Journal of Operational Research*, vol. 251, no. 2, pp. 369–386, 2016. En ligne : <https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:ejores:v:251:y:2016:i:2:p:369-386>

T. Zhang, R. Ramakrishnan, et M. Livny, “Birch : an efficient data clustering method for

very large databases”, dans *In Proc. of the ACM SIGMOD Intl. Conference on Management of Data (SIGMOD, 1996*, pp. 103–114.

F. Zhao, A. Gan, et T. V. Mathew, “Optimization of transit network to minimize transfers”, *Florida International Univ., Fla.*, 2003.

L. Özdamar et O. Demir, “A hierarchical clustering and routing procedure for large scale disaster relief logistics planning”, *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, vol. 48, no. 3, pp. 591 – 602, 2012. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.11.003>. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554511001396>

ANNEXE A DÉFINITIONS LIÉES AU PARTITIONNEMENT BASÉ SUR LA DENSITÉ ET PSEUDOS-CODES DES ALGORITHMES DBSCAN ET OPTICS

Les concepts suivants ont été introduits par Ester et al. (1996) pour démontrer la justesse théorique de leur algorithme DBSCAN. Cet algorithme rassemble les données en groupes denses et en sépare le bruit (ensemble des objets trop éloignés des autres pour pouvoir appartenir à un groupe dont la densité est assez significative). La densité minimale permettant de constituer un groupe est définie à l'aide d'une *distance génératrice* notée ε . Un groupe peut alors être caractérisé comme un ensemble d'objets séparés par une distance inférieure ou égale à ε . L' ε -voisinage d'un point devient ainsi une notion importante. Sa définition et celles des concepts qui suivent sont illustrées sur la Figure A.1.

Définition 1 : (ε -voisinage d'un point)

L' ε -voisinage d'un point p est constitué de l'ensemble des points de la base de données dont la distance au point p est inférieure ou égale à ε :

$$N_\varepsilon(p) = \{q \in \mathcal{D} \mid \delta(p, q) \leq \varepsilon\} \quad (\text{A.1})$$

Afin de pouvoir définir un cluster, Ester et al. (1996) expliquent que l'on peut caractériser un point p selon son ε -voisinage, qui peut varier d'un objet à un autre au sein d'un même groupe. En effet, l' ε -voisinage des objets centraux d'un groupe sera plus important que celui des objets qui se trouvent à sa bordure. Parmi les objets d'un groupe, on distinguera donc les *points-cœurs* et les *points frontaliers* selon la définition suivante :

Définition 2 : (point-cœur et point frontalier)

Un objet d'un cluster est appelé *point-cœur* si son ε -voisinage contient au moins un nombre minimal d'objets μ . Sinon, il est un *point frontalier* de son groupe. Les différentes caractérisations possibles d'un objet d'un ensemble sont observables sur la Figure A.1. Sur cette figure, les points contenus dans le cercle en pointillés forment l' ε -voisinage de son point central.

$$|N_\varepsilon(p)| \geq \mu \quad (\text{A.2})$$

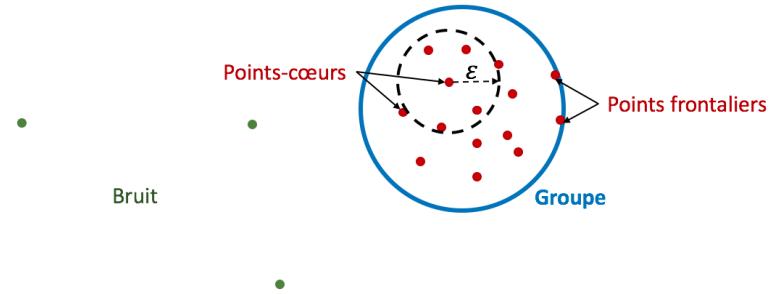


Figure A.1 ε -voisinage, points-coeurs, points frontaliers et bruit dans un ensemble de données

Afin d'inclure tous les objets d'un groupe tout en filtrant les objets du bruit, Ester et al. (1996) introduisent ensuite les définitions suivantes :

Définition 3 : (objet directement accessible par densité)

Un objet q est dit *directement accessible par densité* s'il existe un point-coeur p dans le cluster tel que q appartient au ε -voisinage de p . C'est-à-dire que q est *directement accessible par densité* si :

$$\begin{cases} q \in N_\varepsilon(p) \\ |N_\varepsilon(p)| \geq \mu \text{ (condition de point-coeur)} \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

Définition 4 : (objet accessible par densité)

Un objet q est *accessible par densité* à partir d'un point p par rapport à ε et à μ s'il existe une chaîne d'objets q_1, \dots, q_n tel que :

$$\begin{cases} q_1 = p, \\ q_n = q, \\ \forall i \in [1, n], q_{i+1} \text{ est directement accessible par densité à partir de } p_i \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

Cette dernière relation, qui est transitive, vient élargir la notion d'objet *directement accessible par densité*. Les deux qualités sont symétriques uniquement pour des points-coeurs, à cause de la condition de point-coeur. Pour cette raison, deux points frontaliers d'un même groupe ne seront pas accessibles par densité l'un à partir de l'autre. Néanmoins, il existera nécessairement un point-coeur dans leur groupe à partir duquel ces deux points seront accessibles par densité. Ester et al. (1996) qualifient ces deux points de *connectés par densité*.

Définition 5 : (connecté par densité)

Un point q est dit *connecté par densité* à un point p par rapport à ε et μ s'il existe un point o à partir duquel p et q sont accessibles par densité par rapport à ε et μ .

Cette relation est symétrique pour tous les objets d'un groupe et réflexive pour des objets accessibles par densité. La Figure A.2 représente les concepts d'accessibilité et de connectivité par densité des objets d'un ensemble de données.

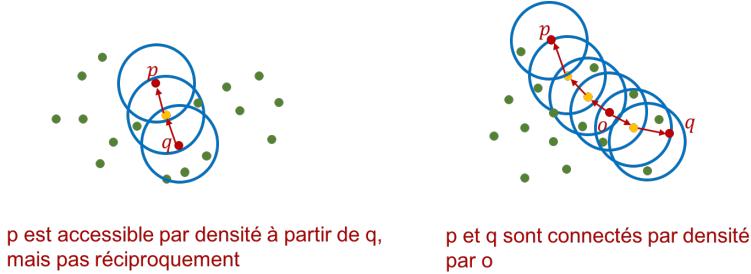


Figure A.2 Accessibilité et connectivité par densité d'objets de l'ensemble (Ester et al., 1996)

A partir de ces définitions, Ester et al. (1996) formalisent la définition intuitive d'un groupe d'objets basée sur la densité.

Définition 6 : (groupe d'objets)

Soit \mathcal{D} une base de données d'objets. Un ensemble d'objets \mathcal{C} est un groupe par rapport à ε et μ si :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{C} \neq \emptyset, \\ \forall (p, q) \in \mathcal{C} \times \mathcal{D}, \text{ si } p \in \mathcal{C} \text{ et } q \text{ est accessible par densité à partir de } p \text{ par rapport à } \varepsilon \text{ et } \mu, \text{ alors } q \in \mathcal{C}. \\ \forall (p, q) \in \mathcal{C}^2, p \text{ est connecté par densité à } q \text{ par rapport à } \varepsilon \text{ et } \mu. \text{ (Connectivité)} \end{array} \right.$$

Le bruit est alors constitué de tous les objets n'appartenant à aucun groupe.

Définition 7 : (bruit)

Soient $\mathcal{C}_1, \dots, \mathcal{C}_k$ les groupes d'objets d'une base de données \mathcal{D} . Le *bruit* est l'ensemble des points de \mathcal{D} n'appartenant à aucun groupe d'objets, i.e.

$$\text{bruit} = \{p \in \mathcal{D} : \forall i \in [1, k], p \notin \mathcal{C}_i\} \quad (\text{A.6})$$

A partir de ces définitions, Ester et al. (1996) démontrent qu'"un groupe d'objets \mathcal{C} contient

exactement les objets accessibles par densité à partir d'un point-cœur de \mathcal{C}^* . Dès lors, un groupe d'objets peut être construit en rassemblant autour d'un point-cœur tous les objets qui sont accessibles par densité à partir de lui.

L'algorithme DBSCAN est basé sur cette dernière considération. Pour chaque objet p de l'ensemble, si son ε -voisinage contient au moins μ objets, un groupe rassemblant p et tous ses ε -voisins est construit. Jusqu'à ce que tous les objets possibles aient été ajoutés au groupe, les ε -voisinages des objets entrants sont analysés. Si ces ε -voisinages contiennent au moins μ voisins, les voisins ne l'étant pas encore sont intégrés au groupe.

Ankerst et al. (1999) ont constaté que pour une valeur de μ choisie, plusieurs niveaux de densité apparaissent dans les groupes d'objets construits. Pour pouvoir atteindre ces différents niveaux de densité sans réitérer l'algorithme DBSCAN, il est possible de traiter les objets de l'ensemble dans un ordre précis, et d'identifier ainsi tous les groupes existants, quelle que soit leur densité. Pour cela, il faut à chaque étape sélectionner l'objet accessible par densité le plus proche de l'objet courant. De cette façon, les groupes d'objets les plus denses seront construits d'abord et inclus, comme le prévoit l'intuition, dans les groupes moins denses auxquels ils appartiennent par inclusion.

Afin de pouvoir construire des groupes de n'importe quelle densité souhaitée, (Ankerst et al., 1999) ont donc préféré construire un ordre des objets indiquant la structure de la base de données pour un couple de paramètres ε et μ . Cette structure est construite selon l'algorithme OPTICS. Elle est traduite par deux valeurs calculées pour chaque objet de l'ensemble : son *diamètre-cœur* et sa *distance d'accessibilité*.

Définition 8 : (diamètre-cœur d'un objet p)

Le diamètre-cœur d'un objet p est la distance minimale ε_i entre p et l'un de ses ε -voisins tel que p est un objet-cœur par rapport à ε_i et μ . Notons $\mu\text{-distance}(p)$ la distance de p à son $\mu^{\text{ème}}$ voisin le plus proche. Alors :

$$\text{diametre_coeur}_{\varepsilon,\mu}(p) = \begin{cases} \text{INDEFINIE} & \text{si } |N_\varepsilon(p)| < \mu, \\ \mu\text{-distance}(p) & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{A.7})$$

Définition 9 : (distance d'accessibilité d'un objet p par rapport à un objet o)

Soient p et o deux objets d'un ensemble \mathcal{D} . La *distance d'accessibilité* de p par rapport à o est la plus petite distance telle que p est directement accessible par densité à partir de o . L'accessibilité directe d'un objet à partir d'un autre étant soumise à la condition de point-cœur, cette distance ne peut être inférieure au diamètre-cœur de o , dans le cas où o est un

point-cœur. Dans le cas contraire, cette distance est indéfinie. La distance d'accessibilité de p par rapport à o peut donc être formalisée selon l'équation A.8. La Figure A.3 illustre les concepts de diamètre-cœur (d) et de distance d'accessibilité (r).

$$diam\grave{e}tre_coeur_{\varepsilon,\mu}(p) = \begin{cases} IND\acute{E}FINIE & \text{si } |N_\varepsilon(p)| < \mu, \\ \max(diam\grave{e}tre_coeur(o), distance(o, p)) & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

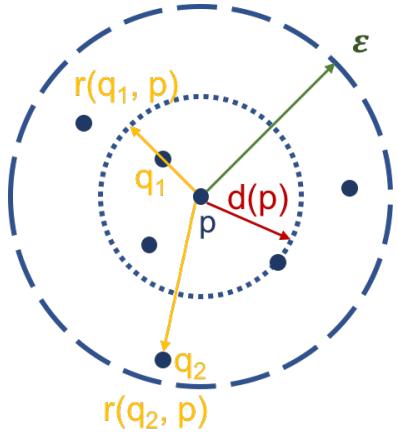


Figure A.3 Diamètre-cœur d'un objet et distance d'accessibilité, dans le cas où $\mu = 4$ (Ankerst et al., 1999)

Le pseudo-code de l'algorithme OPTICS est tel que retranscrit par l'Algorithme 5. Une boucle parcourt les objets de la base de données et ordonne les points selon leur distance d'accessibilité minimale. Pour cela, elle s'appuie sur les points-cœurs, dont elle traite les ε -voisinage successifs.

Algorithme 5 : Pseudo code de l'algorithme OPTICS

```

1 Données : Base de données des objets
2 Résultat : Liste ordonnées des objets et de leurs distances d'accessibilité
3 pour chaque objet de la base de données faire
4   p.indiquerCommeTraité();
5   N  $\leftarrow N_{\varepsilon}(p)$ ;
6   p.distanceAccessibilité  $\leftarrow$  INDÉFINIE ;
7   p.fixeDiamètrecœur(N,  $\varepsilon$ ,  $\mu$ ) ;
8   si p est un point-cœur alors
9     fileVoisins.mettreAjour(N,p) ;
10    tant que fileVoisins n'est pas vide faire
11      q  $\leftarrow$  fileVoisins.retirer();
12      q.indiquerCommeTraité();
13      N  $\leftarrow N_{\varepsilon}(q)$ ;
14      q.fixeDiamètrecœur(N,  $\varepsilon$ ,  $\mu$ ) ;
15      si q est un point-cœur alors
16        fileVoisins.mettreAjour(N,q) ;
  
```

L'Algorithme 6 décrit la fonction réalisant la mise à jour de la file de voisins, à partir de l'objet p considéré et de son ε -voisinage. L'objectif de l'algorithme OPTICS étant d'ordonner les objets de l'ensemble en fonction de leur distance d'accessibilité la plus faible, la mise à jour de la file permet de garantir que c'est bien cette information qui sera retranscrite dans le fichier de sortie. Pour cela, les voisins v de p ne se trouvant pas déjà dans la file y sont insérés avec leur distance d'accessibilité par rapport à p . En revanche, si un voisin de p se trouve déjà dans la file, sa distance d'accessibilité est recalculée comme le minimum entre sa distance d'accessibilité actuelle et cette même distance définie par rapport à p . La structure choisie pour la file de voisins est une *PriorityMinQueue*. Ainsi, les voisins qu'elle contient sont traités dans l'ordre croissant de leur distance d'accessibilité. Cette manière de procéder, associée à la mise à jour des distances d'accessibilité des voisins, permet de conserver pour

chaque objet l'information pertinente.

Algorithme 6 : Fonction de mise à jour de la file de voisins

```

1 Données : Voisinage N de l'objet p, objet p
2 Résultat : File de voisins de l'objet p mise à jour
3 diamètrecœur ← p.diamètrecœur ;
4 pour chaque voisin v dans N faire
5   si v n'a pas été traité alors
6     NdistanceAccessibilité ← max{(diamètrecœur, distance(p, v)};
7     si v.distanceAccessibilité = INDÉFINIE alors
8       v.distanceAccessibilité ← NdistanceAccessibilité;
9       ajouterAfile((v, NdistanceAccessibilité));
10    sinon
11      // Dans ce cas, v est déjà dans la file de voisins de p
12      si NdistanceAccessibilité < v.distanceAccessibilité alors
13        v.distanceAccessibilité ← NdistanceAccessibilité
  
```

A partir de l'ordre des objets donné par OPTICS, il est possible de construire une partition de l'ensemble des objets relative à μ pour toute valeur de ε_i inférieure ou égale à ε , appelée la *distance génératrice*. Cette partition est obtenue en parcourant la liste des distances d'accessibilité des objets dans l'ordre obtenu. Tant que les distances d'accessibilité sont inférieures ou égales à la distance ε_i choisie, les objets sont placés dans le même groupe. Lorsque la distance d'accessibilité d'un objet est supérieure à ε_i , cela signifie que la distance entre cet objet et l'objet le plus proche à partir duquel il est directement accessible est supérieure à ε_i . Dans ce cas, si l'objet est un point-cœur pour les valeurs de ε_i et μ considérée un nouveau groupe est créé. Sinon, l'objet est ajouté au bruit. Cette fonction de création des clusters s'écrit tel que le présente l'Algorithme 7. Elle a été écrite pour créer les clusters dans la partition obtenue par l'algorithme DBSCAN (Ester et al., 1996) puis reprise pour OPTICS (Ankerst et al., 1999).

Algorithme 7 : Fonction de création des groupes d'objets

```

1 Données : Liste ordonnées des objets et de leurs distances d'accessibilité,  $\varepsilon_i$ ,  $\mu$ 
2 Résultat : Partition = ensemble de groupes d'objets
  // Condition initiale :  $\varepsilon_i \leq \varepsilon$ 
3 Bruit  $\leftarrow$  GroupeObjets();
4 pour chaque objet  $p$  dans l'ordre donné par OPTICS faire
5    si  $p.DistanceAccessibilité > \varepsilon_i$  alors
    // INDÉFINIE  $> \varepsilon$ 
6     si  $p.diamètrecœur \leq \varepsilon_i$  alors
    | groupeCourant  $\leftarrow$  GroupeObjets();
    | groupeCourant.ajouter( $p$ )
7     sinon
8       Bruit.ajouter( $p$ )
9    sinon
    // alors  $p.distanceAccessibilité \leq \varepsilon_i$ 
10      groupeCourant.ajouter( $p$ )
11   
12   
  
```

**ANNEXE B PARAMÈTRES UTILISÉS POUR LE PARTITIONNEMENT
HEBDOMADAIRE DES DEMANDES**

Tableau B.1 Paramètres utilisés pour le partitionnement hebdomadaire des demandes

Semaine	$Q_{m_{min}}$		\bar{s}_{max}		$\%bruit_{min}$	
	ε	μ	ε	μ	ε	μ
15	1	10	1	9	5	3
16	1	10	1	8	5	3
17	1	10	1	7	5	3
18	1	10	1	4	5	3
19	1	10	1	7	5	3
20	1	10	1	5	5	3
21	1	10	1	3	5	3
22	1	10	1	10	5	3
23	1	10	1	9	5	3
24	1	10	1	8	5	3
25	1	10	1	8	5	3
26	1	10	1	8	5	3
27	1	10	1	4	5	3
28	1	10	1	8	5	3
29	1	10	1	7	5	3
30	1	10	1	10	5	3
31	1	10	1	10	5	3
32	1	10	1	8	5	3
33	1	10	2	10	5	3
34	1	10	1	10	5	3
35	1	10	1	7	5	3
36	1	10	2	10	5	3
37	1	10	1	9	5	3
38	1	10	1	4	5	3
39	1	10	2	10	5	3