

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CONTRIBUTION DU GPS DANS LA
CARACTÉRISATION SPATIO-TEMPORELLE DES
ATTRIBUTS DU SERVICE DE TRANSPORT ADAPTÉ

EYA-WETU TALAKI

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE CIVIL)

AOÛT 2006



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-19334-1

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-19334-1

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

CONTRIBUTION DU GPS DANS LA CARACTÉRISATION SPATIO-
TEMPORELLE DES ATTRIBUTS DU TRANSPORT ADAPTÉ

Présenté par : TALAKI Eya-Wetu

En vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise Ès Sciences Appliquées

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

M. BAASS Karsten, Ph. D., Président

M. CHAPLEAU Robert, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. TRÉPANIÉ Martin, Ph. D., membre

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie ses parents Mr Ekpaoh TALAKI et Mme Éyouna Réfèipikédi GNAZOU pour les nombreux sacrifices auxquels ils ont consenti, pour lui permettre de parfaire son apprentissage et sa formation par la réalisation d'une maîtrise dont ce mémoire est l'aboutissement. Sans leur soutien, rien de tout ceci n'eût eu jamais lieu. Merci.

L'auteur tient à exprimer sa reconnaissance au professeur Robert CHAPLEAU pour son engagement, sa disponibilité ; pour l'intérêt qu'il lui a porté tout au long de son cheminement de maîtrise et pour le soutien financier qu'il lui a apporté. À travers Mr CHAPLEAU, c'est tout le groupe MADITUC (Catherine MORENCY, Martin TRÉPANIER, Bruno ALLARD, Guillaume BISAILLON, Daniel PICHE) que l'auteur souhaite remercier pour le cadre académique dont il a bénéficié, pour l'exposition à des connaissances techniques et à un savoir-faire de qualité dont il fut l'objet.

Merci à tous mes collègues, étudiants en maîtrise ou en stage, qui, par leur présence active, ont contribué à faire du département de transport un lieu d'apprentissage convivial.

RÉSUMÉ

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche de documentation quantitative des principaux paramètres du service de Transport Adapté [TA].

Le contexte techniquement et socialement complexe du Transport Adapté est marqué par une forte augmentation de la demande et par une sensibilité particulière à l'égard des personnes à mobilité réduite; qui se traduit par une incessante croissance des exigences pour un service de meilleure qualité. À cet égard, une caractérisation fine de chacun des attributs du service de TA est, à juste titre, une préoccupation constante pour les planificateurs et les instances responsables du service de Transport Adapté.

La connaissance de la logistique complète reflétant la nature multidimensionnelle du service de TA offert par la Société de Transport de Montréal [STM] est le point de départ pour la caractérisation spatio-temporelle des attributs de ce service. Le potentiel analytique des données GPS des véhicules de la flotte permet de dresser un portrait plus fidèle du service offert.

La méthodologie adoptée s'appuie sur le traitement individualisé de chaque élément du système de Transport Adapté ; par l'entremise d'une modélisation orienté-objet de l'approche totalement désagrégée. Les outils de visualisation (FGIS, DIVA GIS) et de technologies informationnelles (Ms Excel, Ms Access) sont mis à contribution pour une organisation systémique de l'ensemble des données disponibles.

Après une analyse descriptive des données de tournées planifiées et réalisées dont nous disposons, plusieurs expérimentations sont menées afin de développer des méthodes pour la caractérisation des différents objets du Transport Adapté. La visualisation et l'analyse des chaînes de déplacements, la régularité des déplacements effectués, les caractéristiques des destinations, les durées des déplacements, sont autant d'informations qui permettent de dériver le statut de chaque client (travailleur, étudiant, bénéficiaire de soins de santé...). La nature des lieux (maison, école, lieu de travail, hôpital) est quant à elle, dérivée des heures de fréquentation, de la durée des activités,

du bassin d'attraction et du type de handicap, de l'âge et du statut des clients qui s'y rendent. Sur le plan opérationnel, la mise en perspective des données de tournées planifiées et des données de tournées réalisées fournies par la trace GPS permet de détecter les retards et les avances à l'arrivée et au départ. Les phénomènes d'absences et annulation tardives ont aussi été mieux caractérisés en analysant les baisses de performances qu'elles occasionnent dans les tournées. Jusqu'à 20% du temps total en service d'un minibus peut être inutilisé à cause des absences et des annulations tardives.

À la lumière de toutes ces expérimentations, une modélisation orienté-objet d'un système de Transport Adapté doté de GPS est proposée, dans le but de systématiser différentes procédures d'exploration et de caractérisation des objets.

ABSTRACT

This memory falls under a step of quantitative documentation of the principal parameters of the service of paratransit.

The technically and socially complex context of paratransit is marked by a strong increase in demand and by a particular sensitivity with regard to disabled people. This situation results in a ceaseless growth of the requirements in order to provide a more improve services for people with disabilities. In this respect, a fine characterization of each attribute of the service of paratransit is, rightly, a constant concern for the managers and the authorities responsible for the paratransit service.

The complete knowledge of the logistics reflecting the multidimensional nature of the service of paratransit offered by Société de Transport de Montreal [STM] is the starting point for the space-time characterization of the attributes of this service. The analytical potential of the GPS data of the vehicles of the fleet makes it possible to draw up a more faithful portrait of the services offered.

The used methodology is based on the individualized treatment of each element of the system of paratransit; through an object-oriented modeling of the completely disaggregated approach. The tools of visualization and informational technologies are used for a systemic organization of the available data.

After a descriptive analysis of the data of bus trips planned and carried out, several experiments are carried out in order to develop methods for the characterization of the various objects of paratransit. The visualization and the analysis of the chains of displacements, the regularity of displacements carried out, the characteristics of the destinations, the durations of displacements, are as many informations which makes it possible to derive the statute of each customer (worker, student, recipient of care of health...).

The nature of the places (house, school, place of work, hospital) is as for it derived from the hours of frequentation, of the duration of the activities, the basin of attraction and

the type of handicap, the age and the statute of the customers who go there.

On the operational level, the setting in prospect for the data of planned rounds and data of rounds carried out provided by GPS trace make it possible to detect the delays and the advancements on arrival and departure. The phenomena of no-shows and late cancellations are characterized by analyzing the falls of performances as they cause in the rounds. Up to 20% of the round time of a minibus is, sometimes, unused because of no-shows and late cancellations.

In the light of all these experiments, an object-oriented modeling of the system of paratransit is proposed, with an aim of systematizing various procedures of exploration and characterization of paratransit objects.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES TABLEAUX.....	xviii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Objectifs	1
1.2 Méthodologie	2
CHAPITRE 2 LE TRANSPORT ADAPTÉ À MONTRÉAL, ÉTAT DES LIEUX .5	
2.1 Le cadre législatif.....	5
2.2 Le cadre institutionnel et financier.....	6
2.3 Le cadre opérationnel	8
2.3.1 Admissibilité	8
2.3.2 Réservation	10
2.3.3 Le service de tournées de minibus	12
2.4 Le transport adapté à Montréal en quelques chiffres	13
CHAPITRE 3 REVUE DE LITTÉRATURE	15
3.1 Quel service pour les personnes à mobilité réduite ?	15
3.1.1 L'accessibilité totale	16
3.1.2 Le service de transport parallèle, adapté à la demande	17
3.2 Modélisation d'un système de transport	20
3.2.1 Les limitations de la procédure séquentielle classique.....	20
3.2.2 L'approche totalement désagrégée.....	22
3.2.3 L'approche orienté-objet.....	26
3.3 Les systèmes d'aide à la planification (CADS)	28

3.4	Les systèmes d'information géographique (SIG)	29
3.5	Les systèmes de positionnement, le GPS	30
3.6	Outils et techniques d'analyse géo statistique	32
3.6.1	Mesure de centralité et de dispersion	32
3.6.2	Corrélation spatiale	35
3.6.3	Techniques d'agrégation de données spatiales (Clusters)	38
3.6.4	Mesures de densité	41
CHAPITRE 4 DESCRIPTION DES DONNÉES DE TA (MARS 2005)		44
4.1	Les enregistrements GPS à intervalles réguliers	45
4.1.1	L'identification du véhicule	45
4.1.2	Localisation spatio-temporel du véhicule	46
4.1.3	Information cinétique	47
4.2	Les enregistrements évènementiels de points GPS	47
4.2.1	Identification du véhicule	48
4.2.2	La description des évènements	49
4.2.3	Localisation spatio-temporelle	51
4.3	Rapport de la planification des tournées	51
4.3.1	Identification de la tournée	52
4.3.2	Identification des clients	53
4.3.3	Localisation des arrêts-tournée	55
4.3.4	Le temps	55
4.4	Résumé du chapitre	56
CHAPITRE 5 ANALYSE TOTALEMENT DÉSAGRÉGÉE DU SYSTÈME DE		
TA		57
5.1	Traitements préliminaires, activités à valeurs ajoutées	57
5.1.1	Clef primaire	57
5.1.2	Uniformisation des codes d'identification des objets dans les bases de données	57
5.1.3	Uniformisation des références de coordonnées	58
5.1.4	Localisation du garage	59
5.2	La modélisation orienté-objet du transport adapté	60
5.2.1	Le réseau de TA	63

5.2.2	La classe client	64
5.2.3	La classe lieu	68
5.2.4	La classe déplacement	72
5.2.5	La classe Tournée	78
5.2.6	Le véhicule	86
5.3	Les chaînes de déplacements et schéma d'activités	87
5.3.1	Définition d'une chaîne complète de déplacement.	88
5.3.2	La chaîne journalière de déplacement	89
5.3.3	Reconstitution des déplacements manquants	91
5.3.4	Les rythmes d'activités	94
5.4	Détection des corridors de tournées	95
5.5	Analyse des retards (Horaire planifié vs horaire client).....	99
CHAPITRE 6 ANALYSE DE LA TRACE GPS.....		102
6.1	Échantillonnage des véhicules équipés de GPS	102
6.2	Validité des enregistrements GPS	103
6.2.1	La trace GPS et le profil de vitesse	105
6.3	Analogie entre le TC et le TA (Tableau de marche)	108
6.3.1	Structure d'une ligne de TC : ligne 51 de la STM	108
6.3.2	Segmentation spatio-temporelle de la trace GPS d'un véhicule	113
6.4	Fusion des données planifiées et réalisées	116
6.4.1	Procédure d'association des données planifiées et réalisées	117
6.4.2	Diagramme espace-temps	121
6.4.3	Mise à jour des temps d'embarquements et de débarquement	122
6.4.4	Les annulations tardives et absences	124
CHAPITRE 7 CONCLUSION.....		125
BIBLIOGRAPHIE		128

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Plan du mémoire	2
Figure 2.1 : L'Île de Montréal : le territoire desservi par la STM (source : site Web de la ville de Montréal, http://ville.montreal.qc.ca/).....	5
Figure 2.2 : Organismes de transport adapté de la GRM. (Source : http://www.amt.qc.ca).....	7
Figure 2.3 : Capture d'écran du logiciel Giro/Acces 5 (source : http://www.giro.ca , site Web de Giro).....	13
Figure 3.1 : Schéma conceptuel d'un handicap OMS 1980.....	15
Figure 3.2 : Cadre conceptuel pour les services de transport à la demande (reconstitué de Vuchic, 1978)	18
Figure 3.3 : Schéma des opérations du transport adapté à la demande (Source : TRCP report 9).....	19
Figure 3.4 : Illustration des principales composantes d'un système de paratransit. Parallèle avec les composantes du modèle SimParatransit.	20
Figure 3.5 : Structure générale d'un modèle séquentiel classique (emprunté de MORENCY, 2004)	21
Figure 3.6 : Intégration des composantes du système d'information totalement désagrégé : bases de données sur la mobilité, patrons d'activités de jours et de nuit, SIG-transport et données sociodémographiques. (Chapleau et Morency, 2002).....	23
Figure 3.7 : Traitement désagrégé d'un déplacement individuel et relations avec les autres objets de transport. (CHAPLEAU, 2003).....	25
Figure 3.8 : Décomposition de l'information géographique en système de couches avec les différents types d'entités (Source : http://www.gis.com/whatisgis/whyusegis.html consulté le 7 mars 2006)	29

Figure 3.9 : Spatialisation du nombre d'évènements enregistrés pour chaque lieu.....	39
Figure 3.10 : Clusters spatiaux des lieux d'embarquement et de débarquement.....	40
Figure 3.11 : Estimation de la densité des lieux d'activité, affichage sur une grille de 100 m de largeur de cellule. Choix de la fonction $k()$ et du paramètre h	43
Figure 4.1 : Heure d'émissions des positions GPS dans le fichier TelvisantPositions_200503.csv	46
Figure 4.2 : Distribution du champ de vitesse en mph.....	47
Figure 4.3 : Représentation à l'aide de boxplot de la distribution de la distance entre les évènements arrêt et démarrage successifs, selon le jour et selon le véhicule.	50
Figure 4.4 : Distribution des clients par nombre de mouvements.....	53
Figure 4.5 : Distribution des clients par nombre de mouvements d'embarquement ou de débarquement.	54
Figure 4.6 : Distribution des clients par nombre d'annulations.....	54
Figure 4.7 : Distribution des clients par proportion de déplacements annulés	54
Figure 5.1 : Capture d'écran du logiciel GEOTRANS V2.2.6	59
Figure 5.2 : Localisation d'un garage par la densité des évènements d'arrêt et de démarrage du moteur. (X_{utm} , Y_{utm}) = (608 220, 5 046 445).....	60
Figure 5.3 : Modèle objets du Transport adapté (TRÉPANIER, 1999).....	61
Figure 5.4 : Modèle objet simplifié du système de Transport adapté.	62
Figure 5.5 : Évolution de la flotte de TA selon le jour de la semaine. (109 véhicules distincts, 27353 déplacements effectués, 989 annulations).	64
Figure 5.6 : Pyramide d'âge des clients selon le type de handicap.....	66
Figure 5.7 : Moyenne d'âge par type de handicap (3833 clients, 31 jours : du 1er au 31 mars 2005).....	66

Figure 5.8 : Nombre de déplacements par jour actif selon le type de handicap.	67
Figure 5.9: Concentration des domiciles dérivés (grille 1km x 1km).....	71
Figure 5.10 Taille des domiciles dérivés.....	72
Figure 5.11 : Longueur des déplacements (tranches de 1km).....	74
Figure 5.12 : Durée des déplacements (tranches de 5 minutes).....	75
Figure 5.13 Nombre moyen de déplacement par jour selon l'âge du (mois de mars 2005, 3855 clients).....	76
Figure 5.14 : Nombre moyen de déplacement par jour selon le nombre total de jours d'activité du client (mois de mars 2005, 31 jours, 3855 clients)	76
Figure 5.15 : Caractérisation de la mobilité de la clientèle. Répartition selon le nombre de jours d'activité.....	77
Figure 5.16 : Distribution des déplacements selon le nombre d'arrêts intermédiaires subis par le client.....	78
Figure 5.17 Relation objet entre une tournée et un arrêt-tournée	79
Figure 5.18 : Distribution des tournées selon le nombre de clients desservis (2965 tournées, 3833 clients)	81
Figure 5.19: Distribution de la longueur des tournées.	81
Figure 5.20: Proportion de kilométrage mort par tournée.....	82
Figure 5.21: Segmentation des tournées selon le nombre de clients desservis et la durée des tournées (2965 tournées, 3833 clients, 17 tournées sans clients).	83
Figure 5.22: Nombre de tournées en service sur le réseau de la STM (intervalles de 15 minutes). Journée du mardi 1 ^{er} mars 2005.	84
Figure 5.23: Nombre de clients pris en charge sur le réseau de TA de la STM. (intervalle de 15 minutes). Journée du mardi 1 ^{er} mars 2005.....	84
Figure 5.24 : Nombre de tournées d'une durée équivalent à 2 pièces de travail, en	

service sur le réseau de la STM. Intervalles de 15 minutes. Journée du mardi 1 ^{er} mars 2005.....	85
Figure 5.25 : Nombre de clients pris en charge par les tournées d'une durée équivalent à une pièce de travail. Intervalles de 15 minutes. Journée du mardi 1 ^{er} mars 2005.....	85
Figure 5.26 : Nombre de tournées d'une durée équivalent à 2 pièces de travail, en service sur le réseau de la STM (intervalles de 15 minutes). Journée du mardi 1 ^{er} mars 2005.....	86
Figure 5.27 Nombre de clients pris en charge par les tournées d'une durée équivalent à 2 pièces de travail. Intervalles de 15 minutes. Journée du mardi 1 ^{er} mars 2005.....	86
Figure 5.28 : Évolution de la charge maximale en service d'un véhicule (exemple du minibus 52206 ; équipé de GPS).....	87
Figure 5.29: Modèle objet d'une chaîne de déplacements.	88
Figure 5.30 : Exemple schématique d'une séquence journalière de déplacements d'un client. Cette chaîne comporte 7 déplacements impliquant 5 lieux géolocalisés dont le domicile et 4 destinations.....	89
Figure 5.31 : Chaîne de déplacement incomplète. Un déplacement manquant au milieu d'une chaîne de 7 déplacements.....	92
Figure 5.32 : Chaîne de déplacements incomplète. Cas d'un déplacement manquant à une des extrémités d'une chaîne de 6 déplacements.....	92
Figure 5.33 Chaîne de déplacements incomplète.....	93
Figure 5.34 Processus itératif de dérivation du statut des clients, des motifs de déplacement et du statut des lieux.....	95
Figure 5.35 : Illustration du chevauchement dans le temps de 2 tournées.....	97
Figure 5.36 Illustration de la problématique de comparaison de deux tournées.....	98
Figure 5.37: Identification des groupe de plus de 10 tournées similaires. Lieux	

identiques à 75%, clients identiques à 50% (136 tournées).....	99
Figure 5.38 : Segmentation de l'espace temporel à l'arrêt tournée planifié (point de vue du client).....	100
Figure 5.39: Illustration des 6 cas possibles de comparaison entre l'horaire planifié et l'horaire convenu	100
Figure 6.1: Durée des tournées équipées de GPS. Du 1 ^{er} au 31 mars 2005 (190 tournées, 6 minibus).....	103
Figure 6.2: Variation de la distance, de la vitesse et de l'accélération dans le temps. (Vuchic, 1981) , pages 158 à 160)	104
Figure 6.3 Segments de droites formant la trace GPS enregistrée sur l'Île de Montréal. (Espacement< 10 minutes).....	106
Figure 6.4: Moyenne de la vitesse instantanée observée (cellules de 200mètres x 200 mètres, vitesse en kilomètre par heure).....	107
Figure 6.5 Géométrie de la ligne 51 de la STM (direction Est).....	109
Figure 6.6 Modèle objet d'une ligne de TC	110
Figure 6.7 : Parcours de la ligne 51 de la STM.....	111
Figure 6.8 : Diagramme espace temps et profil de vitesse de la ligne 51 direction Est	112
Figure 6.9 : Segmentation de la trace GPS d'une tournée en séquence d'arrêt-GPS....	114
Figure 6.10 Modèle objet des entités de la trace GPS d'une tournée	115
Figure 6.11 Structure de données des arrêts GPS	116
Figure 6.12 Coïncidence spatio-temporelle des arrêts planifiés et réalisés (Exemple d'une tournée desservant 3 clients en 5 arrêts)	117
Figure 6.13 Procédure d'association des arrêts-tournées et des arrêts-GPS	118
Figure 6.14 Coïncidence spatiale des arrêts planifiés, des arrêts réalisés déduits de la trace GPS. Exemple de la tournée ST11457 effectuée par le véhicule 52-325 le 10 mars	

2005	119
Figure 6.15: Diagramme espace temps d'une tournée du véhicule 52-325, le 10 mars 2005, de 15h à 19h. Distance en mètre.	121
Figure 6.16 : Exemple de mise à jour des données des temps d'embarquement et de débarquements à l'aide de la trace GPS.(Tournée ST11457, véhicule 52-325, 10 mars 2005)	123
Figure 6.17: effet d'une annulation tardive d'un déplacement lors d'une tournée (véhicule 52-206, 01 mars 2005). E=embarquement, D=débarquement, A=annulation, G=garage.	124

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Évolution des contributions au financement du TA au niveau de la province du Québec. (Source : site Web du MTQ, http://www.mtq.qc.ca , répertoire statistique du transport adapté 2003).....	6
Tableau 2.2 : Liste des OTA de la grande région de Montréal	7
Tableau 2.3 : Liste des heures de réservations selon le jour	10
Tableau 2.4 : Période d'activités des tournées selon le jour	10
Tableau 2.5 : Liste des jours fériés.....	11
Tableau 2.6 : Segmentation de la clientèle de TA par groupe d'âge et par type de handicap	14
Tableau 2.7 : Achalandage en terme de nombre de déplacements effectués sur le réseau de TA de la STM.....	14
Tableau 2.8 : Achalandage en terme de nombre de déplacements effectués sur le réseau de TA de la STM.....	14
Tableau 2.9 : Financement du transport adapté à Montréal	14
Tableau 4.1 : Description des fichiers de données disponibles pour le TA	44
Tableau 4.2 : Description des champs du fichier TelvisantPositions_200503.csv	45
Tableau 4.3 : Liste des véhicules	46
Tableau 4.4 : Liste des champs du fichier « TelvisantEvents_200503.csv ».....	48
Tableau 4.5 Liste des véhicules dans le fichier « TelvisantEvents_200503.csv ».....	49
Tableau 4.6 : Liste des codes d'évènements et leur occurrence par véhicule.....	49
Tableau 4.7 : Nombre d'excès de vitesse de chaque véhicule. Valeur minimum et maximum des vitesses de pointe atteintes lors de ces excès de vitesse (convertis en km/h)	51

Tableau 4.8 : Liste des champs du fichier « 2005MARS_GLO_TOURNEES.dbf ».....	52
Tableau 4.9 Liste des codes de mouvements et leur description	55
Tableau 5.1 : Liste des attributs et des proc/dure de la classe Client.....	65
Tableau 5.2 : Nombre de déplacements par client selon le type d'handicap	67
Tableau 5.3 : Les attributs de la classe LIEU.....	69
Tableau 5.4 Liste des attributs de la classe Déplacement.	73
Tableau 5.5 Liste des attributs de la classe arrêt-tournée.....	79
Tableau 5.6 Liste des attributs de la classe Tournée.....	80
Tableau 5.7 Exemple de données de chaînes de déplacements d'un client	90
Tableau 5.8 : Régularité d'une chaîne de déplacements d'un client le dimanche	91
Tableau 5.9 Distribution des chaînes journalières de déplacements.....	94
Tableau 5.10 : Exemple de calcul des indices de comparaison deux tournées	98
Tableau 5.11 : Distribution des retards aux arrêts planifiés (point de vue des clients).101	
Tableau 5.12: Corrélation des retards entre les paires d'arrêts successifs.....	101
Tableau 6.1 : Caractéristiques de la ligne 51 de la STM	109
Tableau 6.2 Structure de données du tableau de marche de la ligne 51-Est de la STM111	
Tableau 6.3 : Exemple de calcul de la vitesse sur les segments d'une ligne de TC (ligne 51 de la STM en direction Est)	112
Tableau 6.4 : Extrait de la base de données des évènements GPS montrant les séquences d'arrêt et de mouvement d'un véhicule.....	113
Tableau 6.5 : Tableau de marche d'une trace GPS	115
Tableau 6.6 : Extrait du tableau de planification de la tournée ST11457 effectuée par le véhicule 52-325 le 10 mars 2005.	120

Tableau 6.7 : Détection des arrêts GPS correspondants aux arrêts planifiés de la tournée ST11457 effectuée par le véhicule 52-325 le 10 mars 2005.....	121
---	-----

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les valeurs sociétales d'équité et d'égalité font du transport adapté [TA], au Québec comme ailleurs en occident, un enjeu fondamental tant sur le plan politique que social. Le TA contribue à l'intégration des couches les plus fragiles de la société en assurant la mobilité des personnes à mobilité réduite (personnes âgées, personnes handicapées). Le caractère très coûteux et le niveau de service perfectible du service de transport adapté ne cessent, cependant, d'être décriés par plusieurs. À cela, il faut ajouter une future augmentation considérable de la clientèle à mobilité réduite et par conséquent des coûts du service de transport adapté à cause du vieillissement de la population (Statistiques Canada).

Dans ce contexte techniquement et socialement complexe marqué par une forte augmentation de la demande et par une sensibilité particulière à l'égard des personnes à mobilité réduite, une caractérisation fine de chacun des attributs du service de TA est, à juste titre, une préoccupation constante pour les planificateurs et les instances responsables du service de Transport Adapté. À cet égard, la société de transport de Montréal [STM] a procédé à l'instrumentation GPS de quelques éléments de sa flotte.

1.1 Objectifs

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche de documentation quantitative des principaux paramètres du service de Transport Adapté. La connaissance de la logistique complète reflétant la nature multidimensionnelle du service de TA offert par la Société de Transport de Montréal (STM) est le point de départ pour la caractérisation spatio-temporelle des attributs du service de TA. Le potentiel analytique des données GPS des véhicules de la flotte permettra de dresser un portrait plus fidèle du service offert.

En plus des indicateurs habituels comme le nombre de véhicule-heures, de passagers-heures, la vitesse commerciale, le profil de charge, la disponibilité de la trace GPS rend possible l'estimation d'un indice d'allongement du déplacement, le calcul des temps réels d'embarquement et de débarquement. La ponctualité du service peut-être mesurée

en comparant les heures d'arrivée et de départ planifiées aux heures réelles d'arrivée et de départ extraites de la trace GPS.

1.2 Méthodologie

La méthodologie adoptée s'appuie sur le traitement individualisé de chaque élément du système de Transport Adapté; par l'entremise d'une modélisation orienté objet de l'approche totalement désagrégée. Des outils de visualisation (Diva GIS, fGIS), de technologies informationnelles (Ms Excel) et des systèmes de gestion de base de données (Ms Access) sont mis à contribution pour une organisation systémique de l'ensemble des données disponibles.

Ce rapport de mémoire présente en 5 parties la méthodologie de recherche adoptée pour l'atteinte des différents objectifs de cette recherche de maîtrise.

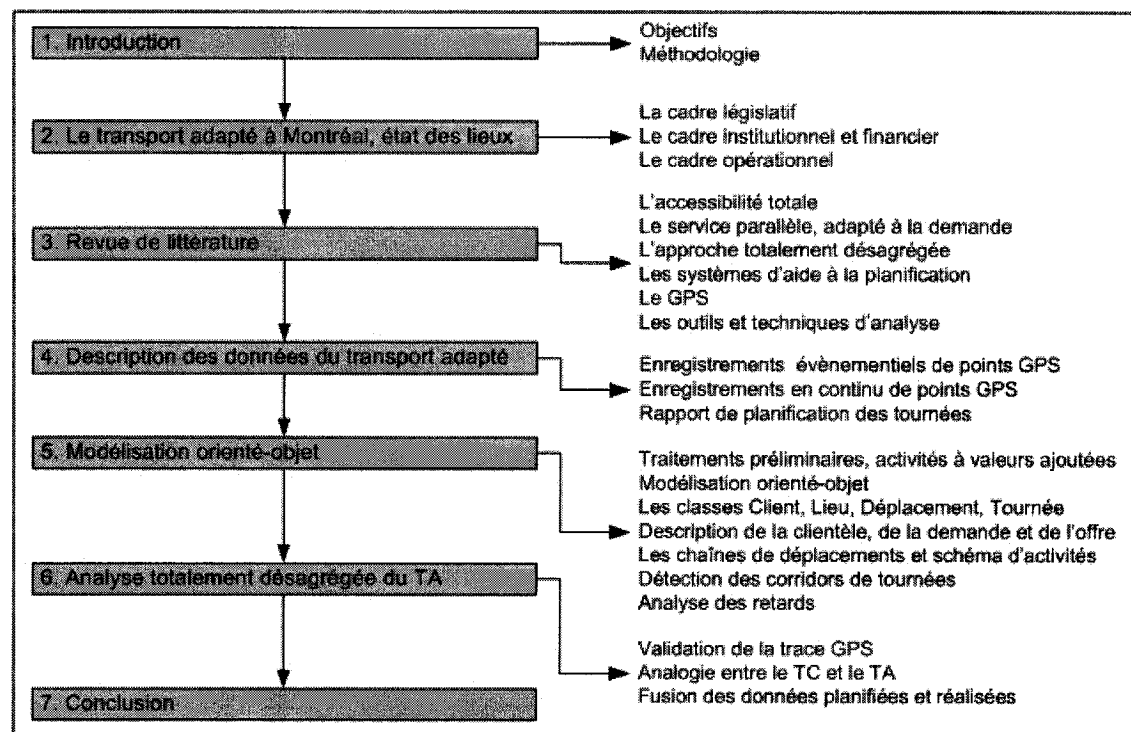


Figure 1.1: Plan du mémoire

La présentation de l'état actuel du service de transport adapté à Montréal ainsi que des principaux intervenants impliqués fait l'objet du chapitre 2.

Dans le chapitre 3, il est fait état des différents axes de recherche et centres d'intérêt en relation avec le transport adapté. Les principales recherches portant sur le service de transport adapté y sont présentées ; ainsi qu'une description des technologies de l'heure (GPS, GIS) et de l'apport escompté de ces technologies dans la planification opérationnelle du TA.

Dans le chapitre 4, après une analyse descriptive des données de tournées planifiées et réalisées mises à notre disposition, plusieurs expérimentations sont menées afin de développer des méthodes pour la caractérisation des différents objets du Transport Adapté.

Le chapitre 5 porte sur l'analyse totalement désagrégée de l'offre, de la demande et du territoire. Une modélisation orienté-objet du système de TA est proposée dans l'optique de systématiser la caractérisation des différentes entités du TA que sont les clients, les déplacements, les lieux et les tournées. Un traitement individuel et systématique est réalisé afin de calculer les différents attributs opérationnels jugés pertinents pour chaque classe d'objets. La nature des lieux (maison, école, lieu de travail, hôpital, autre) et le statut du client (travailleur, étudiant, malade, autre) sont, quant à eux, dérivés des heures de fréquentation, de la durée des activités, du bassin d'attraction, du type d'handicap et de l'âge des clients. La visualisation et l'analyse des chaînes de déplacements, de la durée et de la régularité des déplacements permettent de dresser le profil de la demande. Le territoire est caractérisé par l'identification et la catégorisation des principaux générateurs selon les heures d'activités, la durée des activités, le type de handicap des clients qui les fréquentent.

Le potentiel analytique des données GPS est analysé au chapitre 6. La visualisation de la concentration des événements des véhicules a permis de confirmer la possibilité de localiser le garage uniquement à l'aide de la trace GPS. En s'inspirant de la structure en base de données de la géométrie et du tableau de marche de la ligne de TC numéro 51 de la STM, la trace GPS de chaque véhicule est segmentée en une séquence temporellement ordonnée d'arrêts (par analogie aux arrêt-lignes du transport en

commun). Sur le plan opérationnel, la mise en perspective des données de tournées planifiées et des données de tournées réalisées, fournies par la trace GPS, permet de détecter les retards et les avances à l'arrivée et au départ. Les phénomènes d'absence et annulation tardives sont aussi mieux caractérisés en analysant les baisses de performances qu'ils occasionnent dans les tournées.

L'office des personnes handicapées du Québec [OPHQ] est désigné comme l'organisme mandataire pour veiller à l'application de la loi assurant l'exercice des droits des

personnes handicapées en vue de leur intégration scolaire, professionnelle et sociale. De ce fait, l'OPHQ s'assure du respect des principes et des règles énoncés dans la présente loi. L'OPQH veille également à la poursuite et à la coordination des efforts des différents ministères, municipalités et organismes afin d'améliorer l'intégration des personnes handicapées sur le plan scolaire, professionnel et social.

2.2 Le cadre institutionnel et financier

À l'instar de l'environnement politique à Montréal, le monde du transport se scinde en trois paliers administratifs que sont le fédéral, le provincial et le municipal.

Le gouvernement fédéral, par l'intermédiaire de l'office des transports du Canada, administre l'application des lois du parlement du Canada portant sur le transport au niveau fédéral. Le transport en commun et le transport adapté étant des services de niveau local, ils relèvent uniquement de la compétence des provinces et des municipalités.

Au Québec, le ministère des Transports (du Québec) [MTQ] est l'instance dirigeante dans le domaine des transports. Cette dernière est chargée d'assurer la mobilité des personnes et des marchandises de façon efficace et sécuritaire. Le MTQ a le mandat d'établir des codes et des normes pour l'organisation du transport au niveau de la province. Il contribue aussi de façon substantielle au financement du transport en commun et du transport adapté à Montréal, comme dans les autres villes de la province du Québec.

Tableau 2.1 : Évolution des contributions au financement du TA au niveau de la province du Québec. (Source : site Web du MTQ, <http://www.mtq.qc.ca>, répertoire statistique du transport adapté 2003)

Financement du transport adapté (en milliers de \$CAD)									
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
MTQ	35 385	35 787	36 568	37 959	41 399	44 211	46 379	49 217	51 418
Municipalités	8 829	9 065	9 176	9 458	10 732	11 557	11 391	13 928	16 723
Usagers	4 169	4 501	4 904	5 190	5 587	5 909	6 493	6 997	7 742
Autres service de transp.	289	315	414	673	811	954	1 267	1 554	1 737
Autres	305	252	291	276	417	375	393	720	718
Total	48 977	49 920	51 353	53 556	58 946	63 006	65 923	72 416	78 338

L'agence métropolitaine des transports [AMT] est chargée d'organiser l'intégration des

services de transport entre les 64 municipalités que regroupe la grande région métropolitaine. Les 13 organismes de transport adapté (OTA) desservant la grande région métropolitaine ont effectué, au total, plus de 2 millions de déplacements en 2004 (source : site web de l'AMT).

Tableau 2.2 : Liste des OTA de la grande région de Montréal

Ville	Organisme mandataires du transport adapté	Description	Nombre de clients du TA (2003)
Ile de Montréal	STM (Montréal)	Société de transport de Montréal	14 947
Laval	STL (Laval)	Société de transport de Laval	3 987
Longueuil	RTL (Longueuil)	Réseau de transport de Longueuil	2 827
Couronne nord	CIT Laurentides	Conseil intermunicipal de transport	377
	MRC Les Moulins	Municipalité régionale de comté	
	MRC L'Assomption	Municipalité régionale de comté	
Couronne sud	Ville de Vaudreuil-Dorion		350
	Ville de Châteauguay		768
	Ville de Candiac		323
	Ville de Chambly		210
	CIT de la Vallée du Richelieu	Conseil intermunicipal de transport	
	MRC de Lajemmerais	Municipalité régionale de comté	166
	Ville de Contrecoeur		55

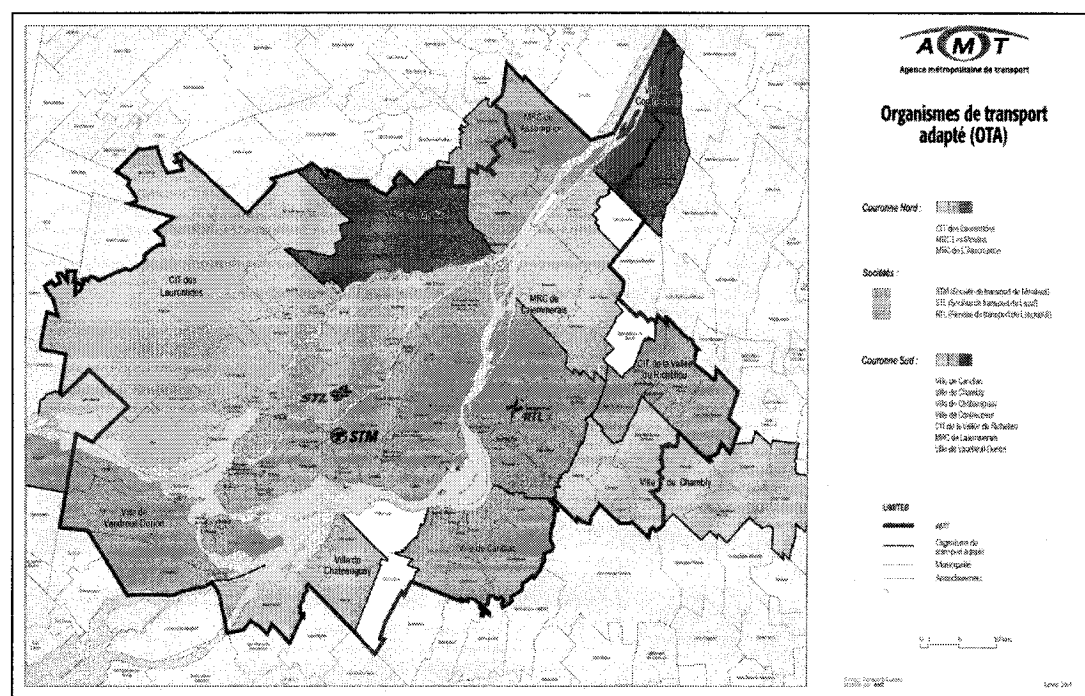


Figure 2.2 : Organismes de transport adapté de la GRM. (Source : <http://www.amt.qc.ca>)

D'autres acteurs importants de la scène du TA à Montréal sont les organismes de

promotion ; organismes à but non lucratif ayant à cœur le respect des droits et l'amélioration des services des personnes handicapées et des personnes âgées. On peut citer à cet égard :

- RUTA : regroupement des usagers du transport adapté
- CAPVISH : comité d'action des personnes vivant des Situations de handicap.

2.3 Le cadre opérationnel

Le service que la STM offre à sa clientèle à mobilité réduite se divise en deux parties complémentaires : l'accessibilité aux bus du TC et un service porte à porte.

Un effort particulier est consenti par la STM pour rendre les principales lignes de TC et les principaux points d'accès au réseau de TC accessibles aux personnes à mobilité réduite. On peut citer les planchers surbaissés dans les autobus, les places réservées pour les handicapés et les personnes âgées dans les autobus, l'annonce vocale des arrêts de bus et la mise en place de signalisations spécifiques aux personnes à mobilité réduite.

Pour ceux dont le handicap est plus important ou qui n'ont pas assez d'autonomie pour utiliser le TC, la STM offre un réseau parallèle de service porte-à-porte, le transport adapté [TA]. Les clients admissibles au service de transport adapté doivent communiquer avec un centre de réservation pour annoncer leurs déplacements. Pour répondre de façon adéquate à l'ensemble des demandes qui lui sont acheminées, le planificateur a à sa disposition une flotte de 86 minibus du transport adapté. Il fait aussi appel au service de taxi.

2.3.1 Admissibilité

Dans le but d'uniformiser le traitement des demandes d'admission au service de transport adapté, le MTQ a défini les critères et exigences qui devront être utilisés pour statuer sur l'admissibilité d'une personne.

Tel qu'expliqué par la politique d'admissibilité au transport adapté de la direction générale des politiques et de la sécurité en transport, pour être admissible au service de transport adapté, le requérant doit être une personne handicapée et avoir des limitations

sur le plan de la mobilité justifiant l'utilisation d'un tel service. (Direction générale des politiques et de la sécurité en transport, 1998)

Être une personne handicapée :

La désignation personne handicapée fait référence à une personne ayant une déficience significative et persistante le limitant dans l'accomplissement d'activités normales. Les clients souffrant de déficiences temporaires ne sont donc pas éligibles à ce service. Aux fins de clarification, l'office des personnes handicapées du Québec définit une déficience comme << une perte, une malformation, une anomalie ou une insuffisance d'un organe, d'une structure ou d'une fonction mentale, psychologique ou anatomique>> (OPQH, 2006). Il est ainsi possible d'identifier :

- La déficience intellectuelle,
- La déficience du psychisme,
- La déficience motrice,
- La déficience organique,
- La déficience visuelle,
- La déficience auditive,
- La déficience de la parole.

Avoir des limitations sur le plan de la mobilité justifiant l'utilisation d'un tel service

L'admission d'une personne au service du transport adapté n'est pas que fonction du type de déficience. Elle dépend surtout des limitations fonctionnelles qui résultent de cette déficience. Dans un souci d'équité et d'uniformité du traitement des demandes, le MTQ définit 6 incapacités pour statuer sur l'admissibilité d'une personne handicapée au service de transport adapté.

- Incapacité de marcher 400 mètres sur un terrain plat :
- Incapacité de monter une marche de 35 centimètres de hauteur avec appui, ou d'en descendre sans appui ;
- Incapacité d'effectuer la totalité d'un déplacement en transport en commun

régulier ;

- Incapacité de s'orienter dans le temps ou dans l'espace ;
- Incapacité de communiquer de façon verbale ou gestuelle (cette incapacité devant être associée à une autre incapacité significative) ;
- Incapacité de maîtriser des situations ou des comportements pouvant être préjudiciables à sa propre sécurité ou à celle des autres.

2.3.2 Réservation

Une fois admis, les usagers qui désirent effectuer un déplacement peuvent faire leur réservation en téléphonant au centre de réservation. Les appels pour réservations ne peuvent se faire que pendant les heures de service du centre de réservation.

Tableau 2.3 : Liste des heures de réservations selon le jour

	Période de réservation
Lundi au Vendredi	6 h 00 à 21 h 30
Samedi, Dimanche	7 h 00 à 21 h 30
Jours fériés	7 h 00 à 21 h 30

En dehors des heures de service, un agent sur place traitera les appels concernant les retards, les annulations et les urgences pour les déplacements planifiés jusqu'à la fin du service des tournées. Tous les déplacements envisagés par les usagers doivent être contenus dans la période d'activité des tournées.

Tableau 2.4 : Période d'activités des tournées selon le jour

	Premier embarquement	Dernier débarquement
Lundi au Jeudi	6 h 30	0 h 30
Vendredi	6 h 30	1 h 30
Samedi	8 h 00	1 h 30
Dimanche	8 h 00	0 h 30

Chaque année, une procédure spéciale de réservation est mise en œuvre pour les jours fériés dont une liste est présentée ci-après.

Tableau 2.5 : Liste des jours fériés

Date	Description de l'évènement
Du 25 Décembre au 2 Janvier	La période des Fêtes de fin d'année
En Mars ou en Avril	le Vendredi saint (avant Pâques)
En Mars ou en Avril	le lundi de Pâques (après Pâques)
Lundi précédant le 25 Mai	La Journée nationale des Patriotes (anciennement fête de Dollard ou fête de la Reine)
24 Juin	La fête nationale du Québec (anciennement Saint-Jean-Baptiste)
1er Juillet	La fête du Canada (anciennement Confédération)
1er Lundi de Septembre	La fête du Travail
2ème Lundi d'Octobre	L'Action de grâce

Selon la régularité, les demandes de déplacements sont classées en demande de déplacements réguliers, demande de déplacements par anticipation et demande de déplacements occasionnels. Les déplacements en groupe font l'objet d'un traitement à part.

La demande de déplacement régulier

Un déplacement est identifié comme régulier s'il est hebdomadaire, répétitif avec un lieu d'origine et un lieu de destination fixes et ce, aux mêmes heures pendant au moins 4 semaines. La réservation pour un tel déplacement peut être faite longtemps à l'avance, mais s'annule automatiquement les jours fériés.

Le client qui désire effectuer son déplacement régulier un jour férié est invité à confirmer ce déplacement en communiquant avec le centre des réservations.

La demande de déplacement par anticipation

Les déplacements prévisibles, mais non réguliers peuvent être déclarés sept jours avant le jour du déplacement. Il est autant dans l'intérêt du client que du planificateur que les déplacements par anticipation soient annoncés le plus tôt possible. L'utilisateur du TA est ainsi assuré de pouvoir effectuer son déplacement au moment souhaité, et le planificateur quant à lui a une marge de manœuvre suffisante pour proposer au client la solution la plus efficace.

La demande de déplacement occasionnel

Pour les déplacements ponctuels dont le client n'a connaissance que tardivement, les réservations peuvent être faites au mieux trois jours avant le jour du déplacement.

La demande de déplacement de groupe

Un groupe d'usagers composé d'au moins 5 clients possédant un numéro de dossier peut procéder à une réservation pour un déplacement en groupe.

Pour faciliter la collecte de données pour les réservations de groupe, un formulaire de demande est mis à la disposition des clients sur le site Web de la STM et au service à la clientèle. La personne chargée de la coordination de ce déplacement en groupe devra faire parvenir ce formulaire, rempli, au Centre de transport adapté de la STM par télécopieur, par courriel ou par courrier au moins 10 jours avant le jour du déplacement.

2.3.3 Le service de tournées de minibus

Lors de la confirmation de la réservation, un intervalle de 30 minutes est communiqué au client comme moment d'embarquement. Une plage horaire prévue pour le débarquement lui est aussi communiquée.

Le parcours de chaque tournée est décrit par une liste chronologique d'arrêts à effectuer pour y embarquer ou débarquer un client. Le répartiteur a la charge de répondre à l'ensemble de la demande formulée en établissant les tournées. Pour ce faire, La STM utilise le logiciel ACCES de la compagnie GIRO comme système d'aide à la planification pour l'assignation des déplacements et la répartition des tournées. La flotte de minibus disponible est composée de 86 minibus. Il est aussi possible de faire appel aux compagnies de taxi pour assurer certains des déplacements, lorsque la condition du client le permet.

Run	Product	Disab	Start	End	Employee	Standby	N	Comment
STT0001	2.86		5:00	9:00				
STT0002	2.40		6:30	9:30				
STT0003	2.00		7:00	14:00				
STT0004	2.46		7:00	14:00				
STT0005	2.92		7:00	14:00				

Run	#	Arrival	Earl T	Late T	Gap	Depart	Real Dep	R	Tps	Customer	Name	TA	TF	AS	WS
STT0005	+	7:15	6:45	7:15		7:24			0h05	1008	Malo, Peter	0	1	1.0	2.0
STT0005	+	7:29	7:00	7:30		7:32			0h01	2030	Clifton, Brenda	1	0	1.0	0.0
STT0005	-	7:39	7:30	8:00		7:41			0h04	2030	Clifton, Brenda	1	0	1.0	0.0
STT0005	-	7:49	7:30	8:00		7:57			0h04	1008	Malo, Peter	0	1	1.0	2.0
STT0005	+	8:02	8:00	8:30						2027	Varney, Jesse	1	0	1.0	0.0
STT0005	+	8:02	8:00	8:30		8:06			0h00	1010	Moon, Trent	1	0	1.0	0.0
STT0005	-	8:12	8:00	9:00		8:14			0h04	2027	Varney, Jesse	1	0	1.0	0.0
STT0005	-	8:22	8:05	9:00		8:24			0h08	1010	Moon, Trent	1	0	1.0	0.0
STT0005	+	8:32	8:15	8:45		8:43			0h01	1012	Myaki, Mitsu	0	1	0.0	1.5
STT0005	+	8:45	8:20	8:50		8:51			0h00	2059	Petersen, Tiff...	0	1	0.0	1.0
STT0005	-	8:55	8:30	9:00						1012	Myaki, Mitsu	0	1	0.0	1.5

Figure 2.3 : Capture d'écran du logiciel Giro/Acces 5 (source : <http://www.giro.ca>, site Web de Giro)

Le logiciel ACCES/GIRO permet l'optimisation en temps réel de l'assignation des véhicules et des conducteurs en fonction des annulations et des réservations occasionnelles ; offrant la possibilité de fusionner des tournées, de réassigner un ou plusieurs déplacements d'une tournée à une autre (Giro Inc., 2006).

2.4 Le transport adapté à Montréal en quelques chiffres

Cette section est une compilation des chiffres concernant le service de transport adapté de la STM. Les principales sources de données exploitées sont :

- L'institut de statistique du Québec
- Enquête québécoise sur les limitations d'activités 1998 (EQLA)
- Enquête sur la santé et les limitations d'activités (ESLA) 1986, 1991
- Le site Web du ministère des Transports du Québec, <http://www.mtq.gouv.qc.ca>

Tableau 2.6 : Segmentation de la clientèle de TA par groupe d'âge et par type de handicap

Clientèle admise par groupe d'âge					
	0 à 5 ans	6 à 21 ans	22 à 65 ans	plus de 65 ans	Total
Ambulatoire	1	36	1643	3963	5643
Fauteuils roulants	12	148	2339	2491	4990
Intellectuelle	8	376	1810	95	2289
Psychique	2	87	305	700	1094
Visuelle	0	8	237	628	873
Autres	0	0	46	12	58
Total	23	655	6380	7889	14947

Tableau 2.7 : Achalandage en terme de nombre de déplacements effectués sur le réseau de TA de la STM

	Ambulatoire	Fauteuils roulants	Accompagnateur	Total
Minibus	188 774	229 348	31 573	449 695
Taxi régulier	719 085	123 638	49 794	892 517
Taxi adapté	71 624	12 315	4 960	88 899
Total	979 483	365 301	86 327	1 431 111

On note que plus de 2/3 des déplacements sont effectués en taxi et que ces déplacements concernent la plupart du temps des clients dits ambulatoires.

Tableau 2.8 : Achalandage en terme de nombre de déplacements effectués sur le réseau de TA de la STM

	Régulier	Occasionnel	Total
Minibus	325 817	123 878	449 695
Taxi régulier	672 762	219 755	892 517
Taxi adapté	67 010	21 889	88 899
Total	1 065 589	365 522	1 431 111

Un tiers des déplacements sont occasionnels.

Tableau 2.9 : Financement du transport adapté à Montréal

Revenus du TA à la STM (2003)		Dépenses du TA à la STM (2003)	
MTQ	21 776 408	Administration	1 522 309
Municipalités	8 019 569	Exploitation	30 005 222
Usagers	1 352 294	Fonctionnement	1 144 617
Autres services	228 540	Masse salariale	15 602 468
Autres	150 720	Immobilisations	1 311 836
		Contrat taxi	11 031 496
		Autres	914 805
Total	31 527 531	Total	31 527 531

CHAPITRE 3 REVUE DE LITTÉRATURE

Le but de ce chapitre est de positionner ce mémoire vis-à-vis des travaux antérieurs qui ont contribué à l'évolution du questionnement dans le domaine de la planification opérationnelle du transport adapté ainsi que de la pratique qui est faite du GPS et des AVL en général dans le transport public.

3.1 Quel service pour les personnes à mobilité réduite ?

S'il est vrai que les personnes dites handicapées souffrent de déficience de nature diverse (organique, psychique) qui, le plus souvent, entraînent chez elles, des incapacités dans la réalisation de certaines tâches quotidiennes, l'exclusion de la vie sociale dont elles sont victimes est surtout la conséquence de la non-adaptabilité de l'environnement socio-culturel dans lequel elles sont appelées à évoluer (OMS, 1980).



Figure 3.1 : Schéma conceptuel d'un handicap OMS 1980

En effet, à cause de la non-adaptation des infrastructures publiques, des activités simples et anodines qui meublent chaque jour de la vie courante comme sortir de chez soi le matin, se rendre à l'arrêt de bus, embarquer dans le bus, débarquer à destination, se rendre à son lieu de travail, peuvent constituer pour une personne handicapée de véritables obstacles insurmontables (Gratton et Deschaintre , 1981).

Le déficit d'accessibilité, parce qu'il a un impact direct sur l'accès à l'éducation et aussi sur la capacité d'assurer un travail constitue, sans doute, pour une personne handicapée, le principal obstacle à son intégration dans la vie sociale et professionnelle. Il ne saurait y avoir d'intégration véritable des personnes handicapées sans l'élimination de la discrimination dont ils sont victimes dans le transport.

Le contrat social d'équité et d'égalité des chances pour tous a amené les institutions gouvernementales, au Canada comme aux États-Unis à se doter de mesures politiques favorisant la pleine participation des personnes handicapées à la vie en société.

Le rapport *TCRP Report 9 : Transit Operations for Individuals with Disabilities* du TRB publié en 1995 fait état d'une enquête menée en 1994 sur les différentes mesures prises par les agences nord-américaines de transport public en faveur de la mobilité des personnes handicapées. Cette enquête dénombrait une vingtaine de mesures (services et améliorations) prises par plus de 634 agences de transport en commun et destinées à l'amélioration de l'accessibilité au transport en commun pour les personnes handicapées. Ces mesures portaient essentiellement sur l'adaptation des équipements aux personnes handicapées, les systèmes d'aide à l'utilisateur et la planification opérationnelle du service. (TRB, 1995)

- L'adaptation des équipements : trottoir abaissé, bus surbaissé, taxi modifié, ascenseurs dans les métros.
- Les systèmes d'aide à l'utilisateur : chauffeur entraîné, annonceur de l'arrêt, navigation à l'aide d'ordinateur de poche, entraînement à la reconnaissance du parcours.
- La planification du paratransit : sur demande, <<route deviation service>>, <<point deviation service>>, réservation.

Deux grandes tendances se dégagent des mesures prises pour assurer un service de transport public aux personnes handicapées. L'une consiste à modifier toutes les infrastructures de transport en commun pour les rendre accessibles aux personnes handicapées tandis que l'autre propose un service spécialisé, à la demande.

3.1.1 L'accessibilité totale

L'accessibilité totale implique une adaptation complète de toutes les infrastructures de transport en commun, pour permettre l'accès au transport régulier pour les personnes à mobilité réduite.

Dès 1996, la STM a commencé l'acquisition d'autobus à plancher surbaissé dans le cadre de sa politique d'accessibilité visant à faciliter l'accès au réseau régulier pour les personnes à mobilité réduite. Toujours dans le cadre de cette politique d'accessibilité, la STM a adopté en 1999 une politique d'accompagnement accordant la gratuité à

l'accompagnateur d'une personne handicapée, que ce soit sur le réseau de transport régulier ou sur le réseau du transport adapté.

En Mai 2002, sous le thème « Merci pour la place », la STM mettait en place une campagne de sensibilisation incitant les usagers du transport en commun à faire preuve de civisme et de courtoisie en respectant les places réservées aux personnes à mobilité réduite dans les bus et dans les voitures de métro.

La modification des infrastructures du transport régulier pour les rendre accessibles est très coûteuse ; mais malgré cela, elle ne supprime qu'en partie les obstacles que doit surmonter une personne handicapée pour effectuer un déplacement (Gratton et Deschaintre et al, 1981). En effet, même si l'organisme mandataire du TC réussit à rendre accessible toutes ces infrastructures, le cheminement du lieu d'origine jusqu'à un point d'accès demeure difficile, voire irréalisable pour une personne souffrant d'un certain type de handicap.

3.1.2 Le service de transport parallèle, adapté à la demande

« Use of a demand responsive service strategy in place of fixed route, fixed schedule service has generally been adopted by communities or operators as a measure to contain cost rather than to improve service ». Demand responsive / ADA. TCRP Report 95 chapitre 6.

D'abord introduit dans le but de limiter les dépenses engendrées par la prise en charge des personnes à mobilité réduite dans le réseau régulier de TC, une forte croissance de la demande a amené les opérateurs du TA à revoir leur politique de service et à se doter d'outils d'aide à la planification et à la gestion d'un système de TA.

Le planificateur du TA a le choix entre différents types de services selon les performances escomptées, le temps de marche acceptable, le temps d'attente acceptable, la possibilité ou non d'effectuer un transfert. La figure ci-après présente un sommaire des types de services possibles selon différents critères.

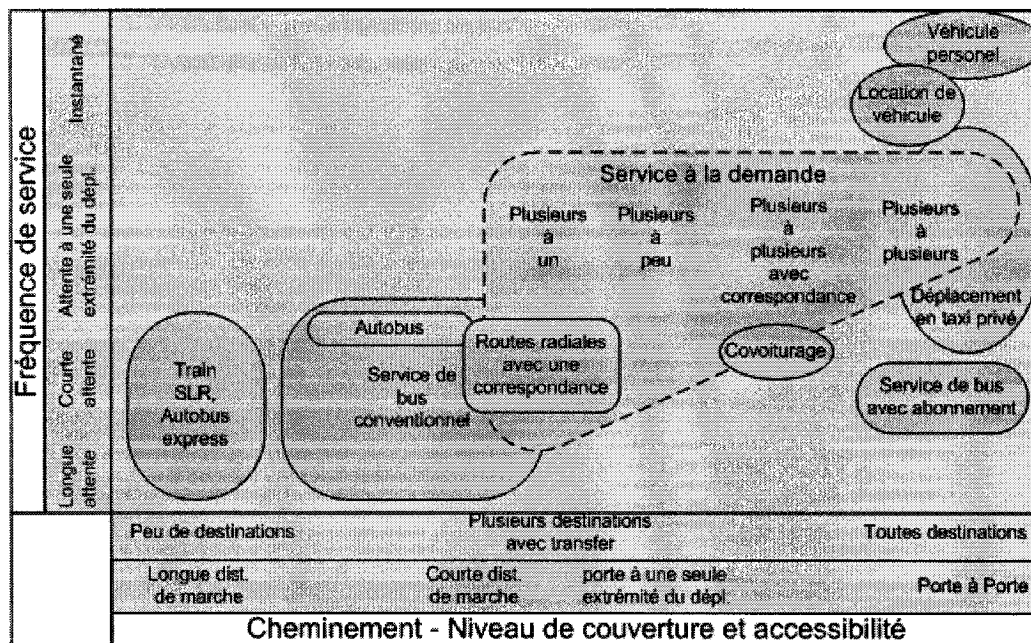


Figure 3.2 : Cadre conceptuel pour les services de transport à la demande (reconstitué de Vuchic, 1978)

Les principales composantes d'un service de transport à la demande définies dans le TRCP report 9 sont illustrées sur la figure ci-après.

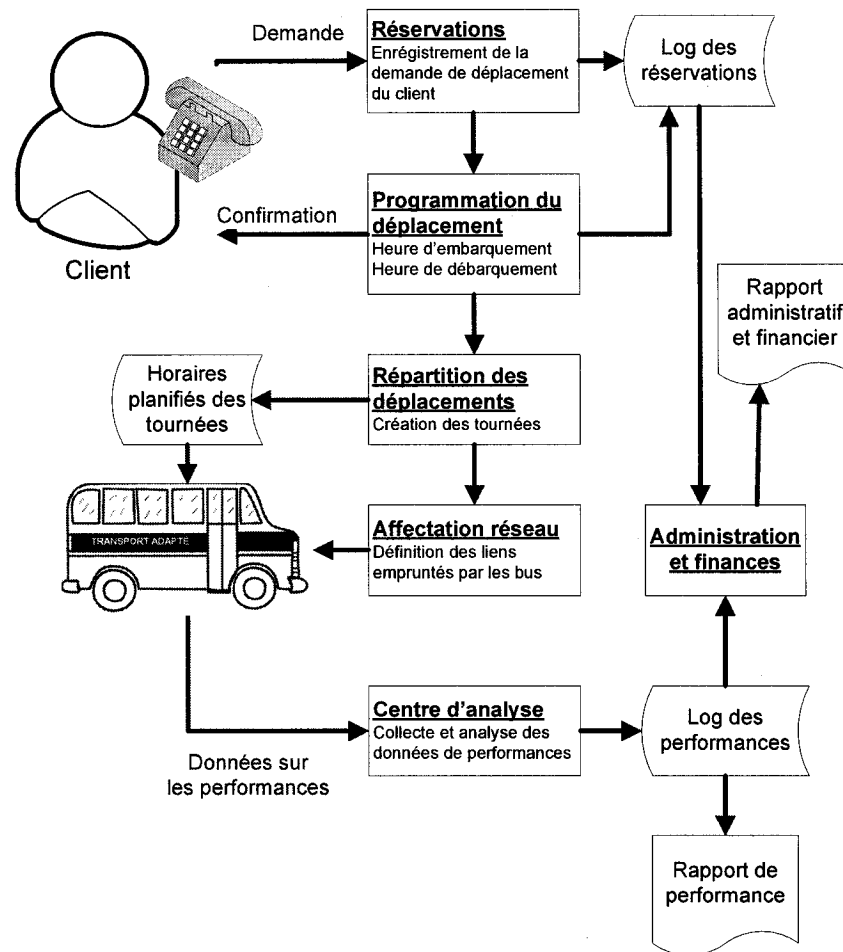


Figure 3.3 : Schéma des opérations du transport adapté à la demande (Source : TRCP report 9)

Le modèle de simulation d'un système de transport adapté, SimParatransit, développé par Liping Fu (Fu Liping, 2002e) présente 9 composantes principales correspondant aux 3 dimensions d'un système de transport que sont le réseau, l'offre et la demande. La figure qui suit en est une illustration.

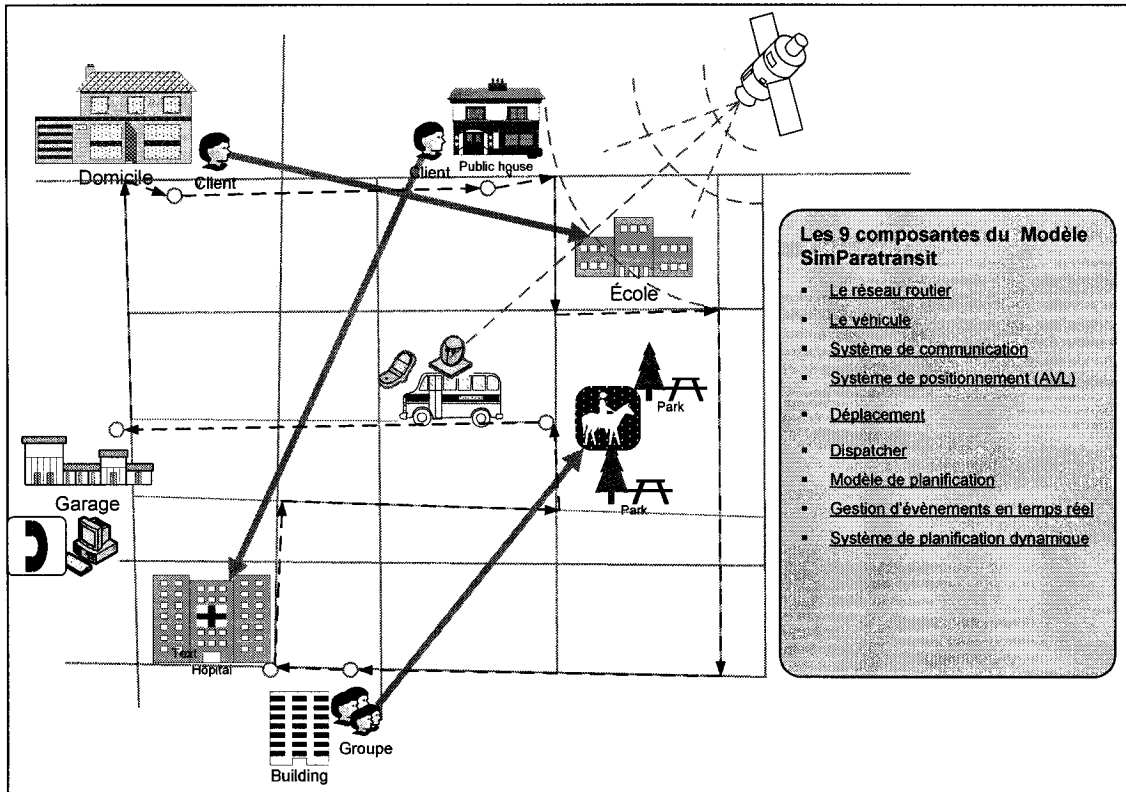


Figure 3.4 : Illustration des principales composantes d'un système de paratransit. Parallèle avec les composantes du modèle SimParatransit.

3.2 Modélisation d'un système de transport

3.2.1 Les limitations de la procédure séquentielle classique

Jusqu'à la fin des années 60, à cause des limitations de calculs, les modèles les plus utilisés dans la modélisation des transports se basaient sur la régression linéaire et l'agrégation des données par zone comme l'indique le guide de la Federal Highway Administration pour la génération des déplacements de 1967 (FHWA, 1967). C'est dans ce contexte que naît la procédure séquentielle classique, aussi nommée la chaîne globale de transport. Cette approche analytique, révolutionnaire pour son époque, propose une modélisation de la demande en 4 étapes séquentielles (la génération des déplacements, la distribution des déplacements, la répartition modale et l'affectation sur le réseau) comme l'indique la Figure 3.5.

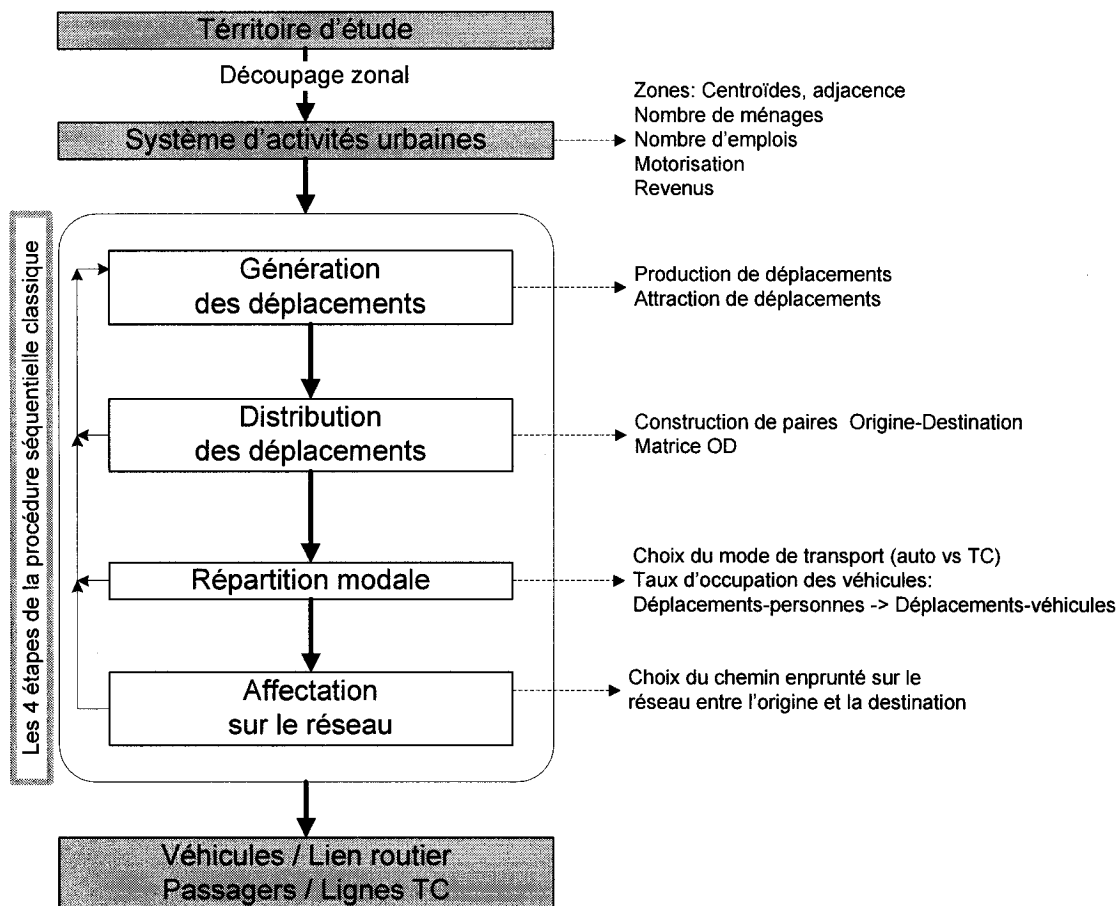


Figure 3.5 : Structure générale d'un modèle séquentiel classique (emprunté de MORENCY, 2004)

Bien que ce modèle soit encore très utilisé dans plusieurs applications (QRS II, EMME, ...), plusieurs auteurs s'accordent à dire que l'approche séquentielle classique a des limitations dues à sa nature agrégée (Chapleau et Morency, 2002, Ortuzar et Willumsen, 2001). Le découpage des localisations en zones force l'hypothèse d'un comportement moyen homogène qui ne représente pas la réalité des habitudes des usagers de transport. De plus, la matrice OD obtenue de la phase de génération et de distribution des déplacements indique le nombre de déplacements qui originent et qui se destinent à chaque zone, sans aucune autre indication ni sur les motifs de ces déplacements, ni sur les caractéristiques des individus qui les effectuent. Enfin, la répartition modale ne tient aucun compte des choix et des caractéristiques sociodémographiques réelles de chaque individu (Morency, 2003).

De toute évidence, la diversité des caractéristiques sociodémographiques et des comportements des résidents d'une zone rend inapproprié toute tentative regroupement en un ensemble homogène ayant un comportement moyen, un choix modal moyen.

3.2.2 L'approche totalement désagrégée

L'approche totalement désagrégée préconise une modélisation et une analyse systémique des structures de transports basées sur le traitement individualisé et discrétisé des données associées aux différentes entités. Cette approche systémique et détaillée est rendue possible par la disponibilité de plus en plus insistante des technologies informationnelles et des bases de données. L'évolution fulgurante observée, depuis les années 60, dans le domaine de l'informatique et de la micro-informatique, la démocratisation des outils de positionnement (le GPS) rendent aujourd'hui possible le stockage, la manipulation, et l'analyse de grandes bases de données.

Les sources de données

La croissance des capacités de stockage change complètement la dynamique dans le domaine de l'analyse des transports. Là où, précédemment, une agrégation de données s'imposait à cause des capacités restreintes de stockage, il faut maintenant penser à l'intégration de données de différentes sources telles que l'illustre Figure 3.6.

Les enquêtes Origines-Destination organisées environ tous les 5 ans par l'AMT pour la grande région métropolitaine investiguent de manière très détaillée les comportements et les besoins de mobilité des usagers de transport dans le but d'apporter un éclairage dans les prises de décision des différentes instances assurant la mise en œuvre et la gestion des systèmes de transport des personnes et des marchandises.

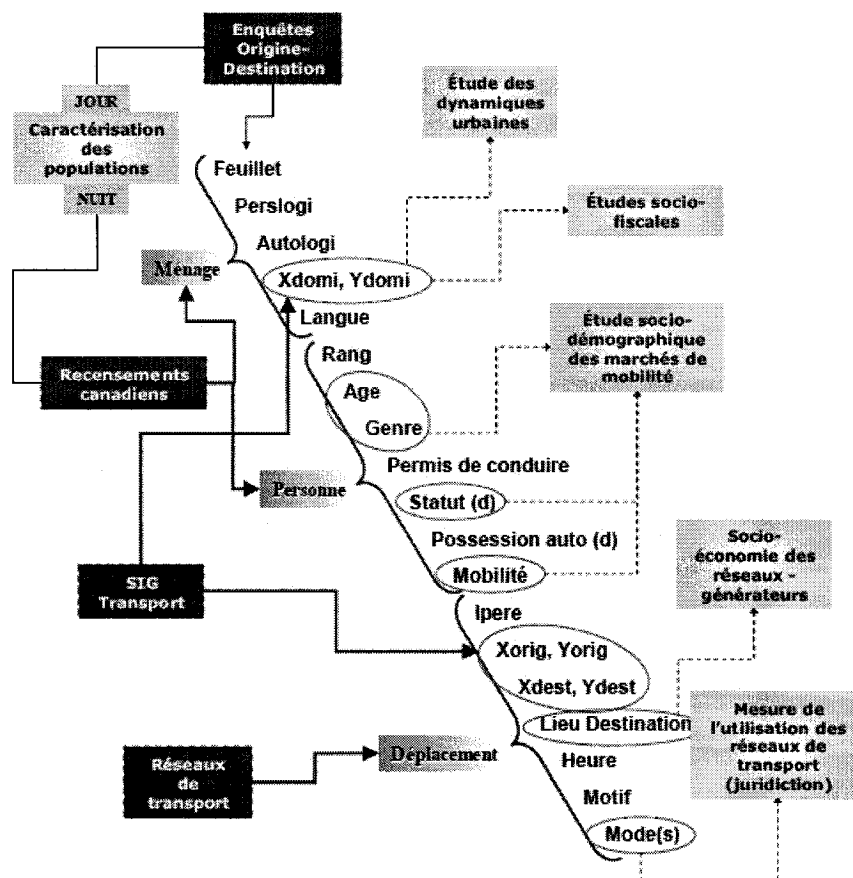


Figure 3.6 : Intégration des composantes du système d'information totalement désagrégé : bases de données sur la mobilité, patrons d'activités de jours et de nuit, SIG-transport et données sociodémographiques. (Chapleau et Morency, 2002)

Les données de recensement portent sur la localisation géographique et les caractéristiques sociodémographiques de la population du Canada. Il s'agit là aussi d'une importante source d'information pour la planification des transports car on peut en déduire des renseignements sur l'occupation du sol, la possession automobile, le nombre de personnes par ménage, l'âge des habitants, le nombre de familles monoparentales, etc Au Canada, un recensement est mené tous les cinq ans par Statistique Canada.

La technologie GPS, dernière arrivée comme source de données pour l'analyse des transports, se révèle d'un intérêt capital en raison de sa capacité inégalée à traquer, dans

les moindres détails, les habitudes et les comportements de mobilité des usagers de tous les modes de transport. La possibilité de recueillir des données en mode passif, ne requérant aucune action de l'utilisateur outre la décision de porter un module GPS sur soi rend possible l'obtention d'information plus précise que les enquêtes traditionnelles qui comptent sur les souvenirs souvent altérés des personnes interrogées. (Pendyala, 2005).

Toujours pour montrer la pluralité des sources de données, notons aussi l'utilisation possible des rapports des requêtes Web sur les calculateurs de trajet comme Tout Azimut pour dresser un profil de la demande (Trépanier et al, 2005).

L'utilisateur

Au niveau de l'utilisateur, l'approche totalement désagrégée se traduit par la notion de choix discret. Le choix des activités et du mode de déplacement incombe à chaque individu. Plutôt que d'adopter un comportement rationnel moyen comme le sous-entend l'approche agrégée, chaque individu adopte le comportement qui lui est le plus bénéfique selon ses propres critères. En terme économique, chaque usager a sa propre fonction d'utilité et ses décisions sont prises dans l'intention de maximiser celle-ci (Domencich et McFadden, 1975).

Il est raisonnable d'émettre l'hypothèse que cette fonction d'utilité dépend des caractéristiques sociodémographiques de l'individu. De ce fait, deux individus ayant les mêmes attributs sociodémographiques possèdent la même fonction d'utilité et feraient donc les mêmes choix face à une même situation de transport.

L'analyse des choix observés à la lumière des attributs connus (enquêtes OD, recensements) nous amène, premièrement, à mieux comprendre les comportements de la clientèle de transport. De cette connaissance seront déduites des catégories d'individus ayant des comportements homogènes dans le but d'une meilleure prédiction de la demande.

La demande

La demande résulte du besoin de mobilité ressenti par les clients pour participer aux

activités et pour rejoindre leur domicile et se traduit par des déplacements. Chaque déplacement implique un lieu d'origine, de destination, une heure de départ ainsi qu'une heure d'arrivée et les modes de déplacement. Le traitement désagrégé et individualisé de chaque déplacement assure de la prise en compte des caractéristiques spatio-temporelles de l'origine, de la destination ainsi que de tous les détails du cheminement.

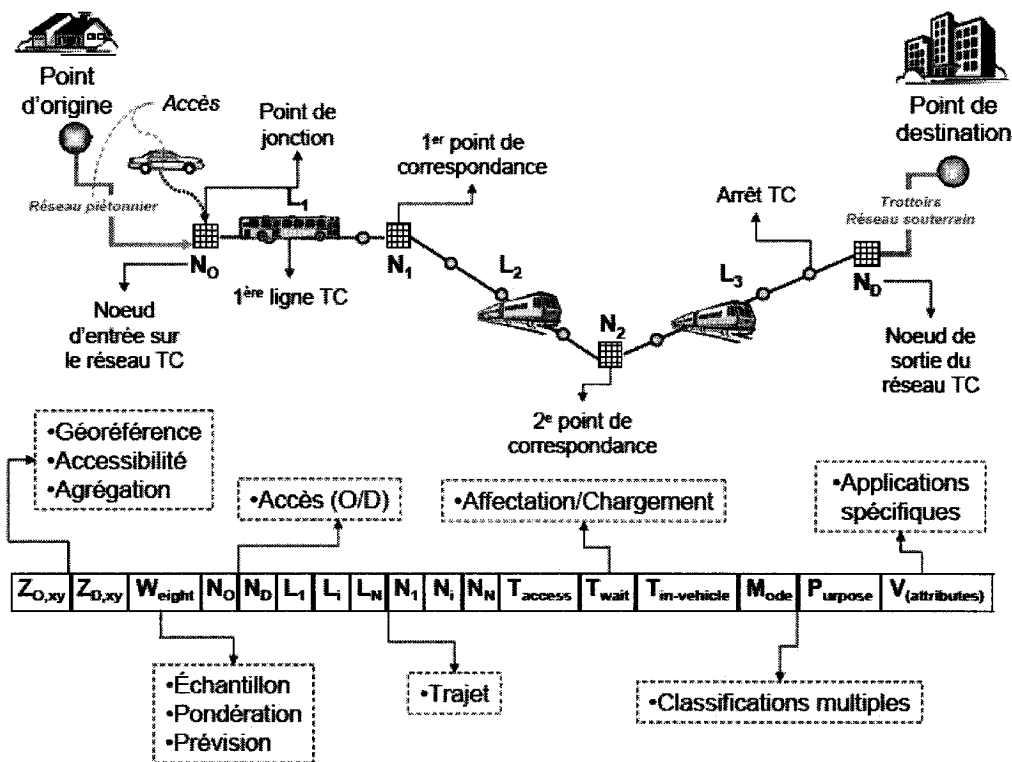


Figure 3.7 : Traitement désagrégé d'un déplacement individuel et relations avec les autres objets de transport. (CHAPLEAU, 2003)

Chaque déplacement se modélise en termes de localisation géoréférencée du lieu d'origine et du lieu de destination, de type d'activité à y effectuer, de durée et de longueur du déplacement ainsi que temps d'accès, de temps d'attente, temps de transfert, temps de marche à destination. À ces attributs spatio-temporels caractérisant les lieux de fréquentation et les segments empruntés du réseau de transport s'ajoutent les attributs sociodémographiques hérités des individus dont émane la demande.

Les générateurs de déplacements sont identifiés comme étant des centroïdes ayant une

fréquentation importante. Ce sont des lieux d'activités privilégiés par les clients. Une bonne connaissance des types d'activités qui s'y pratiquent, des heures de fréquentations et des personnes qui y participent, de leur localisation spatiale et de leurs caractéristiques sociodémographiques permet une meilleure description de la demande en transport.

L'offre

L'ensemble des possibilités et des moyens mis en oeuvre pour répondre le plus habilement à la demande constitue l'offre de transport. Tout comme la demande émise par l'utilisateur, l'offre est variable et évolutive dans le temps et dans l'espace.

Le planificateur parle en termes de coûts d'opérations, de périodes de pointe, de lignes de bus, de tracé, de voyage, de trajet aller ou retour, de séquence d'arrêt-lignes, de flotte minimum, d'intervalles de passages, de temps de parcours, de temps de battement, de capacité d'un bus, d'achalandage.

Pour l'utilisateur du TC, cette offre se traduit en terme d'accessibilité aux transports, de proximités des arrêts des lieux d'origine et de destination, de temps d'accès, de temps d'attente, d'heure de passage des bus à un arrêt, de temps passé en TC d'un lieu d'origine jusqu'à un lieu de destination, de temps de transfert.

La période de pointe correspond à l'intervalle de temps pendant lequel il y a le plus grand nombre de bus en opération sur une ligne. Ce nombre de bus requis pour assurer le service en période de pointe est identifié comme la flotte minimale. La flotte minimale est donc le nombre minimum de bus en opération nécessaires pour assurer le service à l'heure de pointe.

L'accessibilité au transport en commun traduit l'aisance avec laquelle un usager peut effectuer un déplacement donné sur le réseau de transport.

3.2.3 L'approche orienté-objet

L'approche orienté-objet est empruntée au monde de la programmation. Elle permet d'analyser chaque entité d'un système comme un élément doté de caractéristiques et

d'attributs qui lui sont propres. L'interaction avec les autres objets du système se fait au moyen de méthodes. C'est l'interaction entre tous ses éléments qui forment le système. La conception orienté-objet offre une manière plus naturelle et plus intuitive de modéliser les entités, leurs attributs et leurs fonctions. (Dietel et Dietel, 2002).

Une classe définit les attributs et les méthodes communs à un groupe d'entités et décrivant respectivement leurs états et leurs comportements.

Le principe d'encapsulation consiste à contraindre l'accès aux données et aux méthodes des objets par l'intermédiaire de quelques méthodes qui constituent l'interface de l'objet. Ainsi distingue-t-on les méthodes publiques et les méthodes privées. L'avantage de l'encapsulation est la possibilité de mettre à jour l'implémentation des méthodes associées à une classe de façon complètement transparente pour l'utilisateur tant que l'interface n'est pas modifiée.

L'application de cette approche dans le cadre de la planification des transports permet de dégager quatre (4) groupes d'objets. Ces quatre (4) méta classes d'objets sont les objets de type statique, les objets dynamiques, les objets cinétiques et les objets systémiques. (Trépanier, 1999)

Les objets statiques : Les objets statiques sont des objets ayant une localisation fixe ; qui ne change, à court terme, ni dans le temps ni dans l'espace. Les attributs associés à ces objets décrivent la situation sociodémographique, l'utilisation du sol, le positionnement des lieux d'activités.

Les objets dynamiques : Les objets dynamiques sont les éléments qui peuvent se déplacer ou être déplacés. Il peut s'agir de véhicules (automobiles privées, bus), de personnes ou de marchandises.

Les objets cinétiques : Les objets cinétiques sont les descripteurs du mouvement. Quelques exemples : le déplacement, la chaîne de déplacements, le trajet, la ligne d'autobus.

Les objets systémiques : Les objets systémiques regroupent des objets reliés entre eux

par leur positionnement, leurs fonctionnalités ou par n'importe quel autre critère. Il est possible de distinguer les objets opérationnels, les objets informationnels et les objets multifonctionnels.

- Les objets opérationnels sont un regroupement d'objets dont les fonctionnalités sont complémentaires pour former un ensemble. Le réseau de voiries en est un bon exemple. Il est formé de rues qui sont des objets de type ligne et de carrefours qui sont des objets de type point.
- Comme objets de type informationnel, il y a les recensements et les enquêtes portant sur les caractéristiques socio démographiques et la mobilité de la population ; comme, par exemple, l'enquête OD, réalisée à Montréal chaque 5 ans.
- Les objets de type multifonctionnel sont des regroupements effectués pour des fins d'analyse. On peut, par exemple, identifier le centre ville comme étant composé de l'ensemble des objets (rue, carrefour, immeubles, lignes de TC, arrêts de bus ...) qui y sont présents.

3.3 Les systèmes d'aide à la planification (CADS)

L'usage des technologies informationnelles est devenu indispensable dans la planification des transports à cause de l'aspect multidimensionnel des entités en présence.

Tout comme Pagano et al (2003), Fu Liping (2002) souligne l'opportunité que représente pour les planificateurs de système de TA l'implantation d'outils d'aide à la planification. Dans le but d'analyser les éventuels effets des AVL et des CAD sur la productivité et la fiabilité d'un système de Paratransit, Fu Liping (2002) utilise un modèle de simulation capable de reproduire les fonctionnalités du AVL et du CAD pour différentes situations d'opération, la réoptimisation périodique des tournées, la prise en compte de la demande en temps réel. Les résultats de sa démarche indique que l'utilisation des AVL et CAD peut améliorer de façon substantielle les performances du Paratransit, notamment par la réduction du temps d'attente.

3.4 Les systèmes d'information géographique (SIG)

<<Le rôle du système d'information est de proposer une représentation plus ou moins réaliste de l'environnement spatial en se basant sur des primitives géographiques telles que des points, des arcs, des polygones (vecteurs) ou des maillages (raster). À ces primitives sont associées des informations qualitatives telles que la nature (route, voie ferrée, forêt...) ou tout autre information contextuelle. >> (Site Web, Wikipédia, l'encyclopédie libre)

La présence simultanée d'objets de type point, polyligne et polygone rend difficile, voire impossible, la représentation des différentes relations au travers de visualisations traditionnelles tels les tableaux, les graphes 2D. Les SIG permettent de représenter des relations plus complexes par l'édition de couleurs, de couches, de grilles, et par la représentation en 3D.

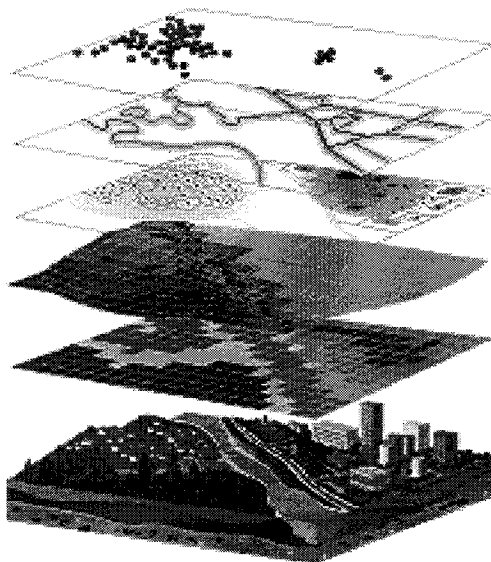


Figure 3.8 : Décomposition de l'information géographique en système de couches avec les différents types d'entités (Source : <http://www.gis.com/whatisgis/whyusegis.html> consulté le 7 mars 2006)

Les SIG sont constituées de 5 composants majeurs que sont les logiciels, les données, le matériel, les savoir-faire et les utilisateurs.

- Les logiciels assurent 5 fonctions principales souvent regroupées sous l'appellation des 5A (Acquisition, Archivage, Analyse, Affichage, Abstraction). L'acquisition de données consiste à saisir des informations géographiques sous forme numérique. Les données ainsi numérisées sont conservées dans des bases

de données (l'archivage). La manipulation et l'interrogation des données sont facilitées par l'intégration de système de gestion de base de données permettant l'exécution de requêtes plus ou moins sophistiquées. Aux fonctionnalités standard de requêtes dans les bases de données s'ajoutent des outils d'analyse et de visualisation spatiale comme les grilles, le buffering, l'affichage thématique.

- Les données : les bases de données constituent la base même d'un SIG. La particularité des SIG est l'association des données à caractères numériques ou descriptifs à des données à caractère géographique.
- Les matériels : La représentation, l'analyse et la visualisation des données géographiques nécessitent une large gamme d'outils de calcul et d'outils graphiques. Il suffit de penser aux cartographes qui, il y a encore quelques années, devaient dessiner à la main sur des tables de dessin pour comprendre l'apport important que représentent, aujourd'hui, les ordinateurs dans le traitement des données et pour la visualisation et la diffusion des résultats.
- Les savoir-faire : les multiples fonctionnalités des logiciels d'analyse et de visualisation GIS résultent de l'intégration, sous forme de procédures, de connaissances techniques et scientifiques issues de plusieurs disciplines comme la gestion des bases de données, la géomatique, l'analyse statistique, géostatistique et la visualisation.
- Les utilisateurs : Le design et la conception d'un SIG doivent tenir compte des compétences analytiques et techniques du groupe d'utilisateurs auquel ils se destinent, car de la bonne connaissance des fondements théoriques des procédures et de la compréhension des fonctionnalités des logiciels dépendront la justesse et l'exactitude des analyses effectuées.

3.5 Les systèmes de positionnement, le GPS

Telles que relatées dans le rapport synthèse numéro 301 du TCRP, les dernières avancées technologiques ont entraîné un regain d'intérêt chez les compagnies de transport pour l'utilisation de la technologie du GPS pour l'amélioration de l'efficacité

de leur système de transport. Pendyala (2005) identifie plusieurs pistes de recherche digne d'intérêt gravitant autour de la technologie du GPS tels le Map Matching, l'amélioration des mesures de performance, l'analyse des chaînes de déplacements. Il rappelle, cependant, la nécessité d'une documentation rigoureuse des possibilités et des limites techniques de l'usage passif ou actif d'un module GPS ainsi que de la résolution requise selon les domaines d'investigation.

Le Map Matching consiste en l'association des coordonnées de points GPS à une position réelle dans l'environnement géographique, qu'il s'agisse du réseau de voiries, des lieux d'activité ou de tout autre objet de l'environnement géographique (balise physique ou virtuelle, ...).

L'installation de récepteurs GPS sur des véhicules tests dans le cadre du projet ISA (Swedish National Road Administration, 2002), en Suède, a permis de surveiller le respect de la vitesse limite sur les liens du réseau. La réalisation de ce projet a nécessité l'association de la position GPS de chaque véhicule au segment de route parcouru afin de comparer la vitesse du dit véhicule à la vitesse limite définie. Les véhicules impliqués dans ce projet étaient répartis dans quatre villes de Suède : Borlänge, Lidköping, Lund et Umea.

Les données de parcours des véhicules sur le réseau, issues du projet ISA, ont été utilisées pour en déduire les motifs de déplacements et les lieux de fréquentation des usagers impliqués (Axhausen et al, 2004). La démarche a consisté à déterminer, pour chaque fin de déplacement identifiée, la destination la plus probable en fonction de la durée de l'arrêt et des caractéristiques de l'usager, connaissant les lieux d'activité disponibles à une distance de marche. La forte concentration des lieux d'activité en milieu urbain n'a, cependant, pas permis l'atteinte de résultats concluants. Cette démarche a cependant contribué à révéler certaines insuffisances des procédures de Map Matching utilisées dans le projet initial (le projet ISA) :

- Difficultés à détecter les fins de déplacements (pour les activités de très courte durée)

- Fausse détection des fins de déplacements (confusion entre de longs arrêts aux carrefours et des fins de déplacements).
- Fausse assignation lorsque le véhicule est sur une rue secondaire non codifiée ou hors de la zone codifiée.

Le GPS s'avère aussi un outil très utile pour mesurer les performances opérationnelles d'un service de transport, la distance réelle parcourue sur le réseau, la vitesse sur les liens, le profil de charge (Quiroga, 1997, Wolf et al, 2003). L'étude de la mobilité et des chaînes de déplacements (Chapleau, R., Murakami R, Stopher, Peter, Axhausen et al, 2004) tire aussi profit de la technologie du GPS. La possibilité d'équiper des usagers de modules GPS à moindre coût permet de suivre à la trace les déplacements effectués par un usager pour en déduire les lieux visités, la durée des activités qui y sont menées et le type d'occupations. Wei-Hua Lin et Jian Zeng (1999) et Fu Liping (2001) se sont, quant à eux, intéressés à l'usage du GPS pour l'analyse et la prédiction des retards et des avances aux arrivées, la prédiction des temps de parcours.

3.6 Outils et techniques d'analyse géo statistique

La caractéristique spatiale omni présente dans les données de transport nous incite à recourir à l'utilisation de différentes mesures de la géostatistique et des statistiques spatiales dans la description et l'illustration de ces données. Ce chapitre présente certaines des mesures qui seront utilisées pour la description et l'analyse des caractéristiques spatio-temporelles des principaux attributs.

3.6.1 Mesure de centralité et de dispersion

Centre moyen

Le centre moyen correspond au centre de gravité d'un nuage de points pondérés ou non.

Dans une analyse de transport, le centre moyen peut être utilisé pour représenter une agrégation de points comme par exemple l'ensemble des usagers de TC d'un secteur. Ce centre moyen est aussi nommé barycentre et se calcul comme suit :

$$\begin{aligned} \blacksquare \quad \bar{X} &= \frac{\sum_{i=1}^N w_i \times X_i}{\sum_{i=1}^N w_i}, \\ \blacksquare \quad \bar{Y} &= \frac{\sum_{i=1}^N w_i \times Y_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \end{aligned}$$

Centre médian

Dans un espace à deux dimensions, le centre médian d'un ensemble de points a pour coordonnées la médiane des abscisses (x) et la médiane des ordonnées (y).

$$\blacksquare \quad (X_M, Y_M) = \begin{cases} (x^{(p+1)}, y^{(p+1)}) & \text{si } N = 2p + 1 \\ \left(\frac{x^{(p)} + x^{(p+1)}}{2}, \frac{y^{(p)} + y^{(p+1)}}{2} \right) & \text{si } N = 2p \end{cases}$$

La médiane d'un échantillon étant définie comme le 50^{ème} percentile de ce dernier, il y a donc autant de points de part et d'autre de la droite verticale représentant le x médian. De même, il y a autant de points de part et d'autre de la droite horizontale représentant le y médian.

Centre de distance minimum

Le centre de distance minimum se définit de telle sorte que la somme des distances de ce point à tous les autres points soit minimum et s'obtient par itération.

Soient $(X_{d\min}, Y_{d\min})$ les coordonnées du centre de distance minimum alors :

$$\blacksquare \quad \sum_i \sqrt{(x_i - X_{d\min})^2 + (y_i - Y_{d\min})^2} = \text{Min} \left(\sum_i \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \right) \quad \forall (x, y) \in \mathbb{R}^2$$

Certains problèmes de transport consistent essentiellement en le calcul du centre de distance minimum d'un échantillon donné. Il s'agit par exemple des problèmes d'affectation de garages, de déneigement, du choix de l'emplacement d'un entrepôt.

Dans chacun de ces cas, il s'agit de trouver une localisation qui minimise une fonction d'impédance qui dépend ou de la distance ou du temps de parcours sur le réseau.

Très souvent le centre médian peut être utilisé comme une approximation (raisonnable) du centre de distance minimum.

Les écarts type

Les écarts type S_x et S_y décrivent respectivement la dispersion en (x) et en (y).

$$\begin{aligned} \blacksquare \quad S_x &= \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(X_i - \bar{X})^2}{N-1}} \\ \blacksquare \quad S_y &= \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(Y_i - \bar{Y})^2}{N-1}} \end{aligned}$$

Ces deux estimateurs décrivent la dispersion de données sans tenir compte de la dimension spatiale des coordonnées x, y.

Le calcul de l'écart type des distances prend en compte cette nature spatiale des coordonnées de points et décrit la dispersion d'un nuage de points autour du centre de gravité.

$$\blacksquare \quad S_{xy} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(d_{iCM})^2}{N-2}}$$

Où d_{iCM} est la distance entre chaque point (i) et le centre moyen (CM) et N le nombre total de points.

L'ellipse de déviation standard

Tel qu'expliqué dans la documentation du logiciel CrimeSTAT (chapitre 4), l'ellipse de déviation standard exprime l'orientation et la dispersion bidirectionnelle d'un nuage de points en se basant sur la distribution bivariée telle que développée par Furfey (1923), Neft (1962) et Bachhi (1957). Une rotation d'angle θ est appliquée à l'axe des ordonnées et à l'axe des abscisses, de sorte à minimiser la somme des carrés des distances des points aux axes.

$$\theta = \arctan \left(\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 - \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2 + \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 - \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2 + 4 \left(\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \right)^2}}{2 \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})} \right)$$

Les déviations standards en X et en Y calculées dans ce nouveau repère transformé sont orthogonales et sont illustrées par l'ellipse de déviation standard.

$$S_X = \sqrt{2 \times \frac{\sum_{i=1}^N \{ (X_i - \bar{X}) \times \cos(\theta) + (Y_i - \bar{Y}) \times \sin(\theta) \}^2}{N-2}}$$

$$S_Y = \sqrt{2 \times \frac{\sum_{i=1}^N \{ (X_i - \bar{X}) \times \sin(\theta) + (Y_i - \bar{Y}) \times \cos(\theta) \}^2}{N-2}}$$

Les axes de l'ellipse de déviation standard ont pour longueur en X et en Y :

$$L_X = 2 \times S_X$$

$$L_Y = 2 \times S_Y$$

3.6.2 Corrélation spatiale

Tel qu'énoncé dans la première loi de la géographie par Tobler (Tobler, 1970), les objets géolocalisés sont à priori interdépendants ; cette interdépendance s'accroît avec la proximité. De ce constat découle la nécessité de quantifier la disparité ou la ressemblance entre les objets en fonction de leur proximité. Les indices les plus fréquemment rencontrés dans la littérature sont l'indice I de Moran et l'indice C de Geary.

L'indice I de Moran

L'indice global de Moran (Im) exprime globalement la ressemblance entre les voisins en mesurant le rapport entre la covariation entre voisins et la variation totale du caractère

étudié. En d'autres termes, l'indice global de Moran se calcule comme le rapport de la covariance sur la variance.

$$I = \frac{\frac{\sum_i \sum_j W_{ij} (Z_i - \bar{Z})(Z_j - \bar{Z})}{\sum_i \sum_j W_{ij}}}{\frac{\sum_i (Z_i - \bar{Z})^2}{N}} = \frac{N}{\sum_i \sum_j W_{ij}} \times \frac{\sum_i \sum_j W_{ij} (Z_i - \bar{Z})(Z_j - \bar{Z})}{\sum_i (Z_i - \bar{Z})^2}$$

Où Z_i est la valeur de la variable analysée dans le secteur de référence i , Z_j la valeur de la variable analysée pour les secteurs (j) voisins de (i) , $\{W_{ij}\}$ est la matrice de contingence binaire entre les sections existantes ($W_{ij} = 1$ si j est voisin de i , $W_{ij} = 0$ si j n'est pas voisin de i , $W_{ii} = 0$).

Dans le cas de données associées à des entités de type point, la proximité entre les objets ne s'exprime plus avec la matrice de contingence mais par une pondération en fonction de la distance. Dans ce cas la facteur W_{ij} est fonction de l'inverse de la distance ($W_{ij} = 1/d_{ij}$).

Pour rendre compte de l'autocorrélation au niveau local, Auselin (1995) propose la décomposition de l'indice global de Moran en indice local traduisant la similitude entre chaque élément (i) et ses voisins. La somme de toutes autocorrélations locales donne l'autocorrélation global

L'indice local L de Moran

$$L_i = \frac{1}{\sum_j W_{ij}} \frac{\sum_j W_{ij} (Z_i - \bar{Z})(Z_j - \bar{Z})}{\sum_j (Z_j - \bar{Z})^2}$$

Où Z_i est la valeur de la variable analysée dans le secteur de référence (i) , Z_j : valeur de la variable analysée pour les secteurs (j) voisins de (i) , $\{W_{ij}\}$ est la matrice de pondération.

L'indice C de Geary

Pour N observations $\{Z_i\}$, $i=1$ à N de poids $\{P_i\}$, $i=1$ à N , tels que $\sum_i P_i = 1$, la variance s'écrit :

$$\blacksquare \quad Var(Z) = \sum_i P_i (Z_i - \bar{Z})^2$$

La variance peut aussi se calculer comme une moyenne des carrés de toutes les différences deux à deux entre les N mesures.

$$\blacksquare \quad Var(Z) = \frac{1}{2} \times \sum_i \sum_j P_i P_j (Z_i - Z_j)^2$$

Cette réécriture rend naturelle la décomposition de la variance totale en une variance des paires de mesures voisines et une variance entre mesures non voisines comme suit :

$$\blacksquare \quad Var(Z) = \underbrace{\frac{1}{2} \times \sum_{i \text{ voisin de } j} P_i P_j (Z_i - Z_j)^2}_{\text{Variance entre voisins}} + \underbrace{\frac{1}{2} \times \sum_{i \text{ non voisin de } j} P_i P_j (Z_i - Z_j)^2}_{\text{variance entre non voisins}}$$

L'indice C de Geary est le rapport entre la variance des mesures voisines et la variance totale. Pour N observations $\{Z_i\}$, $i=1$ à N , non pondérées et la matrice de contiguïté $\{w_{ij}\}$, $i=1$ à N , $j=1$ à N , l'indice C de Geary se calcule donc comme suit :

$$\blacksquare \quad C = \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (Z_i - Z_j)^2}{2 \sum_i \sum_j w_{ij}} \times \frac{(N-1)}{\sum_i (Z_i - \bar{Z})^2}$$

Interprétation

À moins de trouver des valeurs extrêmes, le calcul d'un indice de corrélation en soit n'est pas très révélateur de la nature des données. L'utilisation des indices de corrélations est plus pertinente pour procéder à la comparaison entre deux échantillons de données à caractère spatiale, ou pour évaluer la progression temporelle de la répartition spatiale d'un phénomène.

- L'indice de Moran varie de -1 à 1. Une valeur de 0 indique l'absence de corrélation. Lorsque l'indice de Moran est supérieur à 0 il y a présence de corrélation positive et lorsqu'il est inférieur à 1 il y a corrélation négative.
- L'indice de Geary varie de 0 à 2. La valeur de 1 indique qu'il n'y a pas de corrélation. Pour une valeur supérieure à 1, il y a une corrélation négative alors que pour une valeur inférieure à 1, il y a une corrélation positive.

3.6.3 Techniques d'agrégation de données spatiales (Clusters)

Les techniques d'agréations ont pour but d'identifier des groupements ou des concentrations d'incidents dans l'espace.

La classification des points

Les points sont classifiés selon le nombre d'occurrences d'évènements observés. Il ne s'agit pas à proprement parler d'une méthode spatiale puisqu'elle ne fait aucun cas des relations de proximité entre les points. Le même résultat peut être obtenu plus simplement par requête dans les bases de données ou par une représentation thématique à l'aide des logiciels de visualisation GIS.

Pour prendre en compte la proximité entre les points, chaque point peut être classifié en fonction du nombre total de points se trouvant à sa proximité, dans un intervalle délimité par un cercle dont il est le centre. Cette méthode est définie dans le logiciel CrimeStat (Levine, 2004.) sous le nom de Fuzzy Mode. Le choix du rayon définit le niveau d'agrégation désiré et peut influencer de beaucoup le résultat final. L'inexistence d'une méthode rigoureuse dans le choix du rayon d'agrégation constitue la principale limitation de cette technique.

Sur la figure qui suit, sont représentés les lieux impliqués dans les déplacements des clients du transport adapté de la STM, pour le mois de mars 2005. Le diamètre et la couleur de chaque point traduisent le nombre d'opérations qui y sont recensées.

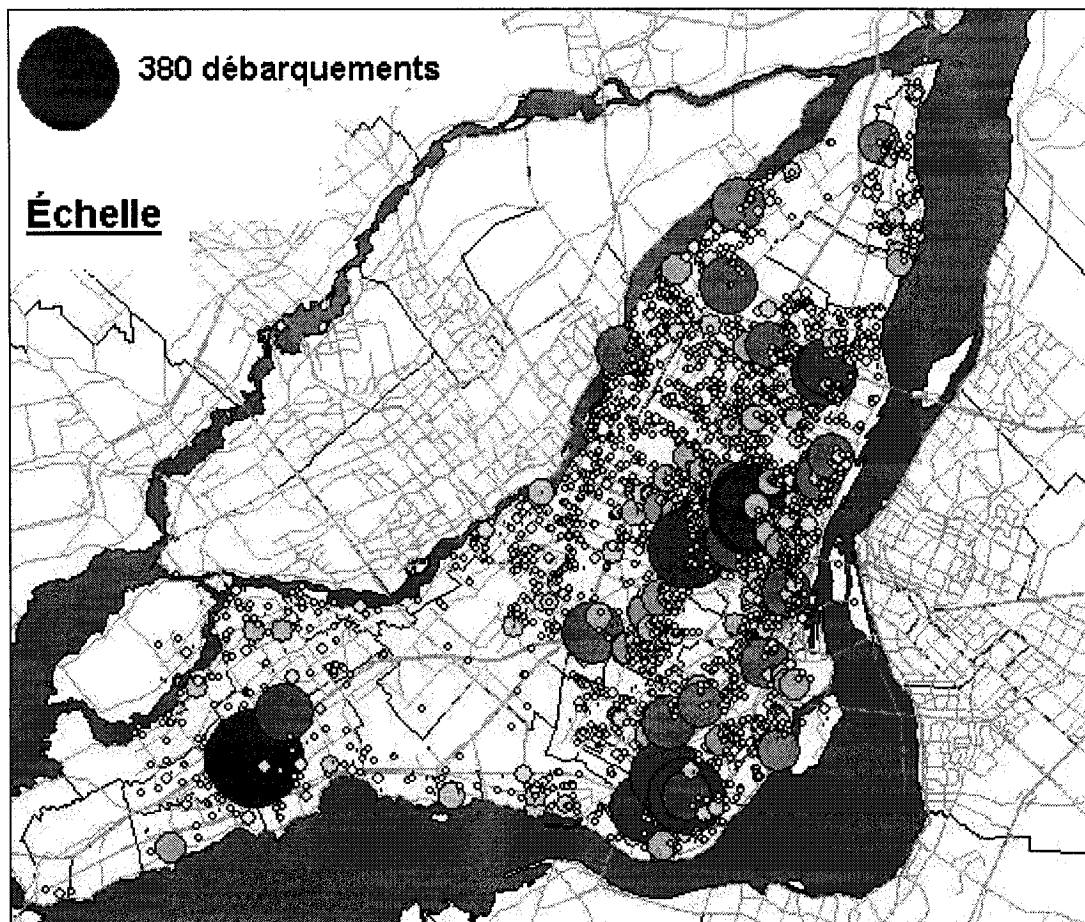


Figure 3.9 : Spatialisation du nombre d'événements enregistrés pour chaque lieu.

Il est loisible d'observer la localisation de la plus part des générateurs importants de déplacements dans le centre de l'île de Montréal ; confirmant, ainsi, les préjugés par rapport au pôle attractif qu'est le centre ville et aussi par rapport au choix des personnes handicapées, compte tenu de leur nature très captive. Un générateur très important se démarque à l'Ouest de l'île et correspond à l'hôpital général du Lakeshore.

Nearest Neighbor Hierarchical Clustering [NNHC]

Deux critères sont simultanément appliqués pour identifier des groupes d'observations spatialement rapprochés.

- Critère 1 : la distance maximum entre les points du même groupe. Pour qu'un point soit intégré à un groupe, la distance entre ce point et au moins un des

points déjà intégrés au groupe doit être inférieure ou égale à la distance seuil définie. La distance minimum d'un point d'un groupe aux autres points du même groupe doit être inférieure ou égale à la distance seuil définie.

- Critère 2 : la taille minimum d'un groupe. Seuls les groupes ayant un nombre minimum d'éléments sont conservés.

La Figure 2.2 montre l'utilisation d'ellipses de déviation standard pour visualiser la dispersion et l'orientation de l'ensemble des lieux apparaissant dans les données planifiées, pour un embarquement ou pour un débarquement. Les groupes de clusters sont calculés avec la méthode de NNHC en utilisant un critère de 500 m pour les distances et une taille minimale de 10 éléments par groupe

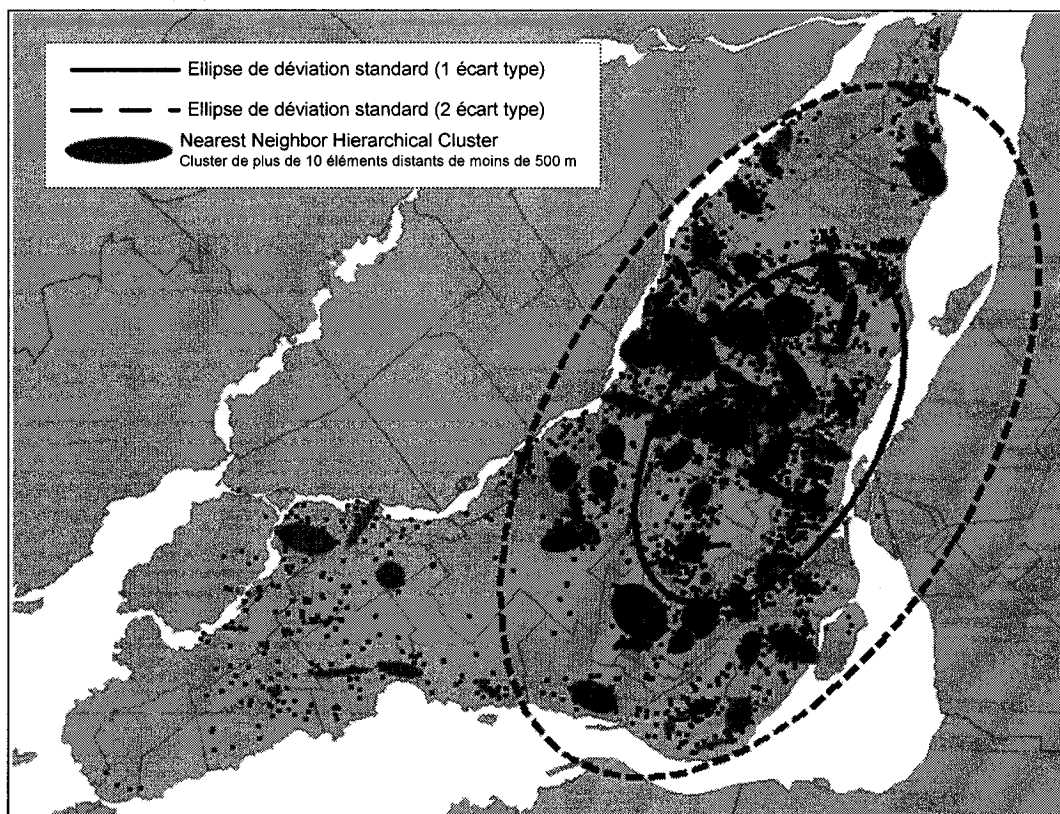


Figure 3.10 : Clusters spatiaux des lieux d'embarquement et de débarquement.

3.6.4 Mesures de densité

Tel que relaté par Kwan (2000), face à la complexité et la nature spatio-temporelle des comportements de mobilité, la transformation des points d'activité en surface de densité devient un outil d'analyse pertinent, facilitant la comparaison visuelle de l'évolution dans l'espace ou dans le temps de différents groupes.

La méthode des grilles (Grid)

Pour traduire des observations ponctuelles en terme de densité de surface, la zone concernée par ces observations est divisée en rectangles uniformes. La densité de chaque rectangle est calculée comme le rapport entre la somme du nombre total des observations incluses dans ce rectangle et sa superficie. La somme peut être éventuellement pondérée par un attribut sociodémographique pour mieux exprimer certains phénomènes.

L'agrégation de toutes les observations d'un intervalle en son centre entraîne une discontinuité de la surface de densité ainsi obtenue. Il n'y a pas de règle régissant le choix de la taille des intervalles. La diminution de la taille des intervalles peut aider à améliorer l'allure de la fonction de densité sans jamais réussir à la rendre complètement continue. Cependant, si les intervalles sont exagérément petits, il n'y aura plus d'agrégation car chaque cellule finira par ne contenir qu'au plus un point.

La méthode des noyaux (kernel)

La méthode des noyaux substitue à un échantillon de points de vecteur position X_i , $i = 1 \dots N$, une fonction continue qui exprime l'intensité ou la densité $\lambda(x)$ en tout point x du domaine d'étude. La valeur de l'intensité en un point donné est faite de la contribution de toutes les observations ponctuelles existantes. Le calcul de la valeur de l'intensité en chaque position x est donné par l'équation qui suit :

$$\lambda_h(x) = \frac{1}{Nh^2} \sum_{j=1}^N w_j \times k\left(\frac{x-x_j}{h}\right)$$

Où $k()$ est la fonction de densité du noyau avec $\int_{\mathcal{R}^2} k(x) = 1$, $\mathcal{R}^2$ le domaine d'étude et

$h > 0$ le paramètre d'étalement de la fonction de densité et w_i le poids de chacune des observations (i) de l'échantillon.

Parmi les modèles de noyaux les plus usuels on compte le modèle uniforme, le modèle conique, le modèle quadratique et le modèle normal.

- Le modèle uniforme $k(x) = \begin{cases} \frac{1}{\pi} & \text{si } x^T x \leq 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
- Le modèle conique $k(x) = \begin{cases} \frac{3}{\pi} (1 - x^T x)^{\frac{1}{2}} & \text{si } x^T x \leq 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
- Le modèle quadratique $k(x) = \begin{cases} \frac{3}{\pi} (1 - x^T x)^2 & \text{si } x^T x \leq 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
- Le modèle normal $k(x) = \frac{1}{2\pi} e^{-(1-x^T x)^2}$

Les résultats obtenus de la méthode des noyaux dépendent de la forme et de l'étalement de la fonction de densité. Le choix du type de noyau dépend du type de données, du domaine d'activité, des possibilités de calibration et de la facilité de calcul escomptée. Silverman (1996) préconise le choix du noyau quadratique à cause de ses propriétés de dérivation et du gain en temps de calcul.

Tel qu'illustré par la Figure 3.11 montrant la surface de densité des lieux d'activité identifiés à partir des embarquements et débarquements planifiés, le choix de la fonction de densité et du paramètre d'étalement influence grandement l'aspect plus ou moins lisse de la forme de la surface de densité.

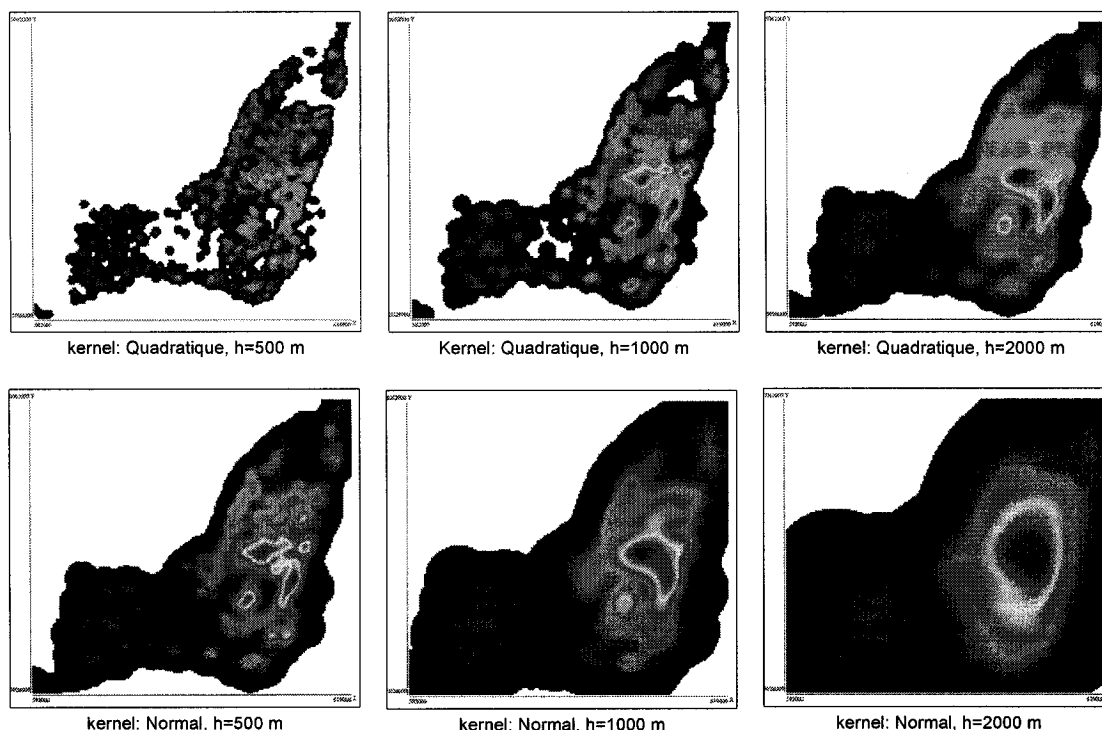


Figure 3.11 : Estimation de la densité des lieux d'activité, affichage sur une grille de 100 m de largeur de cellule. Choix de la fonction $k()$ et du paramètre h

Les surfaces de densité des lieux d'activité montrées par la Figure 3.11 ont été calculées à partir des 3965 enregistrements de déplacements planifiés. La procédure a consisté en la création d'une grille de 37 km par 34 km avec une taille de cellule de 100m de coté, couvrant la superficie de l'île de Montréal. La surface de densité a ensuite été estimée pour le centroïde de chacune des 125800 cellules. La grille de valeurs de la surface de densité est ensuite importée dans le logiciel QuickGrid pour la visualisation.

CHAPITRE 4 DESCRIPTION DES DONNÉES DE TA (MARS 2005)

Ce chapitre présente une description des fichiers de données disponibles dans le cadre de ce travail de maîtrise. Il s'agit des données de planification et d'opération du transport adapté du mois de mars 2005 de la société de transport de Montréal [STM].

Il y a en tout 3 fichiers de données.

- Rapport de la planification des tournées : l'information portant sur la liste des clients desservis, l'identification du chauffeur et du véhicule associés à chaque tournée est contenue dans le premier fichier.
- Les enregistrements à intervalles réguliers : le récepteur GPS est programmé pour enregistrer sa position géolocalisée à chaque minute ; indiquant ainsi le parcours détaillé du véhicule tout au long de la journée.
- Enregistrements événementiels de points GPS : certains événements comme l'arrêt du moteur, le démarrage, l'immobilisation du véhicule, l'ouverture et la fermeture des portes, forcent le déclenchement de l'enregistrement de la position GPS.

Le tableau qui suit présente une description de chacun des 3 trois fichiers cités ci-dessus. Il contient une information sur la taille de chaque fichier ainsi que le nombre d'enregistrements et de champs.

Tableau 4.1 : Description des fichiers de données disponibles pour le TA

Fichier	Entrées	Champs	Description
2005MARS_GLO_TOURNEES.dbf Taille: 13 630 kilo octets	64316	22	Service planifié Tournées des véhicules du TA Du 1er au 31 Mars 2005
TelvisantPositions_200503.csv Taille: 4 248 kilo octets	55573	8	Parcours spatio-temporelle de 8 véhicules du TA. Positions GPS relevées à chaque minute. Du 1er au 31 Mars 2005.
TelvisantEvents_200503.csv Taille: 2 372 kilo octets	20131	16	Événements survenus à bord des 8 véhicules. Positions GPS relevées à chaque événement. Du 1er au 31 Mars 2005.

4.1 Les enregistrements GPS à intervalles réguliers

Le fichier TelvisantPositions_200503.csv contient l'ensemble des enregistrements des traces GPS des déplacements effectués par un échantillon de 6 bus et 2 taxis, pour le mois de mars 2005. Il y a au total 55573 enregistrements de 8 champs de données chacun. Le tableau qui suit montre l'ensemble des attributs présents dans ce fichier avec un exemple ainsi qu'une description du type de donnée.

Tableau 4.2 : Description des champs du fichier TelvisantPositions_200503.csv

Attribut	Exemple	Description
VEHICLE	52-206	Code d'identification du véhicule
TIME	01/03/2005 7:26	La date et l'heure d'enregistrement
LATITUDE	45.56350708	
LONGITUDE	-73.61502075	
SPEED	0	Vitesse en km/h
HEADING	0	La direction du véhicule en degré
DATEX	01/03/2005	Date
HEUREX	00/01/1900	Heure AM/PM

Les champs de données contenus dans le fichier TelvisantPositions_200503.csv et listés dans le tableau ci-dessus se scindent en 3 catégories d'information qui sont l'identification du véhicule, le positionnement spatio-temporel du véhicule et l'information sur la cinétique du véhicule.

4.1.1 L'identification du véhicule

Le champ Vehicle permet d'identifier de façon unique chaque véhicule à l'aide d'un code unique. Dans le cas d'un bus, le contenu du champ réservé à l'identification est une série de deux nombres séparés par un tiret. (exemple : 52-206). Les taxis sont identifiés par le code TAXI, suivi d'un espace et d'un numéro (exemple : TAXI 2).

Le tableau qui suit donne pour chaque véhicule le code d'identification présent dans ce fichier, le type du véhicule et le nombre d'enregistrements.

Tableau 4.3 : Liste des véhicules

Code du véhicule	Type	Nb d'occurrences
52-206	Bus	11483
52-207	Bus	8710
52-321	Bus	3255
52-325	Bus	11343
52-329	Bus	8359
52-331	Bus	10056
Taxi 1	Taxi	2287
Taxi 2	Taxi	80

Huit (8) véhicules dont 6 bus et 2 taxis sont ainsi identifiés.

4.1.2 Localisation spatio-temporel du véhicule

Le champ Time contient la date et l'heure relative à l'émission de chaque position GPS sous le format Jour/mois/Année hh :mm. La même information est présente, scindée, dans les champs DateX et HeureX. La figure suivante montre les heures d'enregistrement des positions GPS pour les 31 jours du mois de mars pour chacun des véhicules dont la trace GPS est enregistrée.

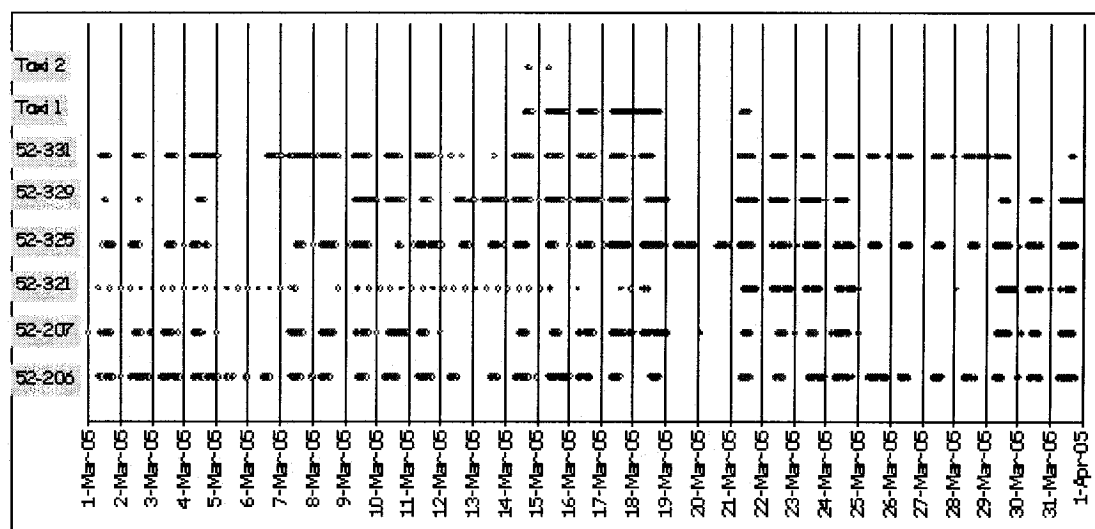


Figure 4.1 : Heure d'émissions des positions GPS dans le fichier TelvisantPositions_200503.csv

Chaque enregistrement correspond à une position géolocalisée d'un véhicule. La latitude et la longitude sont respectivement enregistrées dans les champs Latitude et

Longitude. Les angles y sont inscrits en degré décimal avec une précision de huit chiffres après la virgule. Il est ainsi possible, de suivre à la minute près, le parcours de chaque véhicule.

4.1.3 Information cinétique

À chaque position GPS émise, sont associées une mesure de la vitesse instantanée et une mesure de la direction. La vitesse est indiquée, dans le champ Speed, par un nombre entier positif en mph (rappel : 1 mph (miles par heure) = 1,6093 km/h). La direction est donnée, dans le champ Heading, par d'un entier relatif entre -180 et 180 qui représente le gisement de l'angle entre le vecteur direction du véhicule et le Nord.

La distribution des valeurs de vitesses est indiquée sur la figure qui suit :

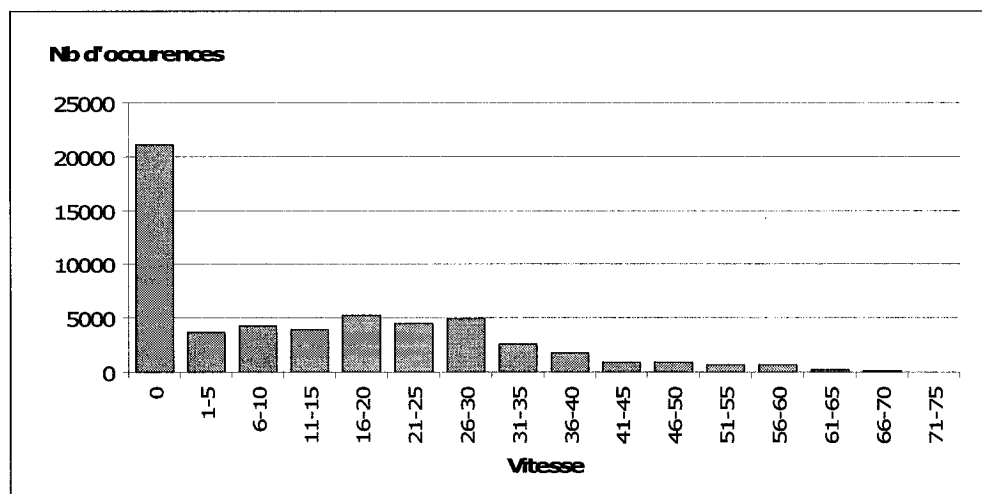


Figure 4.2 : Distribution du champ de vitesse en mph

4.2 Les enregistrements évènementiels de points GPS

Tous les événements qui surviennent pendant le déplacement d'un véhicule sont enregistrés dans ce fichier. Pour le mois de mars 2005, il y a 20131 enregistrements et chaque enregistrement comporte 16 champs. Une liste des variables de ce fichier, suivie d'un exemple et le cas échéant d'une description du format est présentée dans le tableau ci-après.

Tableau 4.4 : Liste des champs du fichier « TelvisantEvents_200503.csv »

Attribut	Exemple	Description
ID	284459225	
ASSET	52-206	Code d'identification du véhicule
TIME	01/03/2005 0:48	La date et l'heure d'enregistrement
EVENT ID	50	Code de l'évènement
LATITUDE	45.5629730224609	
LONGITUDE	-73.6145324707031	
MILEAGE	9709.8	Kilométrage inscrit au podomètre
DESCRIPTION	Ignition is On ...	Description de l'évènement
SITE NAME		
PORT		
PORT DATA		
ADDRESS LINE 1	3167 RUE D'HERELLE	Adresse: Ligne 1
ADDRESS LINE 2		Adresse: Ligne 2
CITY	MONTRIAL	Nom de la ville
STATE PROVINCE	QC	Nom de la province
POSTAL CD	H1Z	Code postal
COUNTRY		Nom du pays

Chaque enregistrement contient trois catégories d'information qui sont l'identification du véhicule, l'identification et la description de l'évènement survenu, la localisation spatio-temporelle.

4.2.1 Identification du véhicule

Le champ ASSET contient le code de l'identificateur unique du véhicule. Tout comme l'attribut Vehicle du fichier TelvisantPositions_200503.csv, les bus sont identifiés par deux séries de nombres entiers séparés d'un tiret et les taxis sont identifiés par le mot TAXI suivi d'un espace et d'un numéro. Voici la liste des véhicules dont les évènements ont été enregistrés dans ce fichier :

Tableau 4.5 Liste des véhicules dans le fichier « TelvisantEvents_200503.csv »

<<ASSET>>	type	Nombre d'enregistrements
52-206	Bus	4268
52-207	Bus	3208
52-321	Bus	1305
52-325	Bus	4212
52-329	Bus	3146
52-331	Bus	3756
Taxi 1	Taxi	219
Taxi 2	Taxi	17
	Total	20131

Le nombre total d'évènements enregistrés pour le mois de mars 2005 n'est pas le même pour tous les véhicules.

4.2.2 La description des évènements

Chaque véhicule est équipé de capteurs qui forcent le déclenchement d'un enregistrement à chaque fois qu'il y a un évènement.

Le terme évènement fait référence à un changement d'état du véhicule ou de l'une de ces composantes. Comme résumés dans le tableau ci-après, 5 types de changements d'états sont surveillés par des capteurs installés dans les véhicules. Ces capteurs forcent l'enregistrement de la position GPS du véhicule à chaque déclenchement.

Tableau 4.6 : Liste des codes d'évènements et leur occurrence par véhicule

EVENT_ID	Description	Véhicules							
		52-206	52-207	52-321	52-325	52-329	52-331	Taxi 1	Taxi 2
50	Ignition is On: ...	204	168	85	232	172	183		
51	Ignition is Off: ...	204	168	85	232	172	183		
53	Porte Off	1050	794	325	1032	787	958		
54	Porte On	1050	794	325	1032	787	958		
85	Arrive Home: STM TA		37	15	54	41	44	2	1
86	Depart Home: STM TA		37	14	54	41	44	2	1
93	Vehicle Started Moving	824	605	228	787	570	691	105	3
94	Vehicle Stopped	824	605	228	787	570	691	106	2
95	Speeding Started	56			1	3	2	2	5
96	Speeding Ended: Max Speed = ...	56			1	3	2	2	5

La connaissance de l'état des portes (ouvertes, fermées) associée à l'information cinétique du véhicule (véhicule en mouvement, véhicule arrêté ...) permet de déterminer les éventuels embarquements et débarquements. Les incidents inattendus, comme l'ouverture des portes pendant que le véhicule roule, sont aussi mis à jour.

La visualisation de quelques échantillons de données révèle que les événements véhicule arrêté (Stopped moving) et l'évènement strated moving ne sont pas superposés dans l'espace. Le véhicule n'est donc pas complètement immobilisé entre les moments où les événements véhicule arrêté (Stopped moving) et strated moving sont émis.

On observe ainsi que le véhicule parcourt en moyenne 95 mètres dans l'intervalle où les deux évènements sont émis.

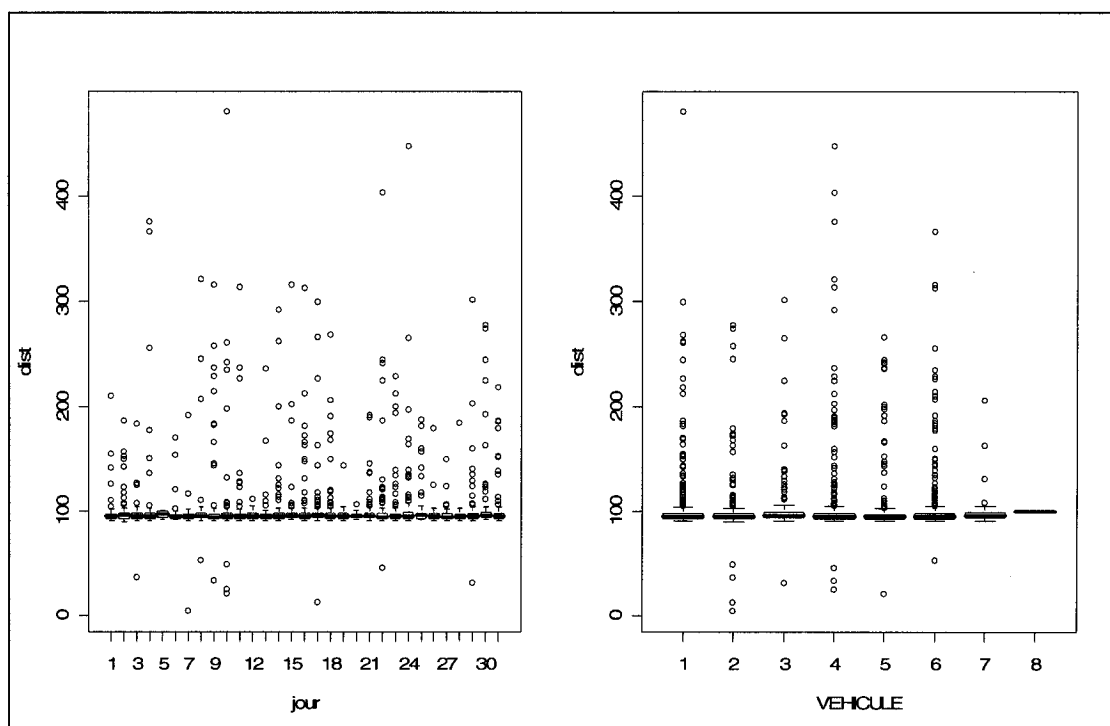


Figure 4.3 : Représentation à l'aide de boxplot de la distribution de la distance entre les évènements arrêt et démarrage successifs, selon le jour et selon le véhicule.

Comme le montre le graphique ci-dessus, la distance entre les évènements arrêt et démarrage successifs pour un véhicule est assez constante, d'un jour à l'autre et d'un véhicule à l'autre. On peut en déduire que le déclenchement des évènements d'arrêt et

de démarrage du véhicule est lié à un seuil de distance de 95 mètres environs.

L'évènement indiquant la fin d'une période d'excès de vitesse (EVENT_ID=96) est accompagné d'un commentaire indiquant la vitesse maximale atteinte durant cette période d'excès de vitesse.

Tableau 4.7 : Nombre d'excès de vitesse de chaque véhicule. Valeur minimum et maximum des vitesses de pointe atteintes lors de ces excès de vitesse (convertis en km/h)

Vitesse maximale atteinte durant un excès de vitesse	Véhicules							
	52-206	52-207	52-321	52-325	52-329	52-331	Taxi 1	Taxi 2
Nombre d'enregistrements	56	0	0	1	3	2	2	5
Minimum (km/h)	83			123	114	109	118	112
Maximum (km/h)	130			123	136	125	122	120

Le minimum des vitesses maximales atteintes au cours des périodes d'excès de vitesse est calculé comme seuil déclencheur de l'évènement excès de vitesse. La valeur ainsi déduite pour le seuil de l'excès de vitesse est 83 km/h.

4.2.3 Localisation spatio-temporelle

Le champ TIME contient la date et l'heure auxquelles ont eu lieu les évènements. Le format du champ TIME est « jj/mm/aaaa hh:mm:ss AM ». Sous ce format, la date du « 1^{er} mars 2005 à 16h 30mn 00s » correspond à « 01/03/2005 04:30:00 PM ». Les enregistrements portent sur les 31 jours du mois de mars 2005.

Chaque évènement déclenche l'enregistrement, par le GPS, de la position du véhicule en longitude et latitude.

4.3 Rapport de la planification des tournées

Ce fichier contient au total 64316 enregistrements de 22 champs. La planification de toutes les tournées de tous les minibus de la STM y est consignée pour le mois de mars 2005. La liste des clients à ramasser à chaque tournée avec leur origine et leur destination y est aussi inscrite.

Tableau 4.8 : Liste des champs du fichier « 2005MARS_GLO_TOURNEES.dbf »

Attribut	Exemple	Description
HORAIRE_ID	20050301	Année, mois et jour
TOURNEE_ID	ST10001	Code d'identification de la tournée
ORDRE	1	
CLIENT		Code d'identification du client
MOUVEMENT	G	Code du mouvement
HRE ARR PL	06:00	Heure d'arrivée planifiée
DAT ARR PL	01/03/2005	Date d'arrivée planifiée
HRE DEP PL	06:10	Heure de départ planifiée
DAT DEP PL	01/03/2005	Date de départ planifiée
NO CIV		Adresse: Numéro civique
RUE		Adresse: Nom de la rue
MUNIC		Adresse: Nom de la municipalité
XCOORD		Coordonnée X en MTM
YCOORD		Coordonnée Y en MTM
HRE CO DEB	06:00	Heure de début convenue (client)
HRE CO FIN	06:00	Heure de fin convenue (client)
HRE DEP RE		Heure prévue de départ pour le retour
DAT DEP RE	01/03/2005 0:00	Date prévue de départ pour le retour
ID VEH	52530	Code d'identification du véhicule
TEMPS E D	00:10	Durée de l'arrêt (embarq. ou débarq.)
MAT CHAUF	7272	Code d'identification du chauffeur
TYPE CLIEN	Amb/Transférable	

À chaque tournée est associée une liste de lieux à desservir. L'attribut Ordre indique l'ordre chronologique de desserte de ces lieux. L'opération qui doit être effectuée à chacun de ces lieux est indiquée par l'attribut Mouvement. On distingue ainsi les lieux d'embarquement, les lieux de débarquement, et le garage.

4.3.1 Identification de la tournée

Pour chaque jour, chacune des tournées a un code d'identification unique. Des tournées de jours différents peuvent, cependant, avoir le même code d'identification. L'association du champ HORAIRE_ID indiquant le jour de la tournée et du champ TOURNEE_ID donnant le code de la tournée assure l'identification unique de chaque tournée. Il y a eu au total 2965 tournées pour le mois de mars 2005.

Chaque tournée implique un véhicule et un chauffeur dont les codes d'identification sont inscrits respectivement dans les champs MAT_CHAUF et ID_VEH.

4.3.2 Identification des clients

À chaque client est associé un numéro d'identification unique permettant de le relier à toutes les informations le concernant. Dans la base de données des tournées, chaque client est ainsi identifié par un identificateur unique de 10 chiffres stocké dans le champ de l'attribut CLIENT. Il y a 3833 codes distincts de clients.

La fréquence d'apparition du code d'un client dans la base de données de planification est un indicateur de sa fréquentation du service de TA. Le graphique suivant nous montre la distribution des clients selon le nombre de mouvements répertoriés (embarquements, débarquements ou annulations).

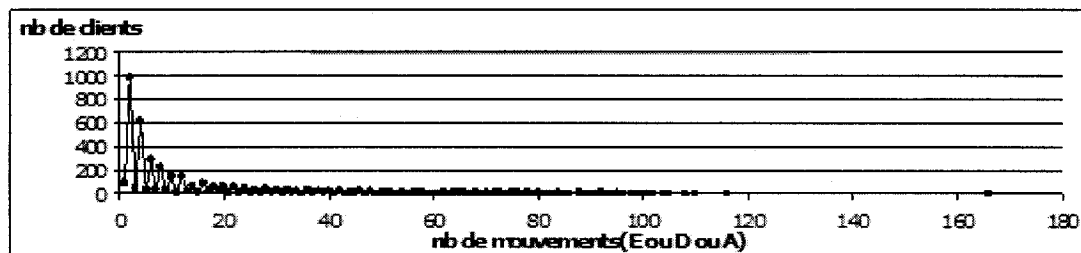


Figure 4.4 : Distribution des clients par nombre de mouvements

À prime abord, le nombre de clients ayant effectué un nombre impair de mouvements est en général bien inférieur au nombre de ceux ayant occasionné des mouvements de nombre pair. L'embarquement d'un client devant toujours précéder son débarquement, seul l'annulation (A) d'un déplacement peut engendrer un mouvement unique et par conséquent une somme de mouvements éventuellement impaire. Il s'avère donc nécessaire de distinguer les mouvements d'annulation des mouvements d'embarquement et de débarquement.

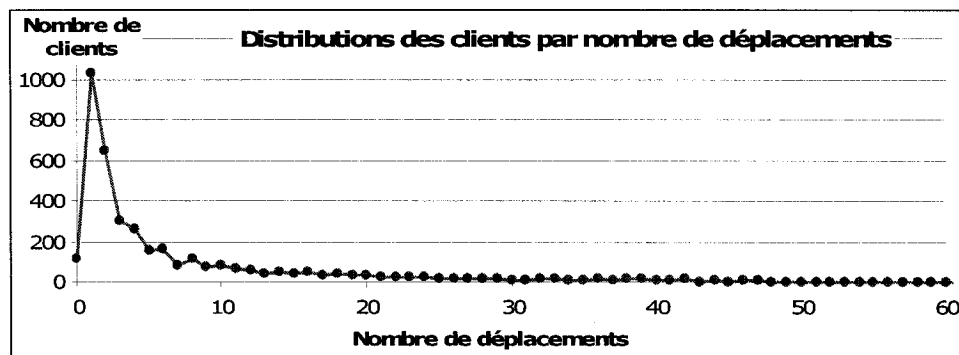


Figure 4.5 : Distribution des clients par nombre de mouvements d'embarquement ou de débarquement.

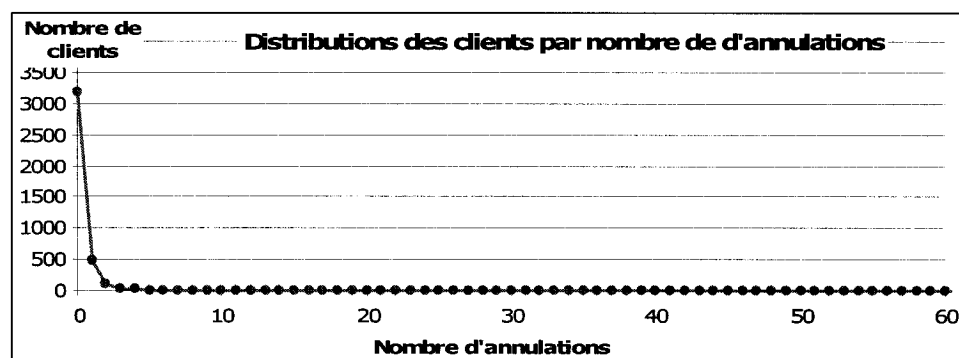


Figure 4.6 : Distribution des clients par nombre d'annulations.

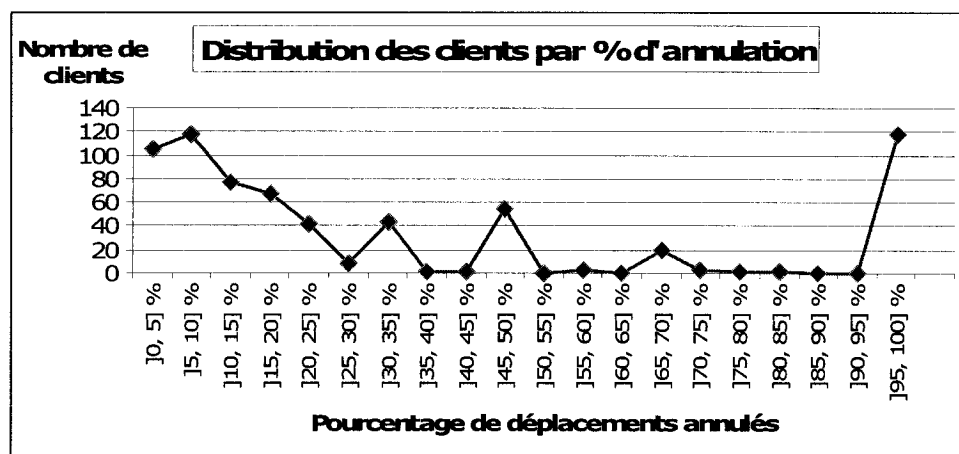


Figure 4.7 : Distribution des clients par proportion de déplacements annulés

L'attribut TYPE CLIENT donne, quant-à lui, un résumé des caractéristiques de mobilité de chaque client. La connaissance de ces caractéristiques est indispensable à la bonne planification des tournées.

4.3.3 Localisation des arrêts-tournée

Au début de chaque tournée, le chauffeur reçoit une liste des lieux de rendez-vous localisés par leur adresse. Les attributs NO CIV, RUE, MUNIC contiennent, respectivement, le numéro de l'immeuble, le nom de la rue et la municipalité de ces lieux de rendez-vous. La disponibilité de cette information offre la possibilité d'une analyse par agrégation suivant les critères géopolitiques. Pour des besoins techniques, les adresses civiques ont été converties en coordonnées MTM et enregistrées dans les champs XCOORD et YCOORD. Le tableau qui suit montre l'occurrence de chacun des 6 codes inscrits dans le champ MOUVEMENT, indiquant l'action (embarquement, débarquement, pause ...) à effectuer à chaque lieu d'arrêt de la tournée.

Tableau 4.9 Liste des codes de mouvements et leur description

MOUVEMENT	Description	Total	Nb de clients
A	Annulé	989	989
D	Débarquement	27353	27353
E	Embarquement	27353	27353
G	Garage	5930	
P	Pause	6	
T	coup de fil	2684	

Tandis que les mouvements d'embarquement (E), débarquement (D) et d'annulation (A) sont toujours associés à un client et à un lieu précis, les codes de mouvement (G), (P) et (T) ne sont associés ni à un client, ni à un lieu géolocalisé.

4.3.4 Le temps

L'usage de plus de 5 attributs pour caractériser le temps démontre l'ambiguïté et la diversité du rapport au temps des différents intervenants concernés par la planification des tournées du transport adapté.

Le client, lors de sa réservation, se voit attribuer un créneau de 30 minutes comme intervalle durant lequel se fera son embarquement. Un autre intervalle de 30 minutes lui est aussi communiqué comme heure d'arrivée à destination. Le chauffeur, quant à lui, reçoit des directives lui indiquant l'heure planifiée pour l'arrivée et le départ à chaque lieu de rendez vous. Lorsque connue, l'heure de départ du client pour le retour est aussi indiquée dans la base de données.

4.4 Résumé du chapitre

Somme toute, 3 fichiers de données sont utilisés dans la réalisation de ce projet : un rapport de planification des tournées, un fichier d'enregistrement en continu et un fichier d'enregistrement événementiel de points GPS. On y dénombre :

- Nombre de jours = 31
- Nombre de tournées = 2965
- Nombre de clients = 3833
- Nombre d'embarquements = 27353
- Nombre de débarquements = 27353
- Nombre d'arrêts au garage = 5930
- Nombre d'arrêts pour téléphoner = 2684
- Nombre d'arrêts pause = 6
- Nombre d'annulations = 989
- Nombre de véhicules = 109
- Nombre de chauffeurs = 124
- Nombre de municipalités = 27
- Nombre de véhicules équipés de module GPS = 8
- Nombre de points GPS enregistrés en continu = 55573
- Nombre de points GPS événementiels = 20131

CHAPITRE 5 ANALYSE TOTALEMENT DÉSAGRÉGÉE DU SYSTÈME DE TA

Cette section présente l'analyse des données de TA dont la description a fait l'objet du chapitre 4 . Pour se faire, nous avons procédé à une modélisation orienté-objet de l'approche totalement désagrégée permettant une caractérisation systémique et discrétisée des entités en présence.

5.1 Traitements préliminaires, activités à valeurs ajoutées

Tel que relaté au chapitre 3 , trois tables de données sont utilisées pour la réalisation de ce mémoire. Il s'agit des données des tournées planifiées, de l'enregistrement continu des positions GPS et des événements de chaque véhicule. Cette section présente une étape préliminaire à la modélisation objet qui a consistée à l'ajout d'une clef primaire à chaque enregistrement, à uniformiser le système de coordonnées et à localiser certains points de contrôle.

5.1.1 Clef primaire

Même si, pour certaines entités, une combinaison d'attributs suffit à identifier de façon unique chaque enregistrement, pour éviter toute source de confusion, une étape de prétraitement a consisté à ajouter une clef primaire à chaque enregistrement de chacune des tables de données utilisées. Ce faisant, nous nous assurons de l'identification unique de chaque enregistrement dans les applications futures.

5.1.2 Uniformisation des codes d'identification des objets dans les bases de données.

Pour assurer l'intégrité référentielle d'une table à l'autre, nous avons procédé à l'uniformisation du format du code d'identification de certains attributs.

- La date : pour mieux représenter la réalité du transport, le format de l'heure des journées de planification s'étend de 4h du matin à 28 h (4h le lendemain) ; tandis que les dates dans les fichiers de la trace GPS était au format régulier. Il

fut donc nécessaire de créer une fonction de conversion pour ramener le format de date de 28h00 en un format de date compatible dans Ms Access.

- Les véhicules : le format des codes des véhicules différaient d'un fichier à l'autre. Les codes 52-206 et 52206 sont, par exemple, supposés indiquer le même véhicule.

5.1.3 Uniformisation des références de coordonnées

La diversité des sources de données se traduit par la présence de différents référentiels de coordonnées. Une étape préliminaire a donc consisté à l'uniformisation des coordonnées par le choix du système de projection UTM. Malgré l'existence du système de projection MTM plus précis, le choix du système UTM comme référence a été guidé par son universalité et par la disponibilité de plusieurs sources gratuites de SIG dans cette base de projection.

L'application GeoTrans (NGA) dont une capture d'écran est présentée ci-dessous a servi à la conversion en masse des données géolocalisées de longitude latitude ou de MTM en coordonnées UTM.

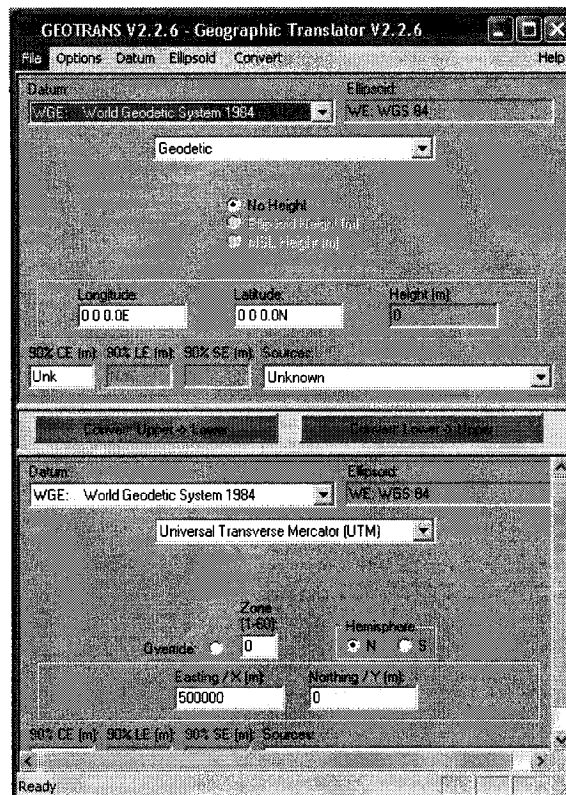


Figure 5.1 : Capture d'écran du logiciel GEOTRANS V2.2.6

5.1.4 Localisation du garage

Dans la table de planification des tournées, seules les étapes associées à un client (Embarquement, Débarquement, Annulation) sont géolocalisées. Pour une meilleure représentation de la géométrie du parcours et pour permettre un calcul plus précis des distances parcourue et du kilométrage mort, nous avons procédé à la géolocalisation du garage à l'aide des évènements GPS enregistrés.

Partant de l'hypothèse que le garage est sans doute le lieu où se produit le plus grand nombre d'évènements arrêt du moteur et démarrage du moteur, la représentation spatialisée des évènements associés au moteur de chacun des véhicules permet d'identifier le lieu de plus grande concentration des évènements d'arrêt et démarrage du véhicule sur la rue Saint-Michel, à peu près à l'intersection de Saint-Michel et Jarry.

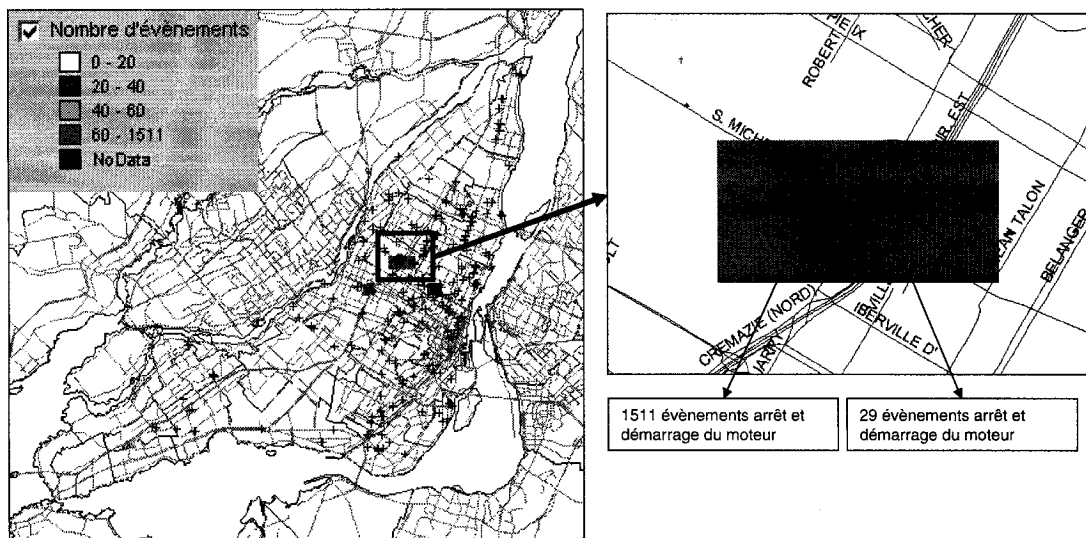


Figure 5.2 : Localisation d'un garage par la densité des événements d'arrêt et de démarrage du moteur. (Xutm, Yutm) = (608 220, 5 046 445).

La densité des événements arrêt moteur et démarrage moteur a été calculée en découpant la région à l'aide d'une grille ayant des cellules de 1 km². La zone de plus grande concentration identifiée sur la figure ci-dessus confirme la localisation du garage des minibus de TA au **3111 Jarry Est**.

5.2 La modélisation orienté-objet du transport adapté

Le traitement systématique et individuel de chacun des éléments du transport adapté que requiert l'approche totalement désagrégée rend nécessaire une modélisation tablant sur la réutilisation et la modularité de ses composantes. La modélisation orienté-objet, grâce à l'encapsulation et à l'existence individuelle de chaque entité par le biais des instances de classes, convient bien à la définition de l'ontologie du système de transport adapté dans l'optique d'une analyse totalement désagrégée. Le modèle orienté-objet du système de transport adapté proposé par Trépaner (1999) distingue 4 méta classes dont découle l'ensemble des classes décrivant un système de transport.

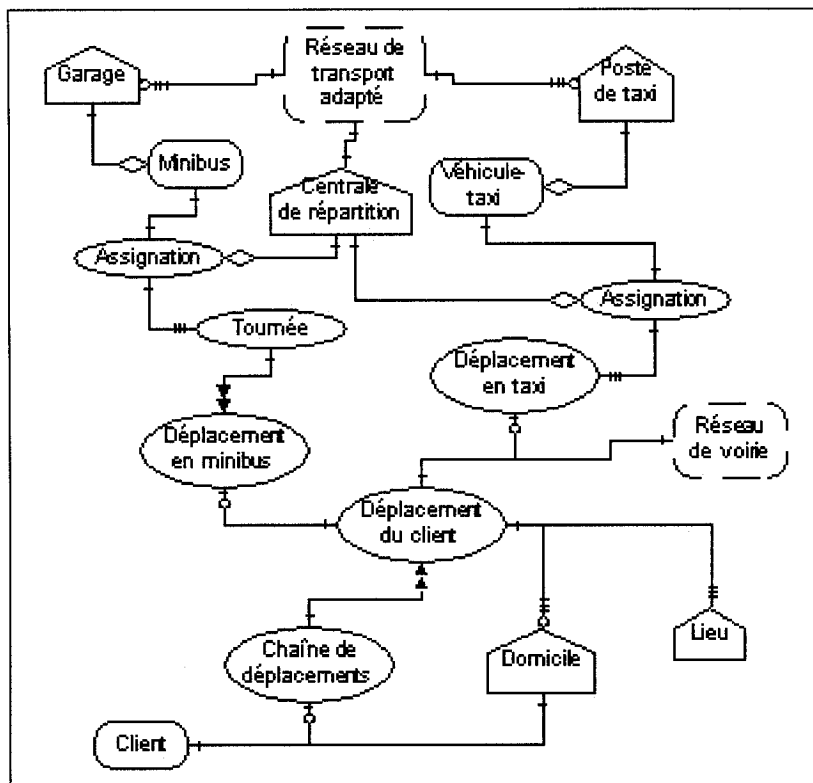


Figure 5.3 : Modèle objets du Transport adapté (TRÉPANIÉ, 1999)

Malgré le caractère exhaustif de ce modèle orienté-objet, nous lui avons préféré un modèle simplifié mettant l'accent sur les interactions entre les objets Client, Déplacement, Tournées, Lieu, Arrêt-Tournée, Arrêt-GPS. Compte tenu de l'étendu des données dont nous disposons et de la portée de ce mémoire, un modèle moins exhaustif ayant un temps d'implantation moindre nous a semblé être un bon compromis.

concernée. Fort de ce constat, nous pouvons néanmoins nous exercer à dresser le profil de la clientèle présente dans notre échantillon : les clients ayant utilisé le minibus dans leurs déplacements durant le mois de mars 2005.

Une description de la clientèle, de la demande et de l'offre, s'appuyant sur le traitement individuel et systématique de chaque entité du TA, est présentée dans les sections qui suivent.

5.2.1 Le réseau de TA

Le réseau de TA est la classe conteneur à laquelle appartiennent toutes les autres classes présentent dans le modèle. Elle est par conséquent constituée d'une collection d'objets de chacune des autres classes (Client, Déplacements, Lieux, Arrêt-Tournées, Véhicule ...). La classe Réseau de TA est dotée de :

- Procédures énumératives permettant de dénombrer toutes les autres entités qui la composent ;
- Procédures d'instanciation permettant de créer de nouvelles instances des classes qui la composent (client, véhicule, tournée, ...).
- Procédures de calcul implémentant les différentes fonctions de calcul utiles (plus court chemin, distance euclidienne, ...)

L'évolution de la demande et du service de transport selon le jour de la semaine est illustrée par la Figure 5.5. Les mardis sont les jours de semaine les moins achalandés tandis que les vendredis connaissent la plus grande demande.

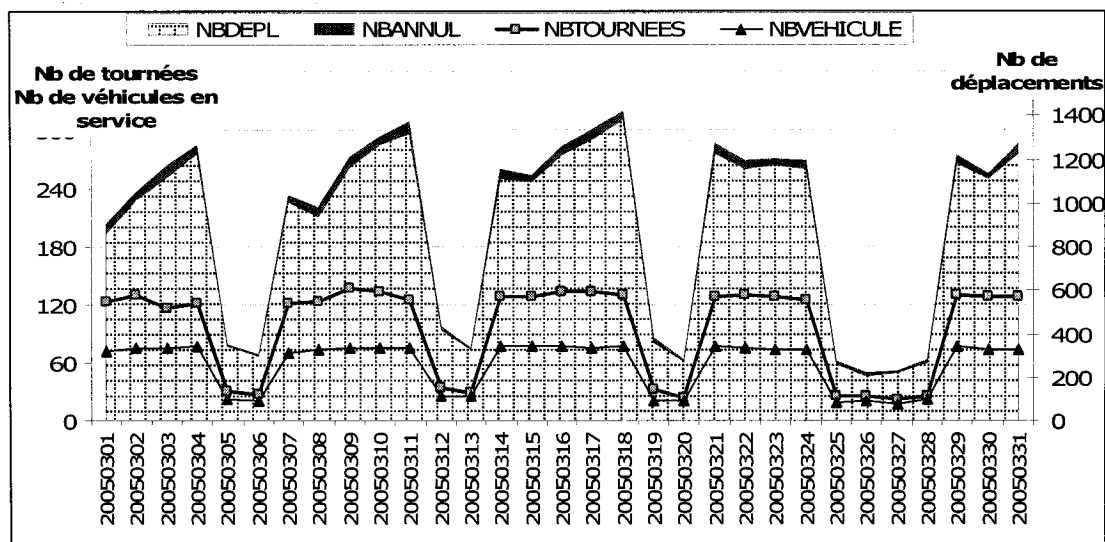


Figure 5.5 : Évolution de la flotte de TA selon le jour de la semaine. (109 véhicules distincts, 27353 déplacements effectués, 989 annulations).

Comme on peut s'y attendre, la demande de déplacements pour les jours de semaine est nettement plus importante que la demande pour les fins de semaine. Le vendredi est le jour le plus achalandé de la semaine. De plus, chaque véhicule effectue en moyenne 2 tournées par jour.

Il faut aussi noter la présence de 2 jours fériés (le Vendredi de Pâques 25 mars 2005 et le Lundi de Pâques 28 mars 2005) pour lesquels le service est semblable à celui d'un jour de fin de semaine.

5.2.2 La classe client

Chaque client est identifié par ses attributs dénominatifs (le nom, le prénom) et caractérisé par ses attributs sociodémographiques comme l'âge, le sexe, type de handicap (moteur, psychique, organique, visuel), le lieu de résidence, le statut. Une clef primaire associée au dossier de chaque client permet d'en assurer l'intégrité référentielle.

L'analyse des habitudes de mobilité permet de dresser le portrait du client et d'en déduire les attributs opérationnels. Selon la fréquence de déplacements effectués, la nature des lieux de destination, les heures et la durée d'activité (temps écoulé entre

l'arrivée et le départ d'un lieu), le statut du client (travailleur, étudiant, malade, ...) peut être dérivé.

Voici une liste des attributs et méthodes associés à la classe Client et utilisés lors de l'analyse désagrégée.

Tableau 5.1 : Liste des attributs et des proc/dure de la classe Client.

Classe CLIENT		GET	SET
ATTRIBUTS DE RÉFÉRENCE			
CLEF	CLÉ PRIMAIRE	✓	
CODE	Numéro de dossier	✓	
ATTRIBUTS DÉNOMINATIFS			
NOM		✓	
PRÉNOM		✓	
ATTRIBUTS SOCIO DÉMOGRAPHIQUES			
ÂGE		✓	
SEXE		✓	
HANDICAP	Type de handicap déclaré (	✓	
STATUT	Statut dérivé des caractéristiques de mobilité (Travailleur, Étudiant, Malade, Autre)	✓	✓
DOMICILE	Fait référence à un objet LIEU identifié comme lieu de résidence du client	✓	✓
ATTRIBUTS DE STATISTIQUES OPÉRATIONNELLES			
NBDEPLBUS	Nombre de déplacements effectués par minibus	✓	✓
NBDEPLTAXI	Nombre de déplacements effectués par taxi	✓	✓
NBJOURSACTIFS	Nombre de jours actifs pour la période considérée	✓	✓
DUREEMOYDEPL	Durée moyenne d'un déplacement (mn)	✓	✓
TEMPSEMBMOY	Durée moyenne d'un embarquement (mn)	✓	✓
TEMPSDEBMOY	Durée moyenne d'un débarquement (mn)	✓	✓

L'existence des données au niveau individuel permet différents types d'agrégations selon le point d'observation, comme l'illustrent les sections qui suivent.

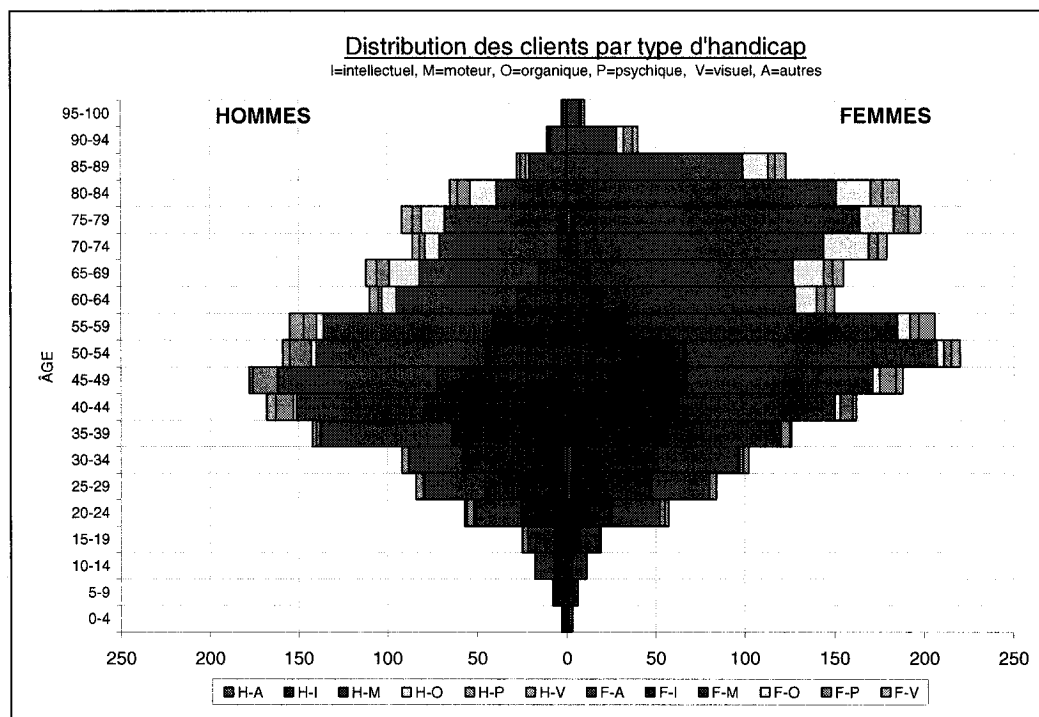


Figure 5.6 : Pyramide d'âge des clients selon le type de handicap

Il y a 58% de femmes et 42 % d'hommes. On observe une présence plus importante de femmes surtout pour les tranches d'âge de plus de 60 ans. La moyenne d'âge des femmes pour chaque type de handicap est plus grande que la moyenne d'âge des hommes.

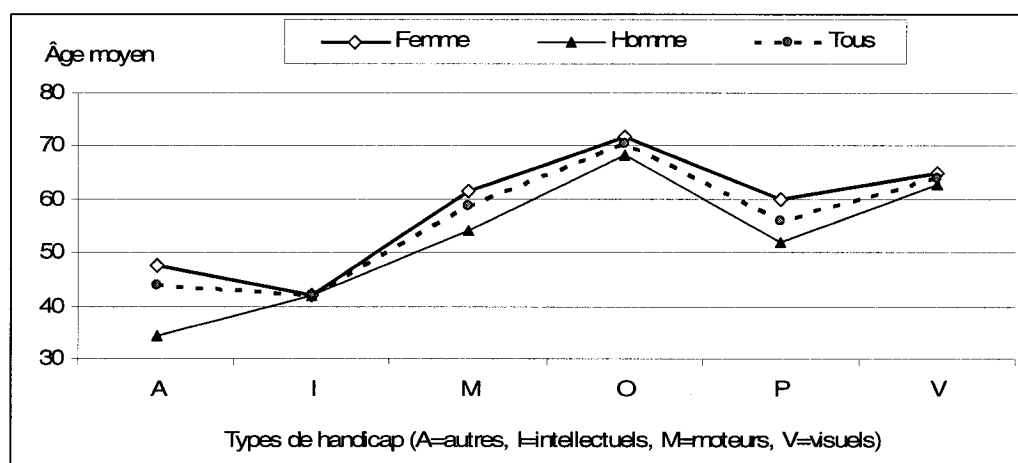


Figure 5.7 : Moyenne d'âge par type de handicap (3833 clients, 31 jours : du 1er au 31 mars 2005)

D'autre part, les clients souffrant d'un handicap organique ont une moyenne d'âge plus

élevée que ceux souffrant d'autres handicaps.

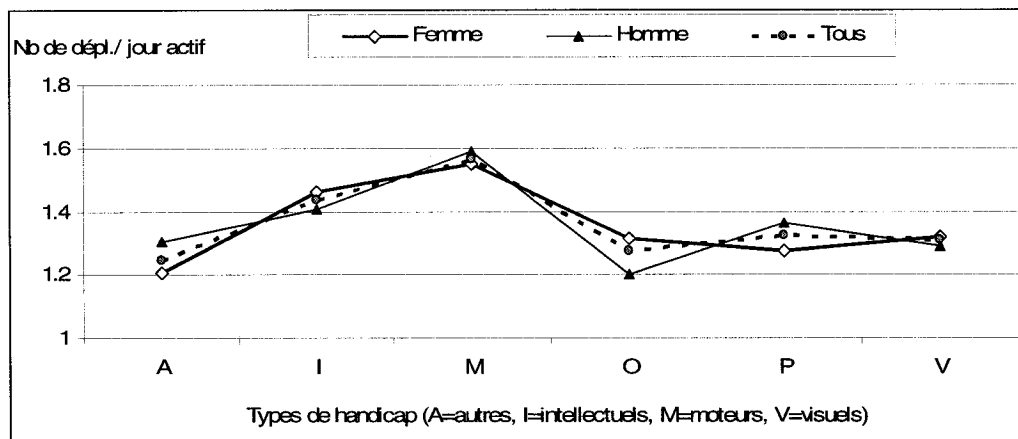


Figure 5.8 : Nombre de déplacements par jour actif selon le type de handicap.

La captivité plus importante des clients souffrant d'un handicap moteur vis-à-vis du transport en minibus se traduit par une moyenne du taux spécifique de déplacements en minibus plus grande que celle des autres types de handicap.

Tableau 5.2 : Nombre de déplacements par client selon le type d'handicap

Type de handicap	Nbre de clients	Nombre de dépl.		Nb Depl / client
A: Autre	15	71	0.25%	4.7
I: Intellectuel	956	9180	32.59%	9.6
M: Moteur	2355	16697	59.27%	7.1
O: Organique	207	627	2.23%	3.0
P: Psychique	171	1146	4.07%	6.7
V: Visuel	117	407	1.44%	3.5
Inconnu	12	43	0.15%	3.6
	3821	28171	100%	7.4

Les clients handicapés intellectuels constituent la catégorie la plus mobile en minibus avec, en moyenne, 9.6 déplacements par client pour le mois de mars 2005. Les handicapés moteur avec, en moyenne, 7.1 déplacements par client pour le mois de mars forment la deuxième catégorie la plus mobile.

Les temps planifiés d'embarquement et de débarquement

Pour chaque déplacement d'un client, le temps d'embarquement est calculé comme la différence entre l'heure d'arrivée planifiée et l'heure de départ planifiée du lieu

d'origine. Lors d'embarquements et de débarquements multiples à un arrêt, le temps total alloué à cet arrêt est uniformément réparti entre l'ensemble des mouvements qui s'y sont déroulés.

5.2.3 La classe lieu

La classe lieu représente toute entité statique géolocalisée ; qu'il s'agisse d'un objet de type point, polygone ou polygone. Les attributs d'identification associés à un objet Lieu sont l'adresse postale, civique, le nom de la rue, la municipalité. Dans l'optique d'une analyse totalement désagrégée, les attributs d'identification ont été traduits en paire de coordonnées MTM indiquant le positionnement géolocalisée, par les soins du groupe MADITUC.

Tableau 5.3 : Les attributs de la classe LIEU

Classe LIEU		GET	SET
ATTRIBUTS DE RÉFÉRENCE			
CLEF	Clé primaire	✓	
Attributs géographiques			
XUTM	coordonnées x en UTM	✓	
YUTM	coordonnées y en UTM	✓	
MUNICIPALITE		✓	
STATUT	Statut du lieu (service, hopital, loisir, école), dérivé du type de clients qui le visitent et de la durée des visites.	✓	✓
ATTRIBUTS DE STATISTIQUES OPÉRATIONNELLES			
NBRESIDENTS	Compte des clients ayant ce lieu comme domicile	✓	✓
NBCLIENTS	Nombre distinct de clients ayant fréquenté ce lieu	✓	✓
NBMINIBUS	Nombre distinct de minibus ayant desservi ce lieu	✓	✓
NBTAXI	Nombre distinct de taxis ayant desservi ce lieu	✓	✓
NBJOURSACTIFS	Nombre de jours d'activités	✓	✓
NBDEBARQUEMENTS	Nombre de débarquements	✓	✓
NBEMBARQUEMENTS	Nombre d'embarquements	✓	✓
HARRMINMOY	Moyenne des minimums journaliers de l'heure d'arrivée	✓	✓
HDEPMAXMOY	Moyenne des maximum journaliers de l'heure de départ	✓	✓
DUREEACTIVMOY		✓	✓
DUREEACTIVMIN		✓	✓
DUREEACTIVMAX		✓	✓

Une clef primaire est créée afin d'assurer l'intégrité référentielle. Le décompte du nombre de visiteurs pour chaque lieu permet d'identifier les principaux générateurs.

La prise en considération des caractéristiques sociodémographiques des clients (type de handicap, âge, sexe, statut), des caractéristiques opérationnelles (heures d'arrivée, heures de départ, durée des visites) permet de catégoriser chaque lieu en terme d'heure d'ouverture, heure de fermeture, statut du lieu (hôpital, service, école, lieu de magasinage).

Dérivation du domicile d'un client

L'exercice mené ici consiste à essayer de retrouver le domicile de chaque client à partir de l'information disponible de la planification des tournées sachant que tous les points d'embarquement et de débarquement du client, pour les déplacements effectués en minibus de TA sont enregistrés dans le rapport des tournées planifiées auquel nous avons accès.

Partant de l'hypothèse selon laquelle le domicile est le point d'ancrage de la chaîne journalière de déplacements d'un client. Le lieu le plus fréquent comme premier embarquement et dernier débarquement de la journée est considéré comme étant le domicile du client. Nous avons ainsi pu attribuer un domicile près de 47% des clients (1800 / 3833 clients). Sachant que la base de données dont nous disposons ne contient que le tiers des déplacements assurés par la STM, ce résultat nous semble encourageant.

En effet seule les personnes hautement captive du minibus effectuent la presque totalité de leur déplacement par ce mode. Pour les autres, les déplacements réalisés en taxi sont absents de notre base de données ; rendant difficile voire impossible la reconstruction des chaîne journalière de déplacements et par conséquent la déduction du domicile. La disponibilité d'une liste complète des déplacements apporterait, à coup sûr de meilleurs résultats.

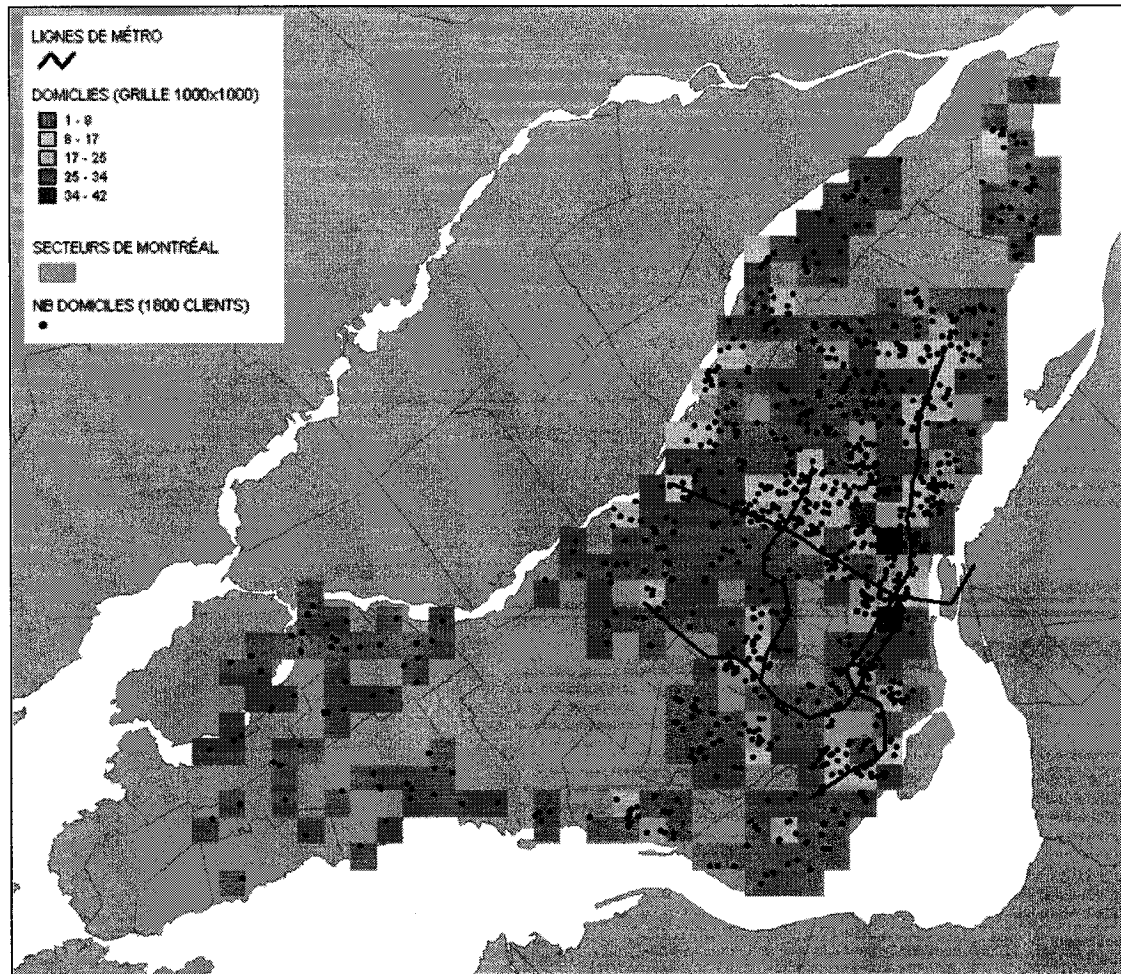
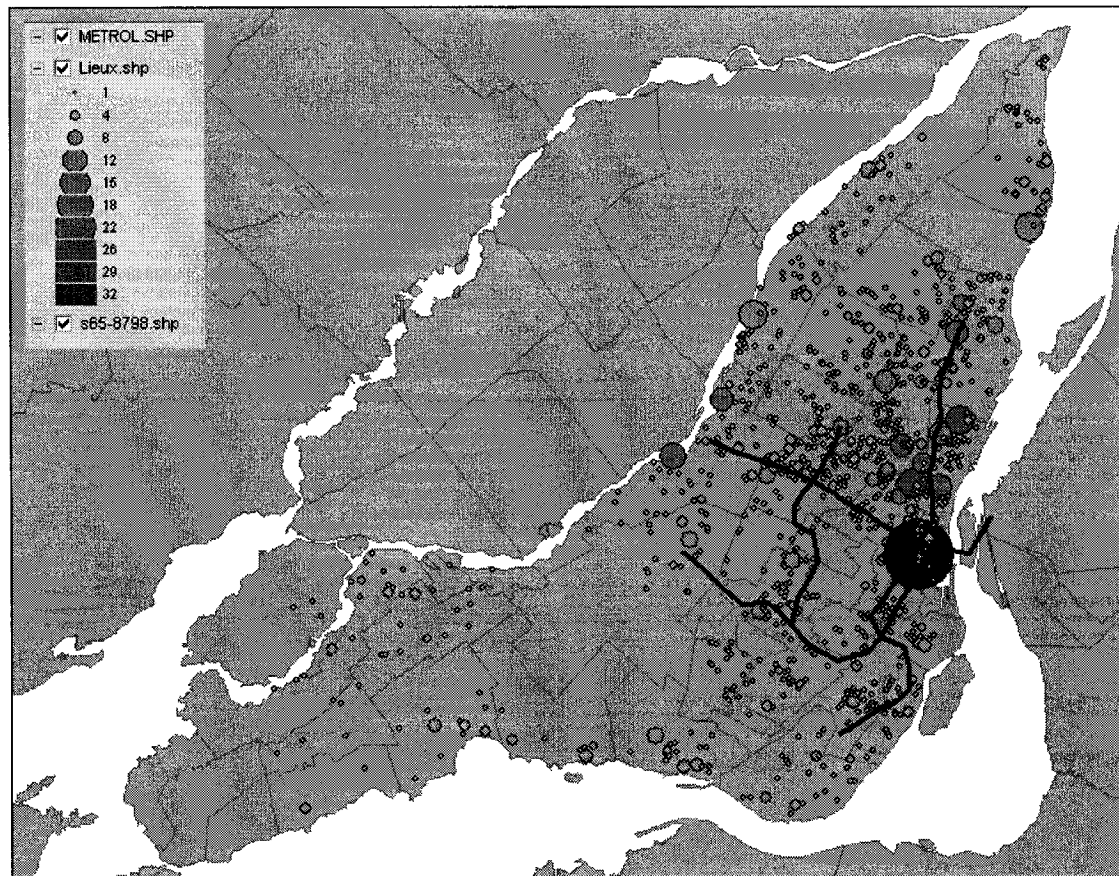


Figure 5.9: Concentration des domiciles dérivés (grille 1km x 1km)

1033 domiciles distincts ont ainsi été détectés. L'application d'une grille de densité de cellule de 1 km² permet d'observer une densité plus forte des domiciles de clients au centre de l'île de Montréal, aux alentours du quartier d'Hochelaga-Maisonneuve.

La figure qui suit propose une visualisation géolocalisée de la taille de chaque domicile. La taille de chaque domicile correspond au nombre de clients qui y résident et est représentée à la fois par la couleur et la taille du point visualisé.



00Figure 5.10 Taille des domiciles dérivés

Le domicile le plus gros a 32 résidents et est localisé au centre ville, près du métro Berry-UQAM.

5.2.4 La classe déplacement

De façon générale, l'objet Déplacement décrit le mouvement d'une entité, d'une position spatio-temporelle à une autre. Cette description peut être sommaire, n'indiquant que le point d'origine et de destination; mais la disponibilité de moyen de positionnement comme c'est le cas dans ce mémoire avec le GPS, permet une description détaillée, dans l'espace et dans le temps, du mouvement d'un client.

Les propriétés socio démographiques du client ainsi que le motif, le mode déplacement servent à le caractériser. Le type du lieu d'origine et du lieu de destination, les heures de fréquentation de ces lieux, les activités qui s'y pratiquent et la quantité de déplacements

qui s'y destinent contribuent aussi à la caractérisation du déplacement. Le tableau ci-après montre la liste des attributs de la classe Déplacement.

Tableau 5.4 Liste des attributs de la classe Déplacement.

DÉPLACEMENT		Get	Set
Attribution d'identification du déplacement			
CLEF	Clé primaire	✓	
JOUR		✓	
CLIENT	Id du client	✓	
ORDRE	Ordre dans la chaîne de déplacements du client	✓	✓
MODE	Mode de transport utilisé (mimibus de TA, taxi, ...)	✓	
TOURNEE	Orde d'identification de la tournée	✓	
Attributs dérivés de l'arrêt d'embarquement			
ORIGINE	Identification du lieu d'origine (clef étrangère)	✓	
ORDRE1	Séquence de l'arrêt d'embarquement dans la tournée	✓	
H ARR PL1	Origine: Heure d'arrivée planifiée	✓	
H DEP PL1	Origine: Heure de départ planifiée	✓	
H ARR CO1	Origine: Heure d'arrivée convenue	✓	
H DEP CO1	Origine: Heure de départ convenue	✓	
Attributs dérivés de l'arrêt de débarquement			
DESTINATION	Identification du lieu de destination (clef étrangère)	✓	
ORDRE2	Séquence de l'arrêt de débarquement dans la tournée	✓	
H ARR PL2	Destination: Heure d'arrivée planifiée	✓	
H DEP PL2	Destination: Heure de départ planifiée	✓	
H ARR CO2	Destination: Heure d'arrivée convenue	✓	
H DEP CO2	Destination: Heure de départ convenue	✓	
Attributs de statistiques opérationnelles			
Dist	Distance euclidienne	✓	✓
dist2	Somme des dist. eucli. entre les arrêts intermédiaires	✓	✓
DISTGPS	Distance cumulée GPS	✓	✓
DISTPCC	Distance du plus court chemin	✓	✓
DUREEEMB	Durée de l'embarquement	✓	✓
DUREEDEB	Durée du débarquement	✓	✓
DUREEDEPL	Durée du déplacement	✓	✓
NBARRETSTOT	Nbre d'arrêts intermédiaires total	✓	✓
NBARRETSCLIENT	Nbre d'arrêts intermédiaires imputables à un client	✓	✓
NBARRETSCHAUF	Nbre d'arrêts intermédiaires imputables à la planif	✓	✓

La longueur des déplacements

Les différentes façons d'estimer la longueur du parcours (DISTEUCL, DIST2, DISTGPS) correspondent à différents niveaux de résolution.

- DISTEUCL : calcul de la distance à vol d'oiseau entre le point d'origine du déplacement noté Norig et le point de destination noté Ndest.

$$\text{Distance euclidienne} = \sqrt{(X_{orig} - X_{dest})^2 + (Y_{orig} - Y_{dest})^2}$$

- DIST2 : somme des distances euclidiennes entre tous les points dont les coordonnées sont connues, de l'origine à la destination.
- DISTGPS : calcul de la distance du déplacement à partir de la trace GPS enregistrée de ce parcours.
- DISTPPC : la longueur du plus court chemin existant sur le réseau entre le point d'origine et le point de destination du déplacement représente la distance minimale possible.

La Figure 5.11 montre la distribution de la longueur des déplacements, calculée comme la somme des distances à vol d'oiseau entre les points d'arrêts géolocalisés, de l'origine à la destination.

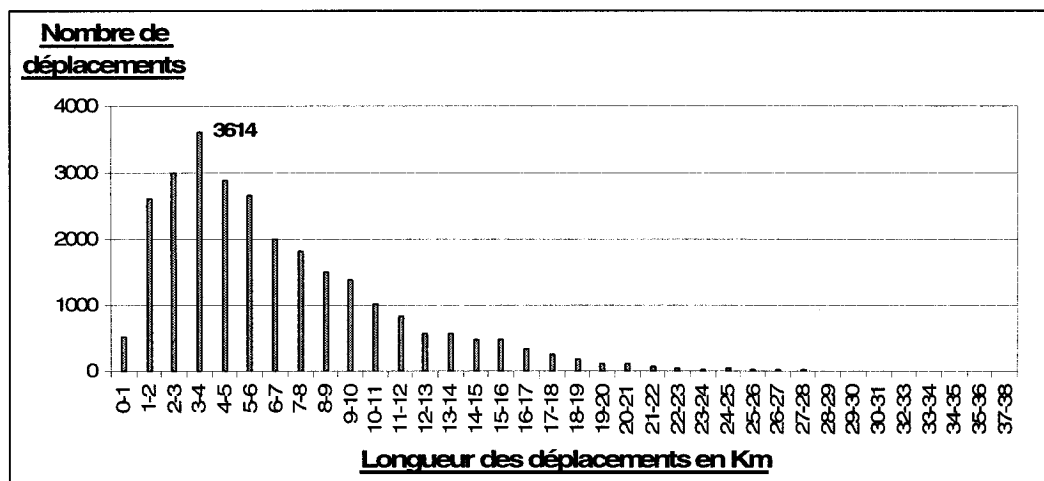


Figure 5.11 : Longueur des déplacements (tranches de 1km)

La durée des déplacements

La durée d'un déplacement est calculée comme le temps écoulé entre l'heure de départ planifiée de l'origine et l'heure d'arrivée planifiée à la destination. La durée moyenne d'un déplacement est de 27 minutes. La distribution de la durée des déplacements par tranches de 5 minutes est montrée sur la Figure 5.12.

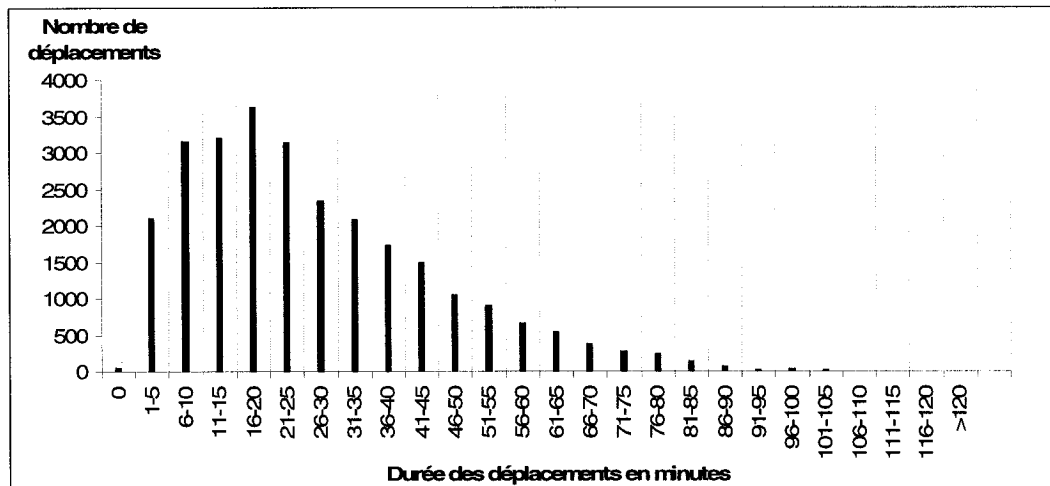


Figure 5.12 : Durée des déplacements (tranches de 5 minutes)

Le taux de déplacement

Tel que relaté dans un rapport du groupe MADITUC traitant de la caractérisation du TA (Chapleau, Allard, Trépanier, 1996) il convient de distinguer le taux global de déplacement du taux spécifique de déplacement.

Le taux global de déplacements se calcule comme le rapport du nombre total de déplacements pour une période donnée par le nombre de jours disponibles dans cette période ; tandis que le taux spécifique de déplacements ne tient compte que des jours où le client s'est effectivement déplacé. Le calcul du taux spécifique, est de ce fait, un meilleur estimateur de la mobilité car il ne tient compte que des jours où les clients se sont réellement déplacés.

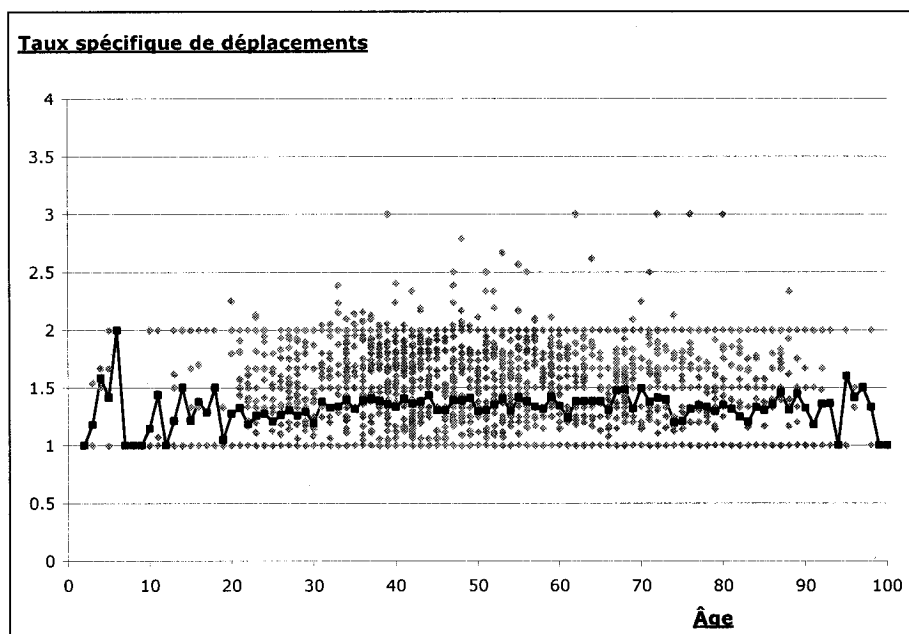


Figure 5.13 Nombre moyen de déplacement par jour selon l'âge du (mois de mars 2005, 3855 clients)

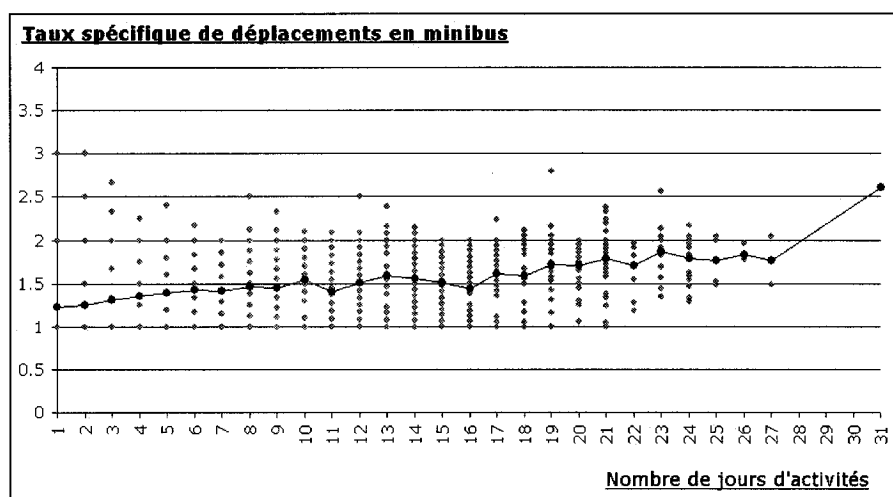


Figure 5.14 : Nombre moyen de déplacement par jour selon le nombre total de jours d'activité du client (mois de mars 2005, 31 jours, 3855 clients)

Plusieurs observations découlent des figures ci-dessus montrant la distribution du taux spécifique de déplacements selon l'âge et le nombre de jours actifs recensés pour chaque client.

En moyenne, le taux spécifique de déplacements est plus élevé pour les clients ayant le

plus de jours d'activité sur le réseau. En d'autres termes, les clients les plus fréquents sur le réseau en terme de nombre de jours actifs, sont aussi ceux qui ont la plus grande intensité journalière sur le réseau. Ceci s'explique en partie par la captivité vis-à-vis des minibus de TA de certains clients en raison de leur statut de transférabilité.

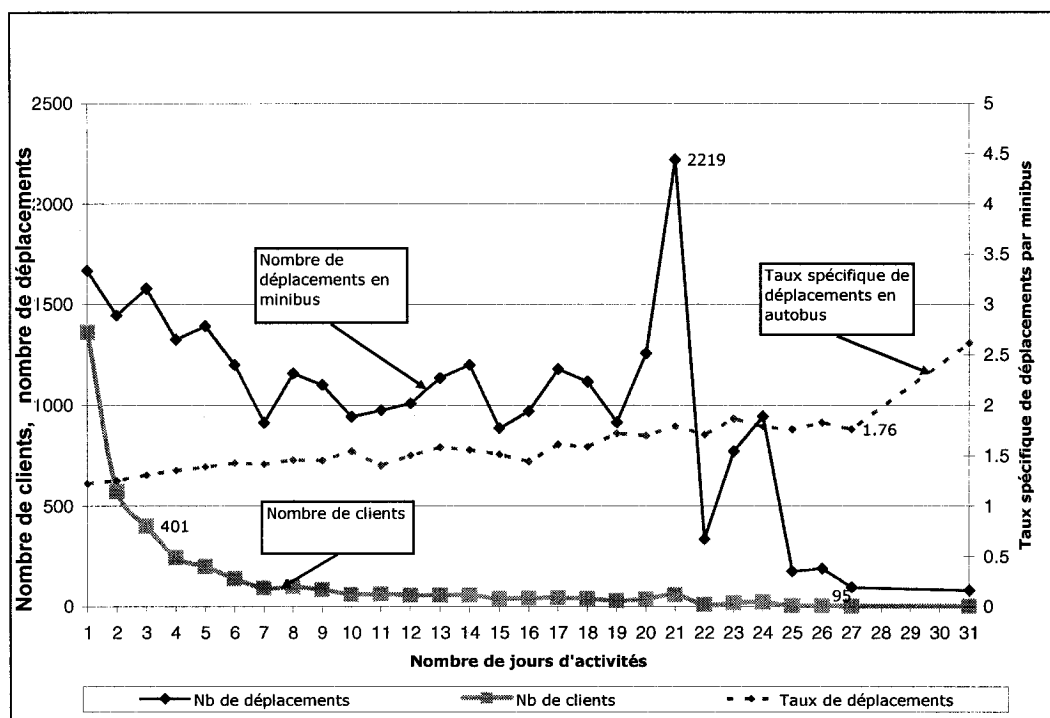


Figure 5.15 : Caractérisation de la mobilité de la clientèle. Répartition selon le nombre de jours d'activité

Les taux spécifiques de déplacement inférieurs à 2 observés confirment bien que l'échantillon analysé, des déplacements en minibus ne représente que le tiers de tous les déplacements, les 2/3 des déplacements de TA de la STM étant assuré par les taxis.

Le pic au niveau du nombre de déplacements attribuables aux personnes ayant 21 jours d'activités s'explique par le fait qu'il y a eu 21 jours ouvrables dans le mois de mars 2005.

Le nombre d'arrêts intermédiaires subis

Le nombre d'arrêts subis par un client, entre son embarquement et son débarquement, lors d'un déplacement exprime le niveau de service qui lui est offert.

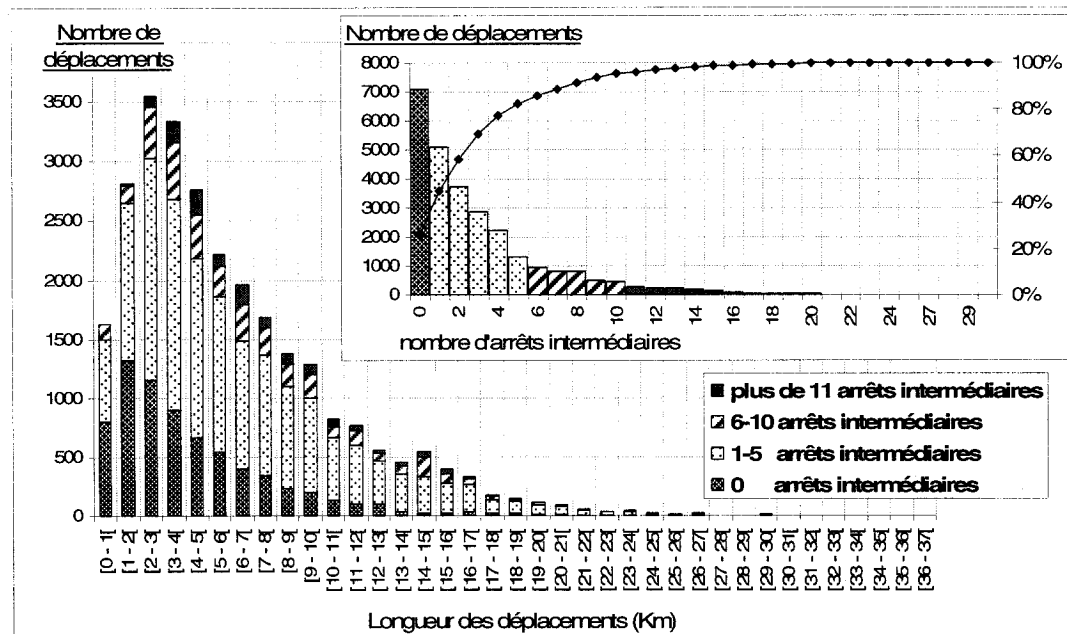


Figure 5.16 : Distribution des déplacements selon le nombre d'arrêts intermédiaires subis par le client

5.2.5 La classe Tournée

Chaque tournée est composée d'une séquence temporellement ordonnée d'arrêt-tournées à effectuer par un véhicule pour y desservir les déplacements d'un ou de plusieurs clients. La durée du parcours entre les arrêts et la durée de chaque arrêt sont estimées et communiquées au chauffeur sous forme d'un tableau de marche indiquant, pour chaque arrêt, l'heure d'arrivée et de départ.

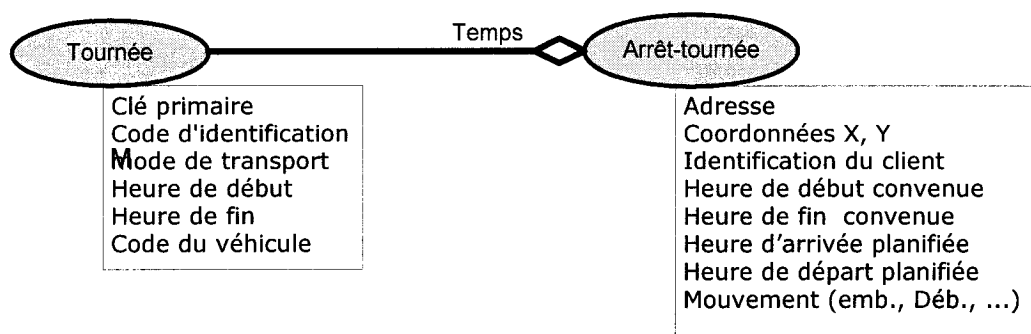


Figure 5.17 Relation objet entre une tournée et un arrêt-tournée

L'objet Arrêt-Tournée peut être décrit comme l'élément unitaire de la planification. Il s'agit d'une position spatio-temporelle de rendez-vous impliquant, le plus souvent, un client, un chauffeur et un véhicule (minibus ou taxi).

Tableau 5.5 Liste des attributs de la classe arrêt-tournée.

ARRÊT		GET	SET
Attributs de référencement			
CLEF	clef primaire	√	
JOUR		√	
VEHICULE	Code d'identification du véhicule	√	
TOURNEE	Code d'identification de la tournée	√	√
MODE	Mode de transport utilisé (minibus de TA, taxi, ...)	√	
LIEU	Code d'identification Du lieu d'arrêt	√	√
CLIENT	Code d'identification du client	√	√
Attributs du service planifié			
ORDRE	Séquence de l'arrêt dans la tournée du véhicule	√	
MOUVEMENT	(embarquement, débarquement, garage, pause ...)	√	
H ARR PL	Heure d'arrivée planifiée	√	
H DEP PL	Heure de départ planifiée	√	
H ARR CO	Heure d'arrivée convenue	√	
H DEP CO	Heure de départ convenue	√	
Attributs du service réalisé (dérivés de la trace GPS)			
H ARR RE	Heure d'arrivée convenue	√	
H DEP RE	Heure de départ convenue	√	
Attributs de statistiques opérationnelles			
DUREEPL	Durée planifiée de l'arrêt	√	√
DUREERE	Durée réalisée de l'arrêt	√	√

Chaque arrêt-tournée est caractérisé par une clef primaire, le jour, le code de la tournée à laquelle il appartient et par un numéro représentant sa position dans le déroulement de la séquence de la tournée (ORDRE). L'association de chaque arrêt-tournée à un lieu géolocalisé est assurée par l'utilisation d'une clef étrangère reliant chaque arrêt-tournée à un enregistrement de la table LIEUX.

Tableau 5.6 Liste des attributs de la classe Tournée

TOURNÉE			GET	SET
Attributs de référencement				
CLEF	clef primaire		✓	
JOUR			✓	
HDEBUT	Heure de début de la tournée		✓	
HFIN	Heure de fin de la tournée		✓	
CODE	Code d'identification de la tournée		✓	
MODE	Le mode de transport (minibus de TA, taxi, ...)		✓	
VEHICULE	Code d'identification du véhicule		✓	
Attributs de statistiques opérationnelles				
NBCLIENTS	Nombre de clients desservis		✓	✓
NBARRETS	Nombre d'arrêts identifiés		✓	✓
NBARRETS A	Nombre d'arrêts "annulés"		✓	✓
NBARRETS G	Nombre d'arrêts "Garage"		✓	✓
NBARRETS E	Nombre d'arrêts "embargnement"		✓	✓
NBARRETS D	Nombre d'arrêts "débarquement"		✓	✓
NBARRETS P	Nombre d'arrêts "pause"		✓	✓
NBARRETS T	Nombre d'arrêts "téléphone"		✓	✓
DUREE	Durée de la tournée		✓	✓
DIST2	Distance cumulée euclidienne		✓	✓
DISTGPS	Distance cumulée GPS		✓	✓
KMMORT	Kilométrage mort		✓	✓
PASSKM	Total de passagers-kilomètres		✓	✓
CHARGEMAX	Valeur maximale du profil de charge		✓	✓

Chaque tournée est caractérisée en terme de kilométrage mort, de passagers kilomètre, de nombre de clients desservis, de durée de la tournée ainsi que de longueur totale de la tournée.

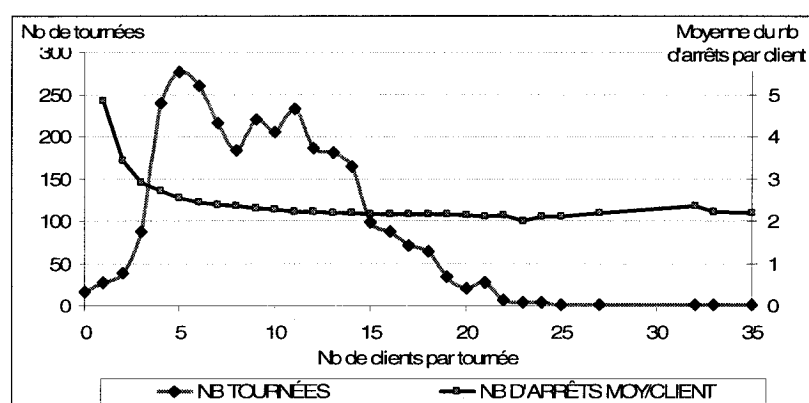


Figure 5.18 : Distribution des tournées selon le nombre de clients desservis (2965 tournées, 3833 clients)

Longueur et kilométrage mort d'une tournée

La longueur d'une tournée est calculée comme la somme des distances à vol d'oiseau entre les différents arrêts géolocalisés, de la sortie du véhicule du garage, jusqu'à son retour au garage.

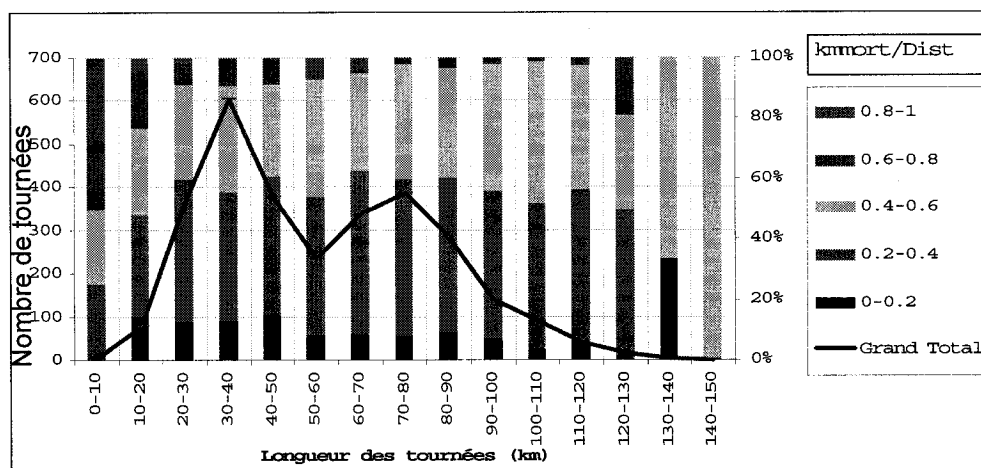


Figure 5.19: Distribution de la longueur des tournées.

La Figure 5.20 montre la distribution des tournées selon la proportion de kilométrage mort effectué lors de chaque sortie. Le kilométrage mort constitue la somme des distances parcourues à vide par un véhicule lors d'une tournée.

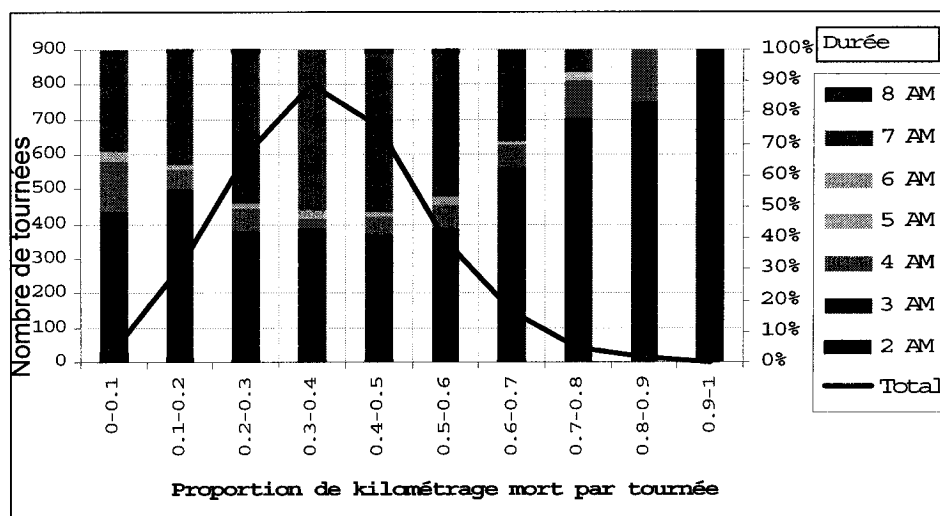


Figure 5.20: Proportion de kilométrage mort par tournée

La segmentation selon la durée des tournées montre la prédominance des tournées d'une durée de moins de 4 heures lorsque le kilométrage mort représente plus que 60 % de la distance totale parcourue. Cela correspond concrètement aux tournées impliquant peu de clients mais se situant loin du garage. Pour ces tournées, la distance parcourue à vide entre le garage et le premier embarquement (aller) puis entre le dernier débarquement et le garage (retour) constitue la grande part de la distance totale parcourue.

Profil temporel de l'usage des ressources (minibus)

La Figure 5.21 montre une distribution bimodale de la durée planifiée des tournées. La plupart des tournées impliquant 10 clients et moins durent 3h45 (une pièce de travail) tandis que les tournées de plus de 10 clients ont une durée d'environ 7h30 (deux pièces de travail).

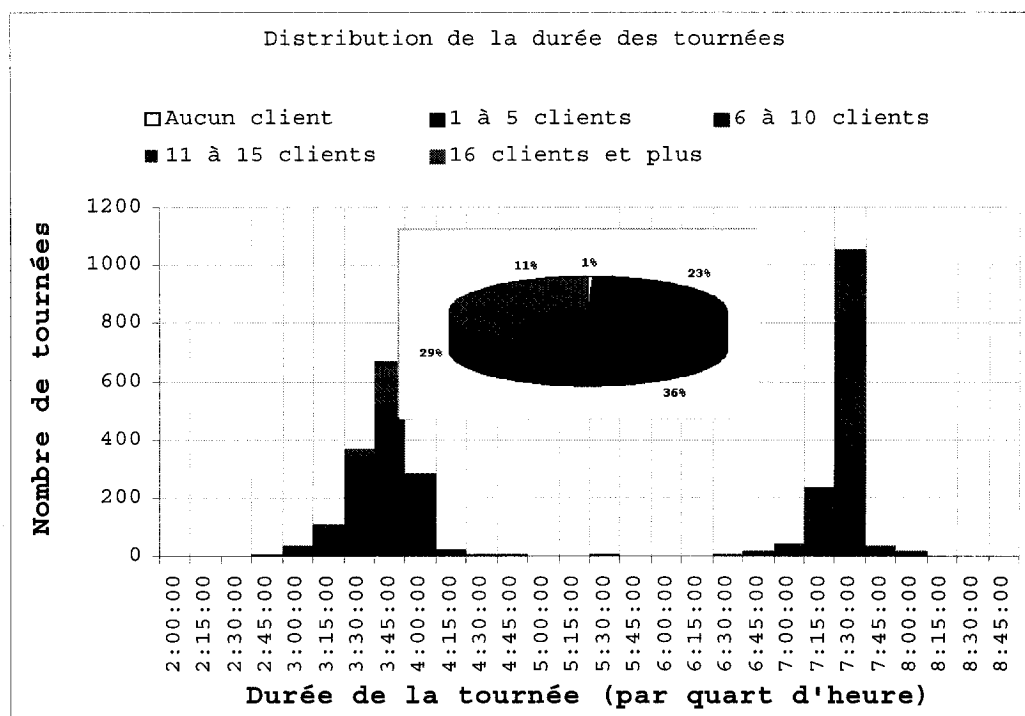


Figure 5.21: Segmentation des tournées selon le nombre de clients desservis et la durée des tournées (2965 tournées, 3833 clients, 17 tournées sans clients).

De façon générale, plus une tournée dure, plus la distance parcourue est longue et plus il y a de clients pris en charge.

L'offre

Connaissant l'heure de début et de fin de chaque tournée planifiée, le nombre de véhicules en service à chaque instant de la journée se déduit en calculant la somme de tous les véhicules sortis depuis le début de la journée moins la somme de tous les véhicules revenus au garage.

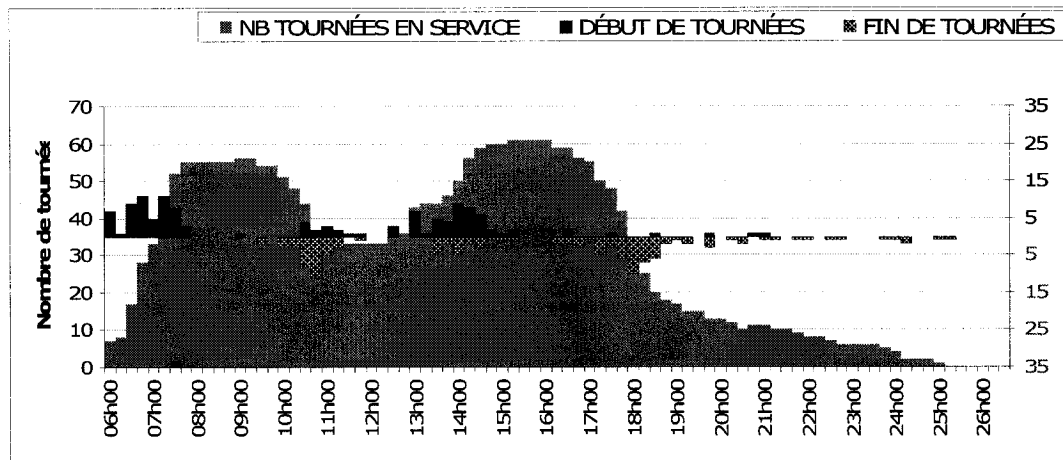


Figure 5.22: Nombre de tournées en service sur le réseau de la STM (intervalles de 15 minutes). Journée du mardi 1^{er} mars 2005.

La demande

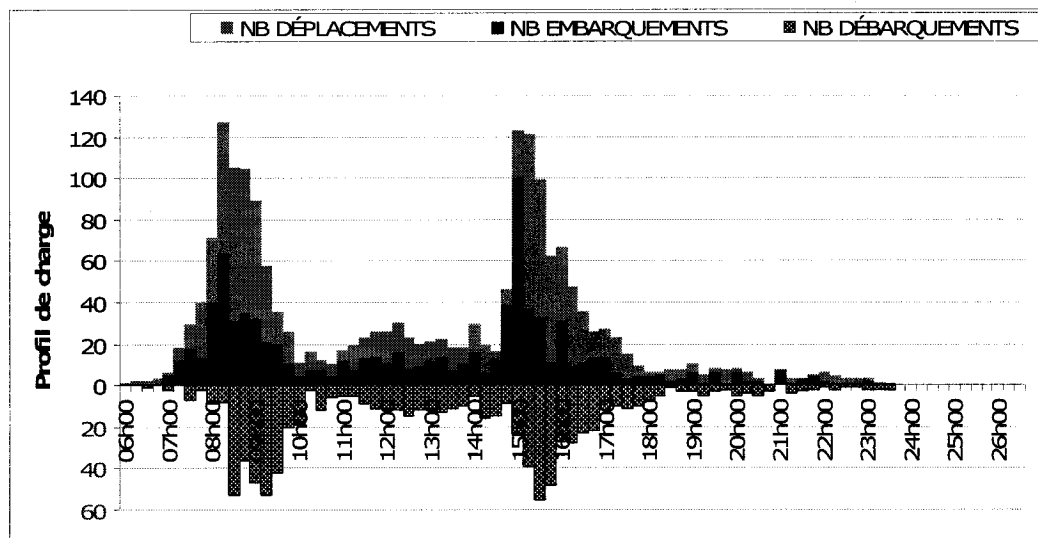


Figure 5.23: Nombre de clients pris en charge sur le réseau de TA de la STM. (intervalle de 15 minutes). Journée du mardi 1^{er} mars 2005.

Telles qu'illustrées par les figures ci-après, les tournées durant 2 pièces de travail constituent ce qu'on pourrait appeler le service de base tandis que les tournées d'une durée équivalente à une pièce de travail correspondent à un service d'appoint durant les périodes de pointe AM et PM.

Tournées d'une durée équivalent à une pièce de travail (3h45)

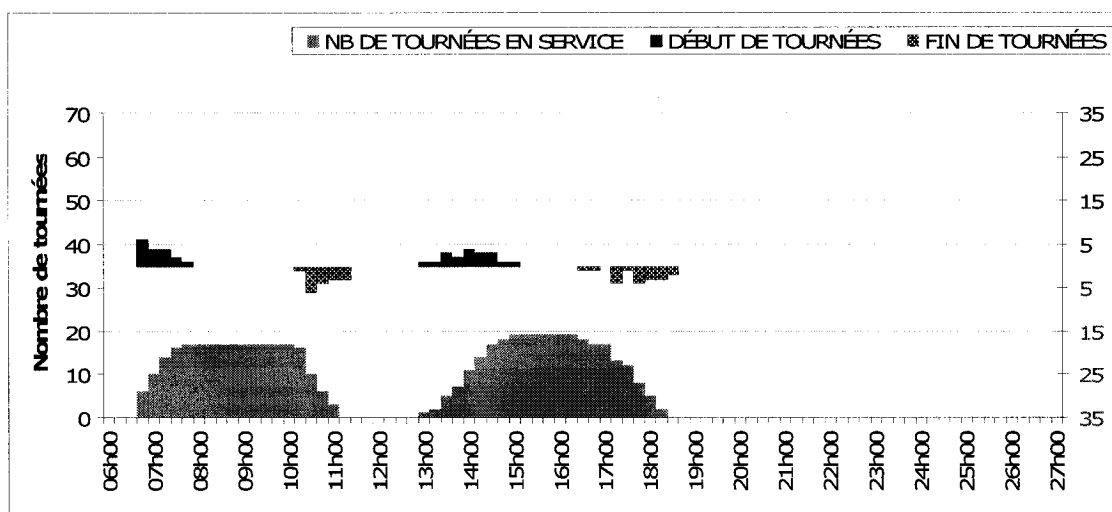


Figure 5.24 : Nombre de tournées d'une durée équivalent à 2 pièces de travail, en service sur le réseau de la STM. Intervalles de 15 minutes. Journée du mardi 1^{er} mars 2005.

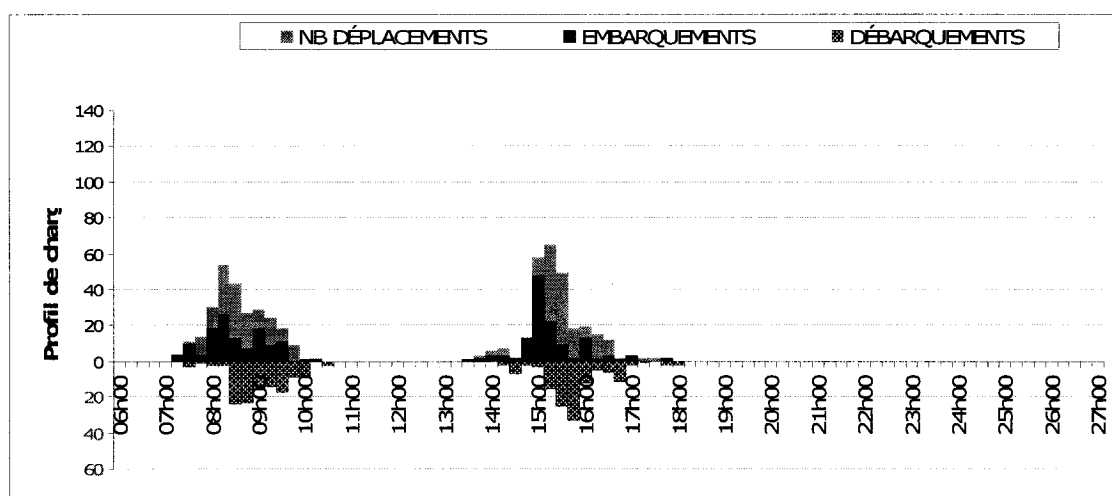


Figure 5.25 : Nombre de clients pris en charge par les tournées d'une durée équivalent à une pièce de travail. Intervalles de 15 minutes. Journée du mardi 1^{er} mars 2005.

Tournée d'une durée équivalent à 2 pièces de travail (7h30)

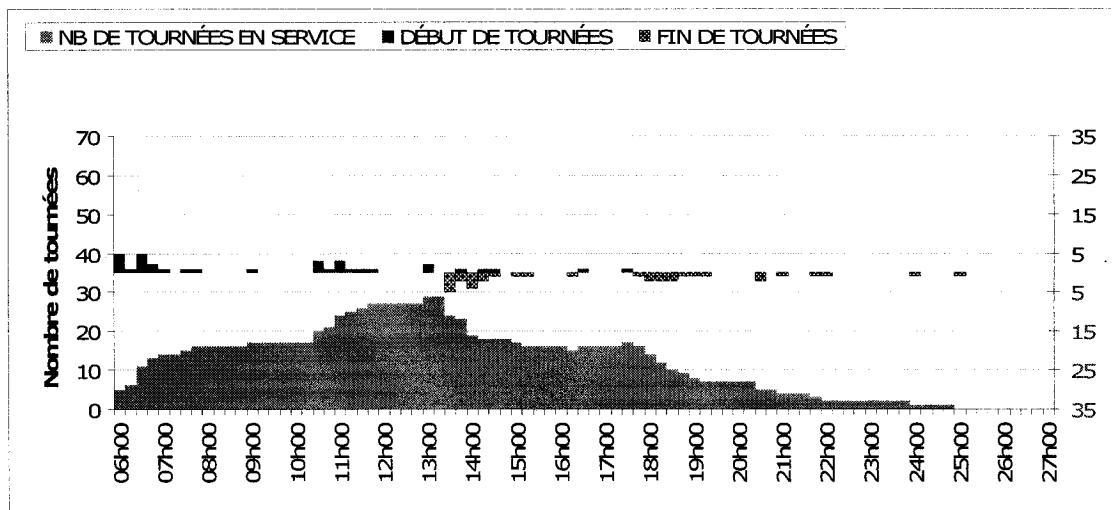


Figure 5.26 : Nombre de tournées d'une durée équivalent à 2 pièces de travail, en service sur le réseau de la STM (intervalles de 15 minutes). Journée du mardi 1^{er} mars 2005.

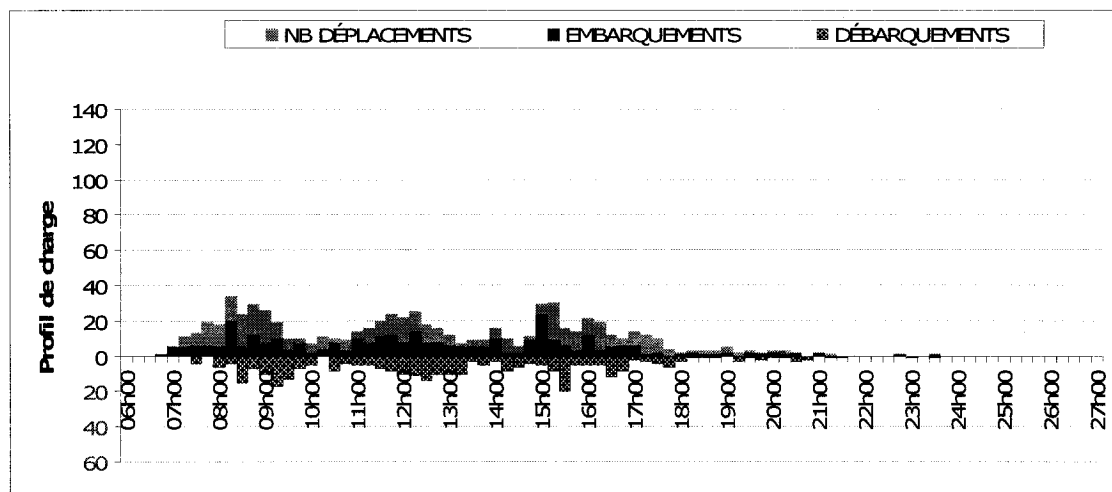


Figure 5.27 Nombre de clients pris en charge par les tournées d'une durée équivalent à 2 pièces de travail. Intervalles de 15 minutes. Journée du mardi 1^{er} mars 2005

5.2.6 Le véhicule

Le profil de charge de chaque tournée révèle la charge maximale de passagers transportés simultanément par le véhicule desservant cette tournée.

La capacité de chaque véhicule est approximée en calculant la charge maximale de

passagers simultanément transporté dans le véhicule pour chaque jour d'activité.

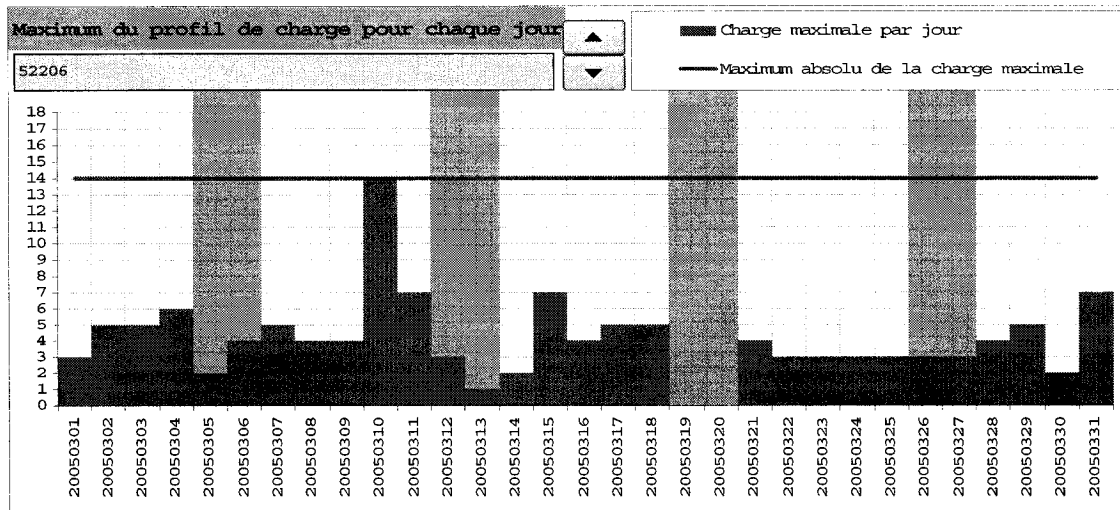


Figure 5.28 : Évolution de la charge maximale en service d'un véhicule (exemple du minibus 52206 ; équipé de GPS).

Le minibus 52206 dont la valeur maximale du profil de charge pour chaque jour est affichée ci-dessus a une capacité au moins égale à 14 passagers puisque le 10 mars 2005, il y a eu, à un moment de la journée, 14 clients simultanément présents dans ce minibus. Pour les autres jours, la charge maximale dans le bus atteint à peine 7 clients. Ce qui laisse penser que le minibus n'est pas utilisé à sa pleine capacité.

L'évolution de la charge maximale du véhicule pour chaque jour de service nous renseigne sur le taux de remplissage du dit véhicule et par conséquent sur le potentiel résiduel d'amélioration de l'usage des ressources.

5.3 Les chaînes de déplacements et schéma d'activités

Le cheminement d'un objet est soumis à une double contrainte de continuité dans l'espace et dans le temps. De ce fait, tout cheminement dans le temps et l'espace se schématise par une chaîne continue de déplacements entre différents lieux géolocalisés.

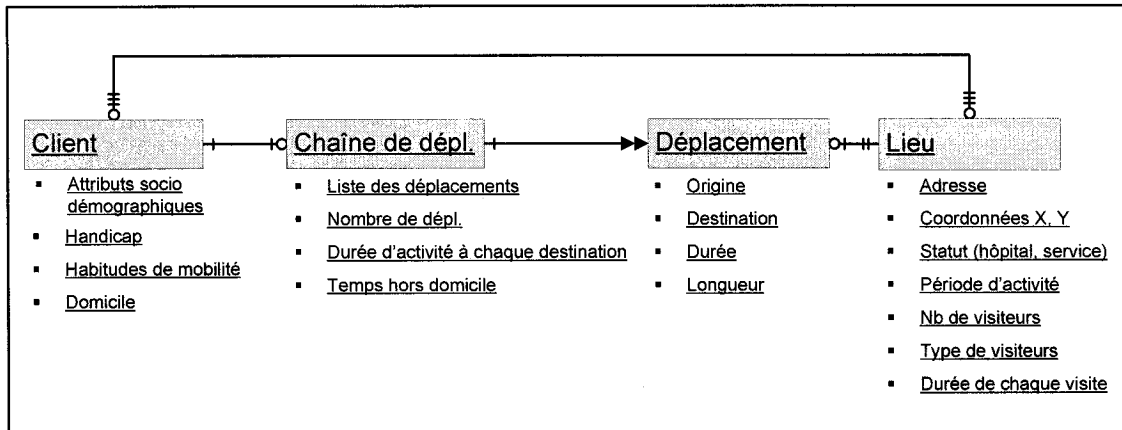


Figure 5.29: Modèle objet d'une chaîne de déplacements.

5.3.1 Définition d'une chaîne complète de déplacement.

Une chaîne de déplacements consiste en une suite continue de déplacements commençant et de terminant en un même lieu, identifié comme le point d'encrage de cette chaîne de déplacements. Comme expliqué par Morency (2003), la nature complexe des choix de déplacements impose une identification rigoureuse de différents schémas de déplacements possibles.

- Une chaîne simple de déplacements implique deux lieux et est composée de deux déplacements (un déplacement aller et un déplacement retour).
- Une chaîne complexe est une chaîne de déplacements impliquant plus de deux lieux. Elle est donc composée d'au moins 3 déplacements.
- Une chaîne composée de déplacements est une chaîne complexe de déplacement qui de contient une autre chaîne de déplacement. Autrement dit, une chaîne composée de déplacement impliquent plusieurs lieux dont au moins deux sont des points d'ancrage.

La Figure 2.2 illustre l'ensemble des déplacements d'un client pour une journée. On y dénombre une chaîne simple de déplacement constitué des déplacements 6 et 7, et une chaîne composée de déplacements impliquant les lieux A, B, C et D ; et contenant une chaîne complexe de déplacements faite des déplacements 2, 3 et 4.

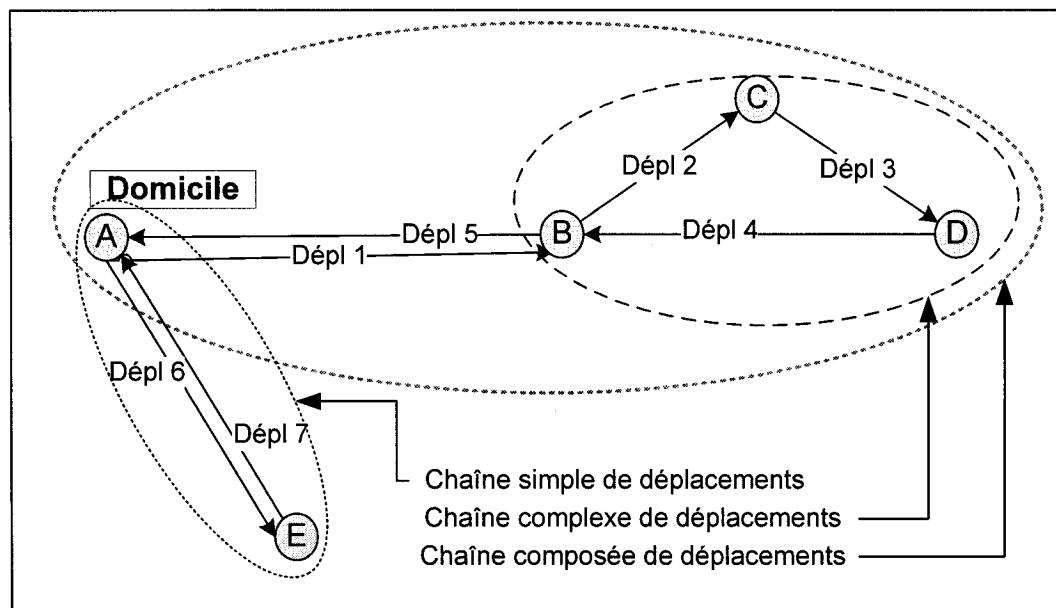


Figure 5.30 : Exemple schématique d'une séquence journalière de déplacements d'un client. Cette chaîne comporte 7 déplacements impliquant 5 lieux géolocalisés dont le domicile et 4 destinations.

Le point A, identifié comme le domicile du client est le point d'ancrage de la chaîne composée de déplacements telle qu'identifiée sur la Figure 5.30 et de la chaîne simple de déplacements. Le point B est le point d'ancrage de la chaîne complexe de déplacements faite des déplacements 2, 3 et 4.

5.3.2 La chaîne journalière de déplacement

Nous entendons par une chaîne journalière de déplacements la séquence constituée de l'ensemble des déplacements effectué par un client au cours de la journée, de sa première sortie du domicile, jusqu'à son dernier retour au domicile.

La définition proposée d'une chaîne journalière de déplacements, fait l'hypothèse que le client rentre à son domicile tous les jours. Cette supposition semble raisonnable étant donnée le caractère urbain des déplacements en question. Partant de cette hypothèse, le lieu apparaissant le plus fréquemment comme première origine et dernière destination pour l'ensemble des déplacements d'une journée peut être assimilé au domicile du client.

Tableau 5.7 Exemple de données de chaînes de déplacements d'un client

Liste chronologique des lieux impliqués					
JOUR	TYPE	Nb Dépl.	ID_LIEU 1	ID_LIEU 2	ID_LIEU 3
20050301	MAR	2	819	1648	819
20050302	MER	2	819	1648	819
20050303	JEU	2	819	1648	819
20050306	DIM	2	819	1368	819
20050307	LUN	2	819	1648	819
20050308	MAR	2	819	2415	819
20050309	MER	2	819	2813	819
20050310	JEU	2	819	1648	819
20050313	DIM	2	819	1368	819
20050314	LUN	2	819	1648	819
20050315	MAR	2	819	1648	819
20050316	MER	2	819	1648	819
20050317	JEU	2	819	1648	819
20050320	DIM	2	819	1368	819
20050321	LUN	2	819	1648	819
20050322	MAR	2	819	1194	819
20050323	MER	2	819	1648	819
20050324	JEU	2	819	1621	819
20050327	DIM	2	819	1368	819

Le tableau ci-dessus est un exemple montrant, pour un client régulier, l'ordre chronologique des lieux impliqués dans chaque chaîne simple de déplacements. Plusieurs observations peuvent être déduites de l'analyse de telles données :

- Le lieu ID=819 est le point d'ancrage de chacune des chaînes de déplacements recensées. Il s'agit vraisemblablement du domicile de ce client.
- Ce client a 5 jours d'activité par semaine ; soit dimanche, lundi, mardi, mercredi et jeudi.
- Les déplacements effectués chaque dimanche consistent à aller visiter le lieu identifié par id=1368. On note aussi la régularité de sa chaîne de déplacement les dimanches comme le montre le tableau suivant.

Tableau 5.8 : Régularité d'une chaîne de déplacements d'un client le dimanche

			Liste chronologique des lieux impliqués		
JOUR	TYPE	Nb Dépl.	ID_LIEU 1	ID_LIEU 2	ID_LIEU 3
20050306	DIM	2	819	1368	819
20050313	DIM	2	819	1368	819
20050320	DIM	2	819	1368	819
20050327	DIM	2	819	1368	819

Une chaîne journalière peut être faite de chaînes simples, composées ou complexes.

5.3.3 Reconstitution des déplacements manquants

Étant donnée la nature partielle des données recueillies de la planification du TA, l'existence de déplacements effectués par d'autres modes comme les taxis adaptés, le transport en commun régulier, le covoiturage assuré par les proches ne sont pas indiquées dans la base de données concernant la planification du TA. Une prise en compte des déplacements non enregistrés est donc nécessaire pour dresser un meilleur profil de la demande.

Derechef, chaque chaîne de déplacement commence et se termine au même point (le point d'ancrage). Toute discontinuité dans le cheminement correspond donc à une séquence d'un ou de plusieurs déplacements manquants, effectués par un mode de déplacement autre que les minibus du TA. L'exploration des possibilités de reconstitution des segments de déplacements manquants nous a amené à distinguer les déplacements manquants en milieu de chaîne et dont le positionnement chronologique est connu des déplacements manquants en extrémités de chaîne et pour lesquels, le positionnement temporel ne peut être déduit sans apport d'information externe.

Cas de déplacements manquants au milieu de la chaîne de déplacements

Dans le cas d'un déplacement manquant au milieu d'une chaîne de déplacement, le positionnement chronologique de ce déplacement manquant est possible car l'on connaît l'heure du dernier débarquement précédant la discontinuité et l'heure de l'embarquement suivant.

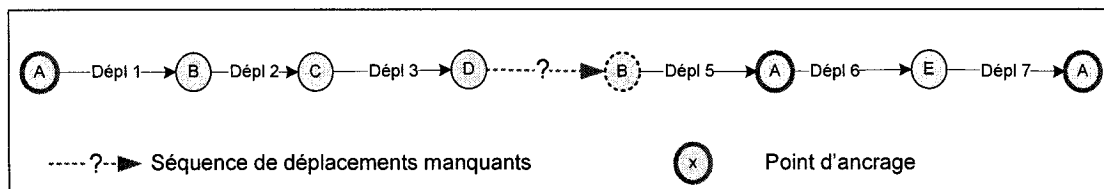


Figure 5.31 : Chaîne de déplacement incomplète. Un déplacement manquant au milieu d'une chaîne de 7 déplacements.

Il est possible de calculer le temps total correspondant à la séquence des déplacements manquants en tenant compte des durées d'activités habituels au dernier lieu de destination (le point D) connu et au lieu d'embarquement suivant (le point A). De même, la distance (euclidienne ou plus court chemin) entre les deux points peut être exprimé et une vitesse moyenne estimée.

Cas d'un déplacement manquant à une extrémité de la chaîne de déplacements

La Figure 5.32 présente un exemple de chaîne de déplacement pour laquelle le premier lieu d'origine diffère du dernier lieu de destination. De ce fait, cette chaîne est incomplète. De plus, le déplacement manquant se situe à l'une des extrémités de cette chaîne.

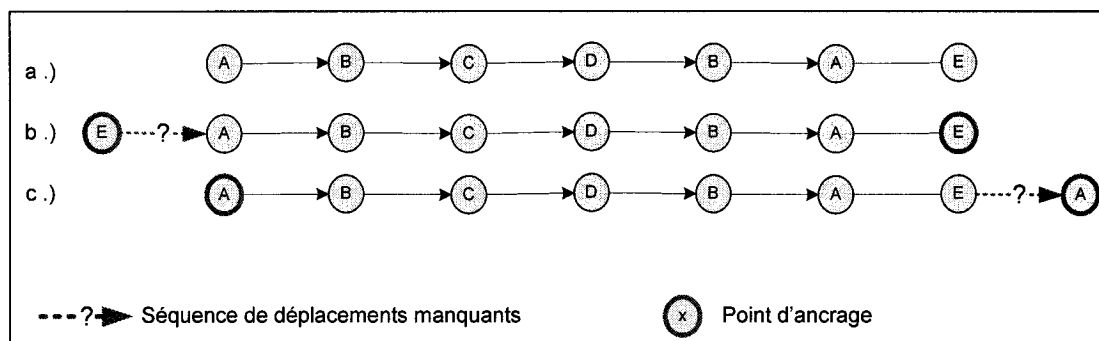


Figure 5.32 : Chaîne de déplacements incomplète. Cas d'un déplacement manquant à une des extrémités d'une chaîne de 6 déplacements.

Il n'est cependant pas possible, sur la base de ces seules informations de déduire le positionnement chronologique de la séquence des déplacements manquants. Les deux cas possibles positionnement temporel de la séquence des déplacements manquants sont illustrés en b.) et c.)

- b.) : la séquence de déplacements manquants se trouve au début de la chaîne de déplacements. Le point E est le point d'ancrage de la chaîne journalière.
- c.) : la séquence de déplacements manquants se trouve à la fin de la chaîne de déplacements. Le point A est le point d'ancrage de la chaîne journalière.

À moins d'apport d'informations externes (connaissance du domicile du client, heure habituel des déplacements, ...), il est impossible de désigner avec certitude le moment auquel a été faite la séquence des déplacements manquants.

Cas de déplacements non dérivables.

Dans cet exemple, une première série de déplacements (1, 2, 3, 4 et 5) est effectuée en minibus de TA. Le client sort de son domicile, effectue quelques déplacements et revient à son domicile. La deuxième sortie (déplacements 6 et 7) est assurée par un de ses proches.

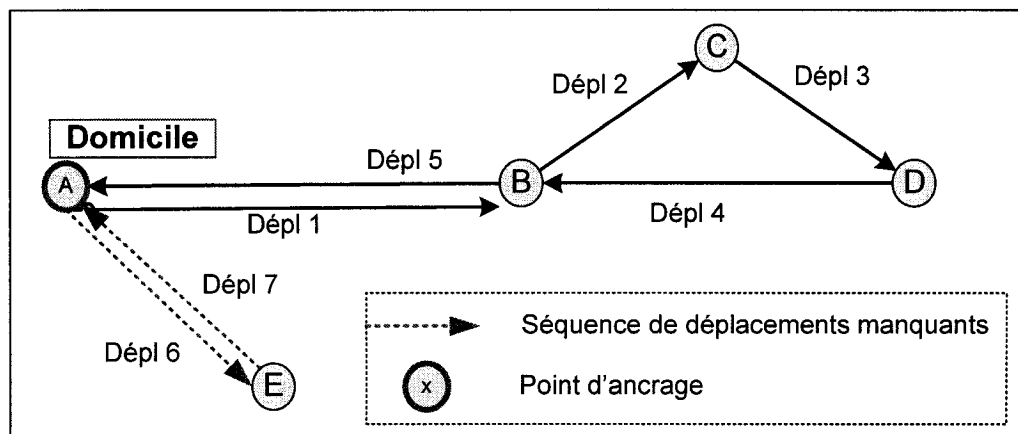


Figure 5.33 Chaîne de déplacements incomplète.

La déduction de la chaîne journalière de déplacements en se basant uniquement sur les informations de déplacements en TA, ignorerait complètement les déplacements de la deuxième sortie.

Cet exemple montre les limites d'une tentative de reconstitution des déplacements manquants, illustrant du même coup la plus value qu'aurait une prise en compte de tous les modes de déplacement dans l'analyse de la mobilité.

Tableau 5.9 Distribution des chaînes journalières de déplacements.

Nb de dépl. par chaîne	Nb de Chaînes complètes	Nb de Chaînes incomplètes		
		dépl. Manquant à une extrémité	dépl. Manquant au milieu	2 dépl. Manquants (au milieu et à une extrémité)
2	8154	9318	0	0
3	136	170	107	0
4	54	48	46	39
5	0	1	1	4
6	1	0	0	0
Total	8345	9537	154	43

Moins de 50% des chaînes journalières de déplacements sont complètes. La majeure partie des chaînes complètes est constituée de chaînes simples de déplacements (aller-retour).

5.3.4 Les rythmes d'activités

Les extrémités des déplacements autres que le domicile, constituent les lieux d'activités d'une personne. Selon son rythme de vie, une personne est amenée à effectuer des activités régulières et occasionnelles. Les activités de longues durées sont le plus souvent imputables au motif travail ou au motif étude. Les périodes d'inactivités, plus ou moins longues, constituent, elles aussi, un indicateur du statut d'un client. De la fréquence de visite d'un lieu, du temps qui y est passé et de la période de ces visites et de la nature de ce lieu peut être dérivé le type d'activité qu'une personne y pratique.

Chaque lieu d'activité peut être caractérisé par la quantité de déplacements qu'il attire, le nombre de personnes impliqués dans ces déplacements, le statut de ces personnes et la durée des activités qu'elles y mènent.

La dérivation de la nature des lieux de fréquentations et des motifs d'activités que les clients y mènent est donc un processus itératif au cours duquel les caractéristiques dérivées des activités-clients et les caractéristiques dérivées des lieux contribuent à tour de rôle à se raffiner les unes les autres.

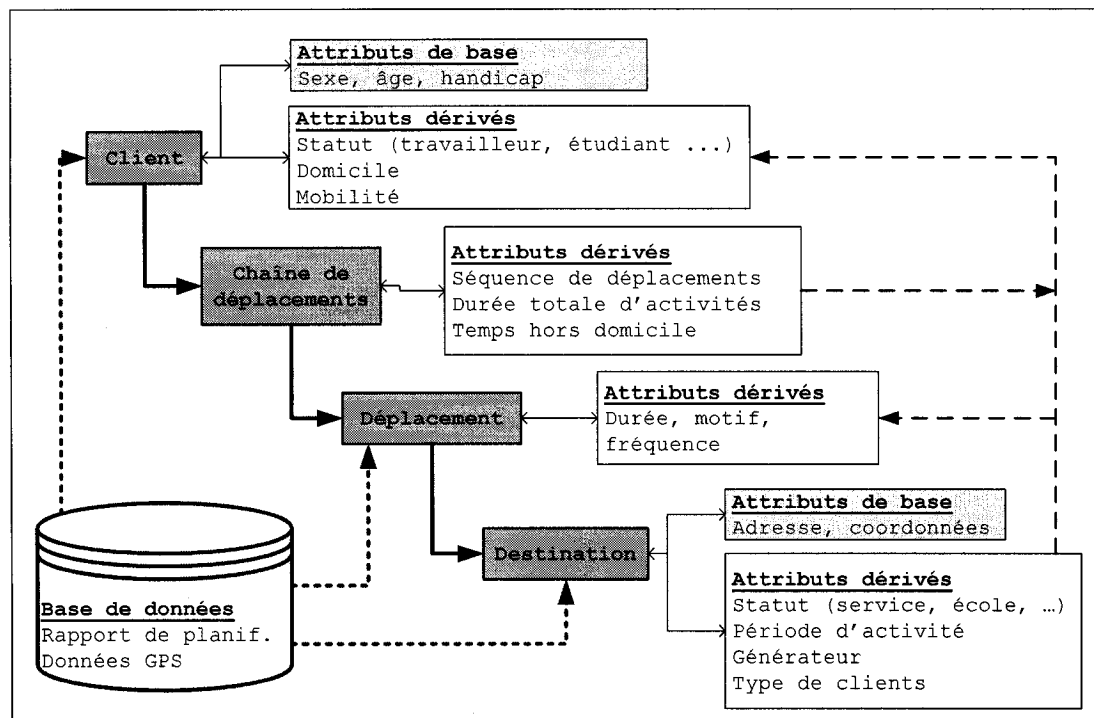


Figure 5.34 Processus itératif de dérivation du statut des clients, des motifs de déplacement et du statut des lieux.

5.4 Détection des corridors de tournées

Le caractère régulier de certains déplacements nous incite à investiguer la régularité des tournées. Une procédure de comparaison systématique des tournées deux à deux est mise en œuvre pour répondre à cette question. Compte tenu de la complexité apparente de la structure des tournées due à l'implication des différentes entités (lieux, clients, déplacements, horaires), nous avons défini 4 indices de similarité pour la comparaison deux à deux des tournées planifiées.

La nécessité de se limiter à des indices simples et facile à calculer est dictée par le nombre important d'itérations. De plus tous les indices utilisés sont symétriques, réduisant de moitié le nombre d'itérations.

Soit N le nombre de tournées planifiées, $N \times (N-1)/2$ itérations sont nécessaires pour comparer toutes les tournées 2 à 2. Le mois de mars 2005 comportant 2965 tournées, c'est 4,4 millions d'itérations qui furent donc réalisées pour la procédure de

comparaisons des tournées.

Indice de similarité des lieux (géométrie des tournées)

$$I_L = \frac{(\text{Nombre de lieux identiques aux deux tournées}) \times 2}{(\text{Nombre de lieux distincts tournée A}) + (\text{Nombre de lieux distincts tournée B})}$$

Même si un lieu est visité plusieurs fois dans une tournée, il n'est comptabilisé qu'une fois dans la liste des lieux impliqués dans cette tournée. La comparaison des lieux impliqués dans chacune des deux tournées à comparer ne tient donc compte ni de l'ordre chronologique de visite des lieux ni de la présence de boucle dans les tournées.

Toute tournée commençant et se terminant au garage, nous avons choisi de ne pas le comptabiliser dans la comparaison des tournées.

Indice de similarité des clients

$$I_c = \frac{(\text{Nombre de clients identiques aux deux tournées}) \times 2}{(\text{Nombre de clients tournée A}) + (\text{Nombre de clients tournée B})}$$

Tout comme l'indice de similarité des lieux, l'indice de similarité des clients ne tient pas compte de l'ordre chronologique de prise en charge des clients.

Indice de similarité des déplacements

Le triplet Client, Origine, Destination définit un déplacement. Le nombre de déplacements identiques dans les deux tournées est comptabilisé sans tenir compte des heures de déplacements (heure d'arrivée, de départ). L'indice de similarité des déplacements est calculé comme suit :

$$I_D = \frac{(\text{Nombre de déplacements identiques aux deux tournées}) \times 2}{(\text{Nombre de déplacements tournée A}) + (\text{Nombre de déplacements tournée B})}$$

Indice de similarité des plages horaires

La Figure 5.35 illustre le chevauchement dans le temps de l'horaire des 2 tournées à comparer. Le rapport entre la période d'activité commune aux deux tournées et la plage

horaire combinée des deux tournées, telle qu'indiquée sur cette figure, est calculé comme indice permettant de juger de la similarité de la plage horaire des deux tournées.

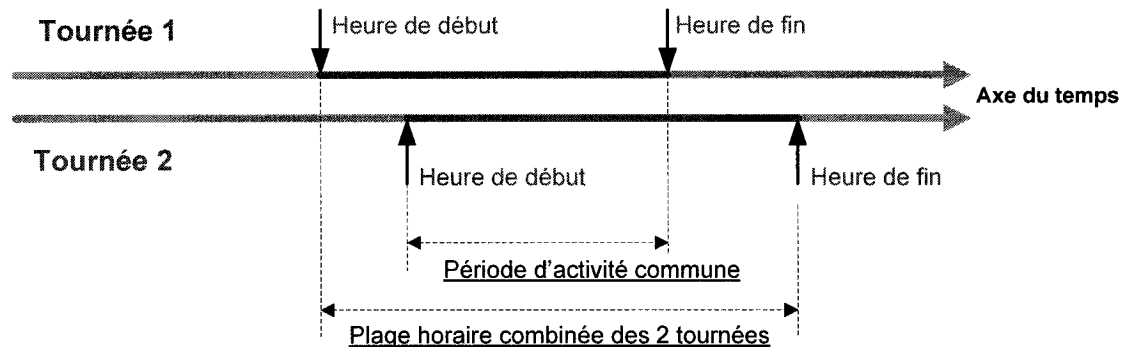


Figure 5.35 : Illustration du chevauchement dans le temps de 2 tournées

Lorsque deux tournées à comparer ont exactement les mêmes heures de début et de fin, l'indice de similarité des plages horaires de tournée est égal à 1 ; par contre, S'il n'y a aucun chevauchement des horaires des deux tournées, la période commune d'activité est nulle et l'indice de similarité des plages horaires est égale à 0.

$$I_H = \frac{\text{Période d'activité commune aux deux tournées}}{\text{Plage horaire combinée des deux tournées}}$$

Exemple de comparaison de deux tournées

L'exemple schématique suivant permet de mieux illustrer la problématique de comparaison des tournées et le calcul des indices de similarité présentés.

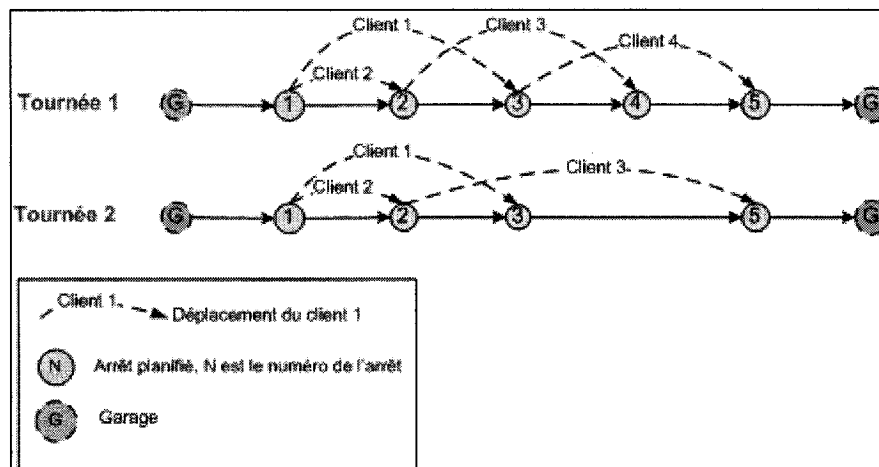


Figure 5.36 Illustration de la problématique de comparaison de deux tournées.

La tournée 1 est composée de 5 arrêts planifiés et permet de desservir les déplacements de 4 clients tandis que la tournée 2 dessert 3 clients en 4 arrêts planifiés. La tournée 2 est composée de 4 des 5 arrêts qui composent la tournée 1 et assure le déplacement de 3 des 4 clients pris en compte par la tournée 1. De plus, les déplacements des clients 1 et 2 sont identiques sur les deux tournées alors que le client 3 y effectue des déplacements différents.

Tableau 5.10 : Exemple de calcul des indices de comparaison deux tournées

	Tournée 1	Tournée 2	Intersection	Indice de similarité
Liste des lieux	Garage Arrêt1 Arrêt2 Arrêt3 Arrêt4 Arrêt5	Garage Arrêt1 Arrêt2 Arrêt3 Arrêt5	Arrêt1 Arrêt2 Arrêt3 Arrêt5	$I_L = \frac{4 \times 2}{5 + 4} = 0,88$
Liste des clients	Client1 Client2 Client3 Client4	Client1 Client2 Client3	Client1 Client2 Client3	
Liste des déplacements (Client, #Orig, #Dest)	(Client1, 1, 3) (Client2, 1, 2) (Client3, 2, 4) (Client4, 3, 5)	(Client1, 1, 3) (Client2, 1, 2) (Client3, 2, 5)	(Client1, 1, 3) (Client2, 1, 2)	$I_D = \frac{2 \times 2}{4 + 3} = 0,57$
Horaire de tournée				
Heure de début	08:10:00	10:47:20	Plage commune: 0:41:10 (10:47:20 à 11:28:30)	$I_H = \frac{0:41:10}{4:55:00} = 0,14$
Heure de fin	11:28:30	13:05:00	Plage combinée: 4:55:00 (08:10:00 à 13:05:30)	

Construction de corridors de tournées similaires

La construction des corridors de tournées est faite en groupant ensemble toutes les tournées similaires. La Figure 5.37 montre 7 corridors de tournées.

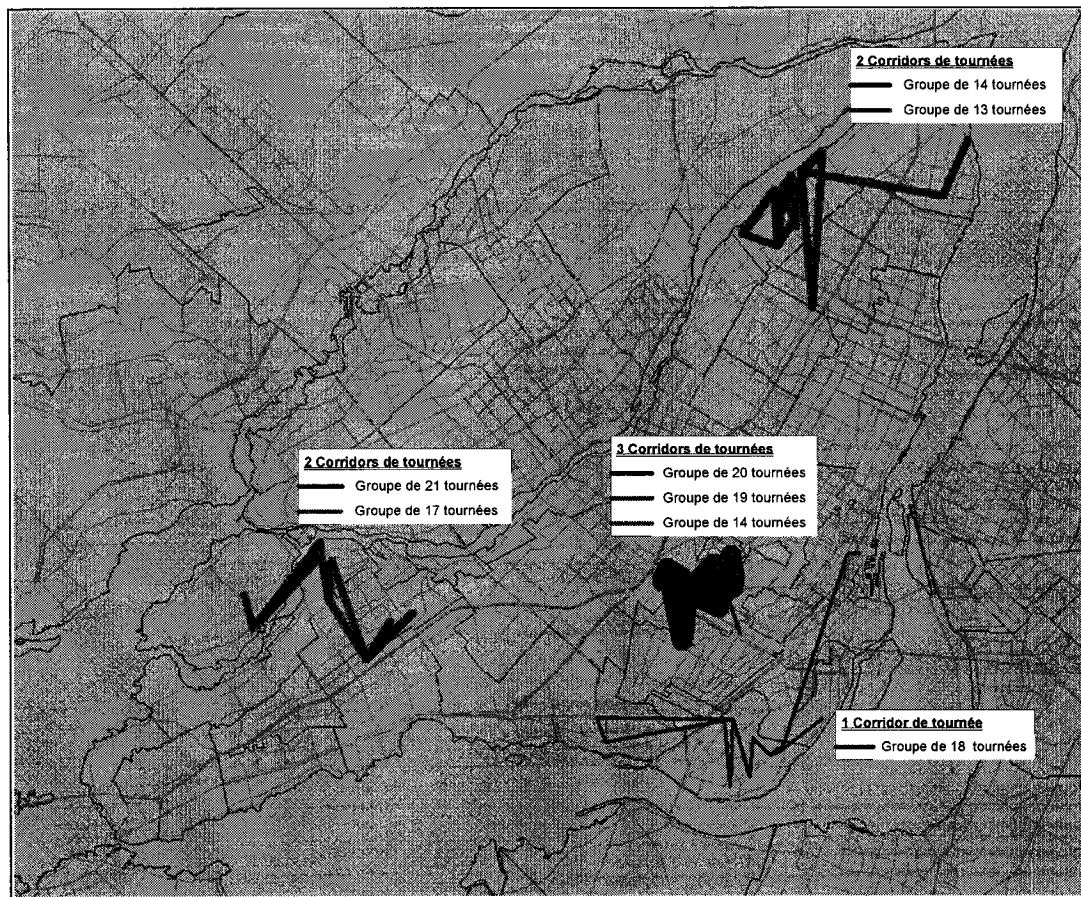


Figure 5.37: Identification des groupe de plus de 10 tournées similaires. Lieux identiques à 75%, clients identiques à 50% (136 tournées).

Les corridors de tournées détectées desservent des zones très localisées (les déplacements impliquent des lieux se trouvant tous dans la même zone).

5.5 Analyse des retards (Horaire planifié vs horaire client)

L'adhérence de l'horaire planifié (indiqué au chauffeur) à l'horaire convenu (communiqué au client lors de la réservation) exprime la capacité à se conformer à l'ensemble des contraintes auxquelles est soumise la planification des tournées. Une caractérisation systématique des écarts entre le planifié et le convenu est réalisée pour

identifier les sources des écarts entre le service réalisé et le service convenu.

L'heure d'arrivée et l'heure de départ convenues permettent de scinder l'espace temporel en 3 parties.

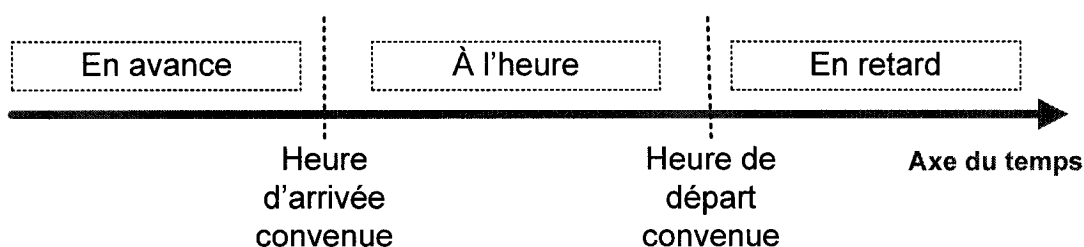


Figure 5.38 : Segmentation de l'espace temporel à l'arrêt tourné planifié (point de vue du client)

Il en résulte 6 cas possibles de comparaison de l'horaire planifié à l'horaire convenu.

Départ Arrivée	En avance	À l'heure	En retard
En avance	Cas 1 	Cas 2 	Cas 4
À l'heure		Cas 3 	Cas 5
En retard			Cas 6

Légende

Figure 5.39: Illustration des 6 cas possibles de comparaison entre l'horaire planifié et l'horaire convenu

Près de 89% des arrêts clients planifiés sont réalisés dans l'intervalle de temps communiqué au client lors de la réservation. Les arrivées en avance représentent moins de 1% tandis que les départs en retard représentent 11%.

Tableau 5.11 : Distribution des retards aux arrêts planifiés (point de vue des clients)

Cas	Arrivée	Départ	Nombre d'arrêts
1	en avance	en avance	84 [00.2%]
2	en avance	à l'heure	45 [00.1%]
3	à l'heure	à l'heure	49337 [88.6%]
4	en avance	en retard	0 [00.0%]
5	à l'heure	en retard	4895 [08.8%]
6	en retard	en retard	1334 [02.4%]

En somme, les minibus sont rarement en avance et environ une fois sur dix en retard au points de rendez-vous avec un client.

Corrélation des retards entre arrêts successifs (Compressibilité des temps de parcours)

La compressibilité des temps de parcours planifiés est analysée en étudiant l'évolution du retard entre les paires d'arrêts successifs. Le Tableau 5.12 résume la corrélation des retards entre les arrêts successifs.

Tableau 5.12: Corrélation des retards entre les paires d'arrêts successifs

Départ de l'arrêt d'origine	Arrivée à l'arrêt suivant						Total
	En avance	A l'heure	En retard				
En avance	25 [34%]	48 [66%]	0 [00%]			73 [100%]	
A l'heure	68 [00%]	46011 [99%]	554 [01%]			46633 [100%]	
En retard	31 [01%]	5237 [87%]	773 [13%]			6041 [100%]	

Seulement 1% des départs à l'heure arrivent en retard à l'arrêt suivant, alors que 13 % des départs en retard arrivent en retard. Par ailleurs, 87% des départs en retard arrivent malgré tout à l'heure à l'arrêt suivant. Au vu de ces chiffres, il y a une certaine marge dans les temps de parcours alloué aux autobus, ce qui permet, assez souvent à un bus en retard à un arrêt de rattraper son retard pour arriver à l'heure, parfois même en avance, à l'arrêt suivant.

CHAPITRE 6 ANALYSE DE LA TRACE GPS

Dans ce chapitre, il est question d'explorer les possibilités nouvelles de documentation du service réalisé du fait de l'existence des données recueillies de la trace GPS des minibus. Il y a été exploré la possibilité de détecter les arrêts réalisés, et de les caractériser selon les temps d'ouverture des portes et la durée de l'extinction du moteur. Une procédure est ensuite proposée pour la fusion des données réalisées et des données planifiées en vue d'une mise à jour éventuelle des caractéristiques de mobilité (temps d'embarquement, temps de débarquement) des clients. La trace GPS permet aussi de raffiner le calcul des indicateurs de performance tels le kilométrage mort, la distance totale parcourue, le nombre de passagers-kilomètres et l'indice d'allongement des déplacements.

6.1 Échantillonnage des véhicules équipés de GPS

Derechef, l'échantillon analysé concerne uniquement les déplacements en minibus pour les 31 jours du mois de mars 2005. Des 109 minibus ayant servi au cours de cette période, seulement 6 sont équipés de GPS. Le nombre maximum de minibus simultanément en service était de 72 minibus. Les enregistrements GPS concernent aussi deux taxis pour lesquels nous ne disposons pas de rapports de planification.

La distribution des durées des tournées effectuées par les minibus équipés de GPS semble refléter un choix privilégiant l'attribution des véhicules équipés de GPS aux tournées les plus importantes en termes de durée et de nombre de clients desservis.

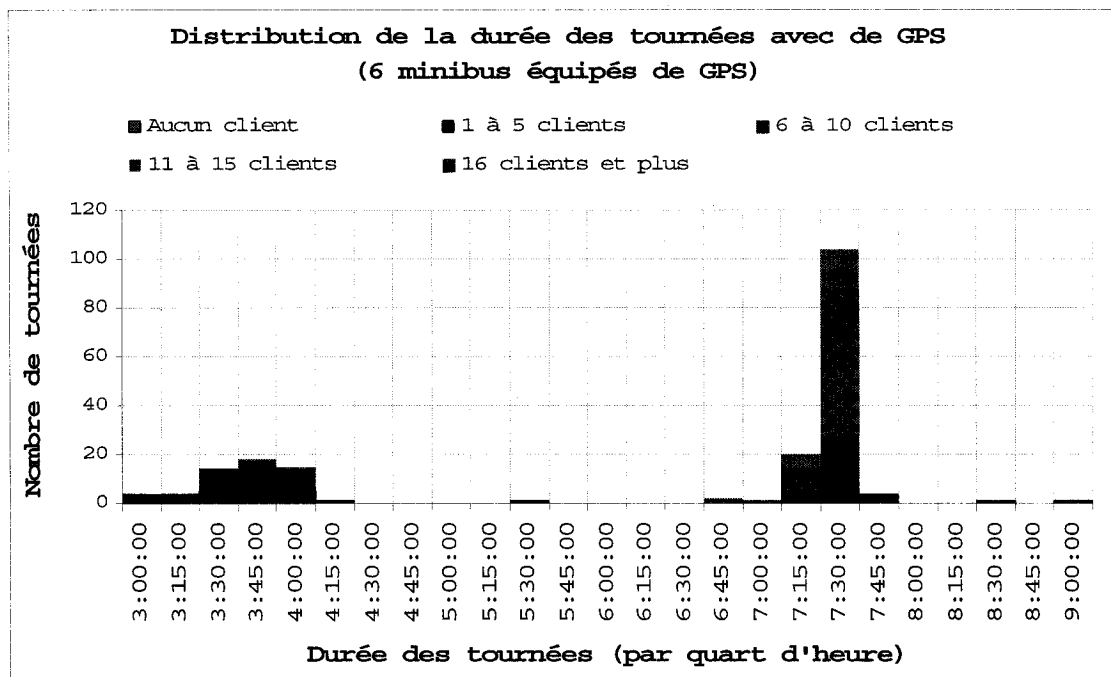


Figure 6.1: Durée des tournées équipées de GPS. Du 1^{er} au 31 mars 2005 (190 tournées, 6 minibus).

6.2 Validité des enregistrements GPS

Avant toute analyse se basant sur les enregistrements de points GPS, il paraît légitime de se questionner sur la validité des enregistrements GPS mis à notre disposition. La propriété de continuité spatio-temporelle du mouvement d'un objet induit certaines logiques de validation des enregistrements GPS.

Logique chronologique

L'enregistrement à intervalles réguliers des points GPS assure de facto l'ordre dans ces enregistrements. De ce fait, l'heure d'enregistrement des positions peut être utilisée comme clef primaire permettant de trier les données de la table des points GPS à intervalles réguliers.

Pour les enregistrements évènementiels, étant donné que certains capteurs peuvent se déclencher simultanément, l'ordre logique de certains évènements est mal enregistré. Une étape de la validation des enregistrements GPS a donc consisté à détecter les enregistrements évènementiels simultanés pour les ordonnancer.

Logique cinétique

Les caractéristiques cinétiques comme l'accélération maximale, la vitesse maximale constituent des contraintes pour le mouvement d'un véhicule dans l'espace. On sait, par exemple, d'après Vuchic (1981), que :

- en milieu urbain, un véhicule ne peut généralement rouler à plus de 100 km/h ;
- le seuil d'accélération et de décélération confortable est entre 1 et 1.8 m/s²,
- le seuil d'accélération maximale est entre 2 et 3 m/s².

Étant donnée la nature fragile des clients concernés par les déplacements en TA, ces limites de vitesse et d'accélération peuvent même être revues à la baisse.

Les relations impliquant la distance, la vitesse, l'accélération et le taux d'accélération sont illustrées sur la figure présentée ci-après.

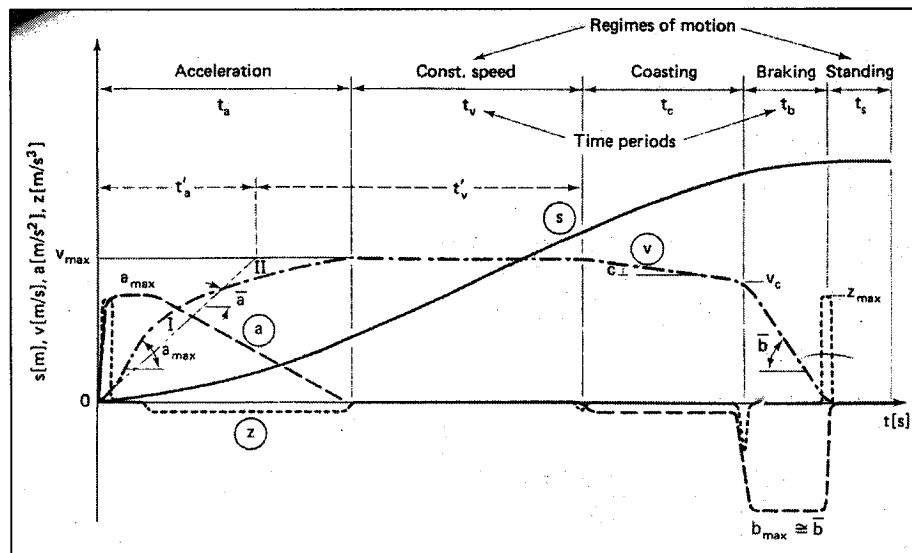


Figure 6.2: Variation de la distance, de la vitesse et de l'accélération dans le temps. (Vuchic, 1981), pages 158 à 160)

- Taux d'accélération : Z ;
- Accélération : $a = \frac{dV}{dt} = \int(Z) dt$;
- Vitesse : $V = \frac{dS}{dt} = \int(a) dt$;

- Distance : $S = \int (V) dt = \iint (a) dt^2$.

Logique topologique

Sachant qu'un minibus est contraint à un mouvement continu dans l'espace, les sauts de données (manque de transmissions) peuvent être comblés par l'association de la trace GPS au système d'information géographique de la voirie et l'interpolation de la position du véhicule faite à partir des techniques de Map Matching telles que relatées dans le rapport NCHRP Synthesis 301 du TRB. L'exploration de cette voie dans ce mémoire ne fut pas concluante à cause du manque de temps, de la complexité des algorithmes impliqués mais aussi à cause de la non disponibilité de données adéquatement codifiées du réseau de voirie l'île de Montréal.

6.2.1 La trace GPS et le profil de vitesse

Une expérience succincte a consisté à représenter la trace GPS de chaque véhicule à l'aide de segments constitués de deux arrêts GPS successifs espacés de moins de 10 minutes et distants de moins de 5 km. Une visualisation en est proposée à la Figure 6.3. La superposition des segments ainsi affichés avec le réseau de voirie est frappante.

en zones de 200 mètres de côté. Dans le but de refléter le plus possible les conditions de circulation, les enregistrements de points GPS ayant lieu pendant que le véhicule est à l'arrêt n'ont pas été pris en compte.

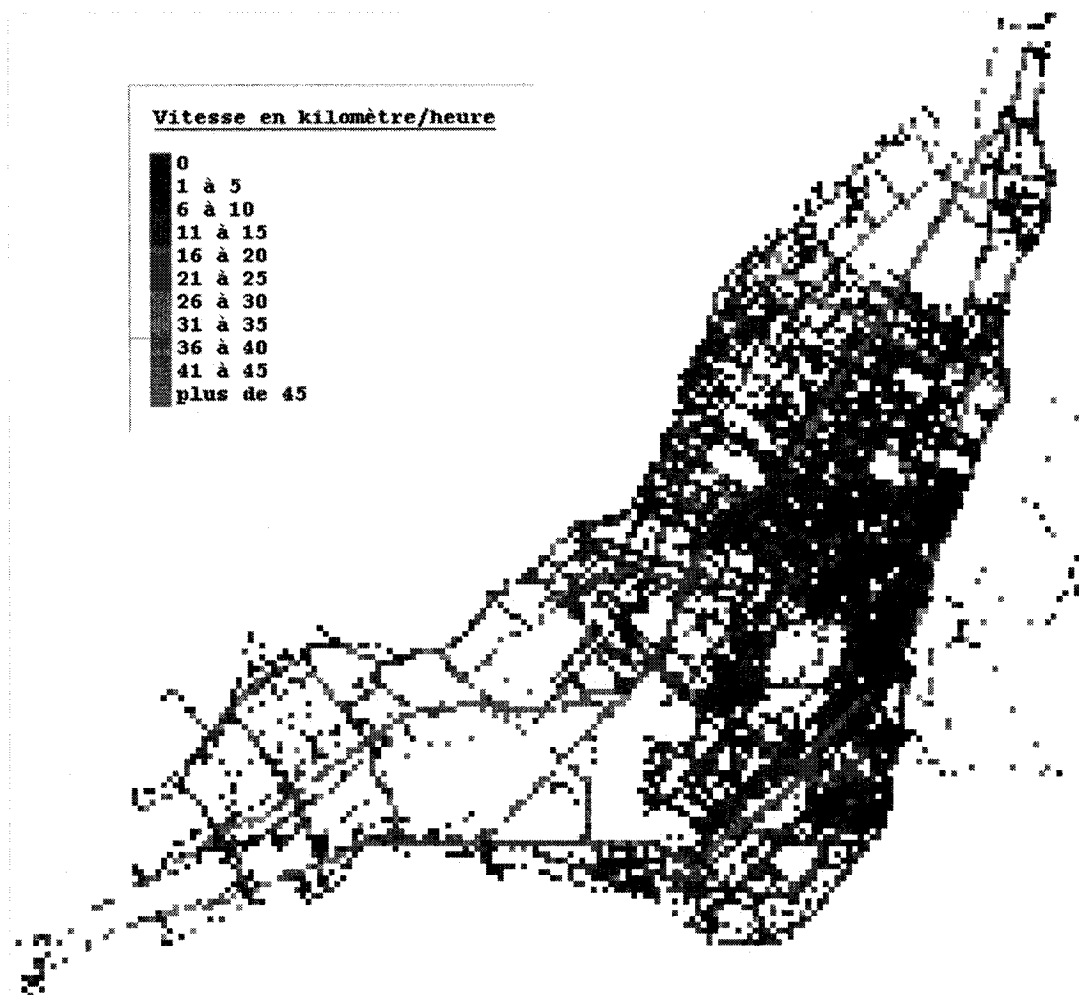


Figure 6.4: Moyenne de la vitesse instantanée observée (cellules de 200mètres x 200 mètres, vitesse en kilomètre par heure).

La localisation des cellules de la grille ayant de faibles vitesses coïncident, comme on peut s'y attendre avec les secteurs de Montréal Centre : le centre ville, le plateau du Mont-Royal, Côte-Des-Neiges. Les cellules ayant les vitesses les plus élevées décrivent le réseau supérieur de Montréal. Les grands axes du réseau de voirie (autoroute 40, autoroute ville Marie) se démarquent par des vitesses moyennes plus élevées que sur le reste du réseau, confirmant nos préjugés.

6.3 Analogie entre le TC et le TA (Tableau de marche)

La disponibilité de la trace GPS des minibus en opération pour le TA constitue une source nouvelle d'information dont l'exploitation à bon escient permettrait de raffiner les mesures traditionnelles de la mobilité. Face au manque de méthodes nouvelles accompagnant ces données, la similarité du questionnement et des problématiques entre le TA et le TC incite à l'utilisation des structures de données et des techniques d'analyse du TC pour l'organisation des données de TA.

La notion de tableau de marche utilisée en TC est ainsi étendue au service du transport adapté en définissant les arrêts chauffeur et les arrêts client planifiés comme points de contrôle. Chaque tournée est constituée d'une séquence chronologique d'arrêts planifiés pour l'embarquement ou le débarquement d'un client ou simplement pour une raison opérationnelle. Les estimateurs habituels du TC tels le profil de charge, le kilométrage mort, la vitesse moyenne, les passagers-kilomètres, les passagers-heures sont utilisés pour caractériser le service de TA. La structure de la ligne 51 de la STM est analysée dans la section qui suit, à titre d'exemple.

6.3.1 Structure d'une ligne de TC : ligne 51 de la STM

Les données utilisées dans cette section pour l'analyse de la structure de la ligne 51 de la STM, proviennent des tableaux de marche planifiées de la STM, obtenus par l'intermédiaire du groupe MADITUC.

Le corridor de la ligne 51 traverse, d'est en ouest, les 4 arrondissements suivant : le Plateau Mont-Royal, Outrement, Côte-des-Neiges, Notre-Dame-de-Grâce. Le trajet comprend les rues Saint Joseph Est, Laurier, Chemin de la Côte-Sainte-Catherine, Édouard-Montpetit, Decelles, Queen Mary, Fielding, West Broadway et dessert au passage 4 stations de métro : Laurier, Édouard-Montpetit, Université de Montréal, Snowdon ; ainsi que la gare de train de Montréal-Ouest.

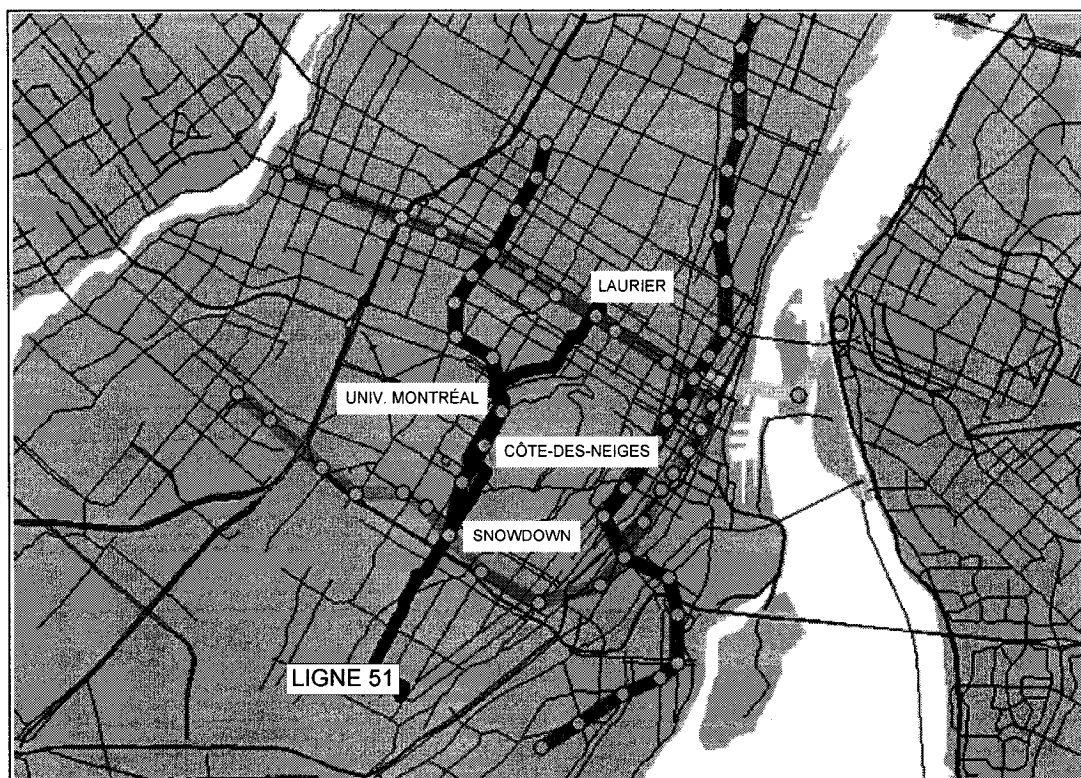


Figure 6.5 Géométrie de la ligne 51 de la STM (direction Est)

La désignation unique de chaque direction est assurée par le numéro de la ligne (51), la désignation de la trace, et le sens (Est ou Ouest). La ligne 51 est composée de 2 Ligne-Tracé-Sens :

Tableau 6.1 : Caractéristiques de la ligne 51 de la STM

LIGNE	SENS	TRACE	NB ARRÊTS	LONGUEUR
51	E	JO	52	11,9 km
51	O	JO	55	12,5 km

La géométrie de chaque Ligne-Tracé-Sens est définie par une liste spatialement ordonnée de points géolocalisés correspondant aux intersections traversées par le bus et à la localisation des arrêts. Chaque point est identifié par ses coordonnées en X et en Y ainsi que par la description de l'intersection où il est situé.

La séquence des arrêts d'une Ligne-Tracé-Sens est extraite de la liste des points géolocalisés formant la géométrie de la ligne. Chaque arrêt est identifié par un numéro unique (une clef primaire), et par ses coordonnées. La séquence de chaque arrêt est

indiquée, de même que la distance cumulée depuis l'origine de la Ligne-Tracé-Sens et la distance depuis l'arrêt précédent dans la séquence.

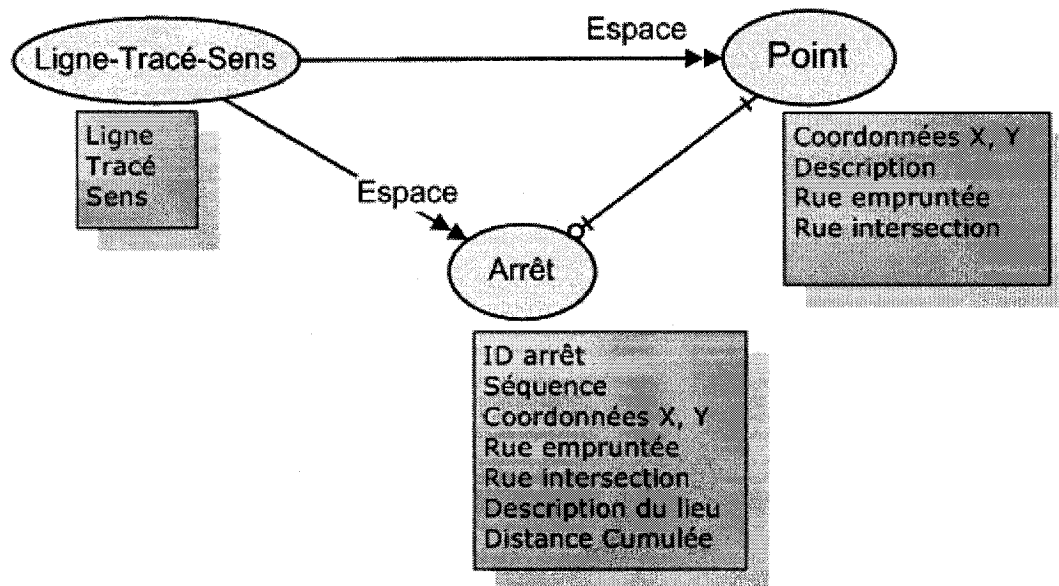


Figure 6.6 Modèle objet d'une ligne de TC

Le Tracé-Sens-Départ (TSD) est l'entité unitaire de la planification opérationnelle du service de transport en commun. Pour chaque voyage ou TSD, l'horaire de passage à chacun des points de contrôle qui jalonnent le tracé de la ligne est estimé en fonction de la distance de parcours, de l'achalandage aux arrêts intermédiaires et des conditions de circulation habituelles.

La ligne 51 de la STM est constituée de 8 points de contrôle tel qu'illustré sur la figure ci-après.

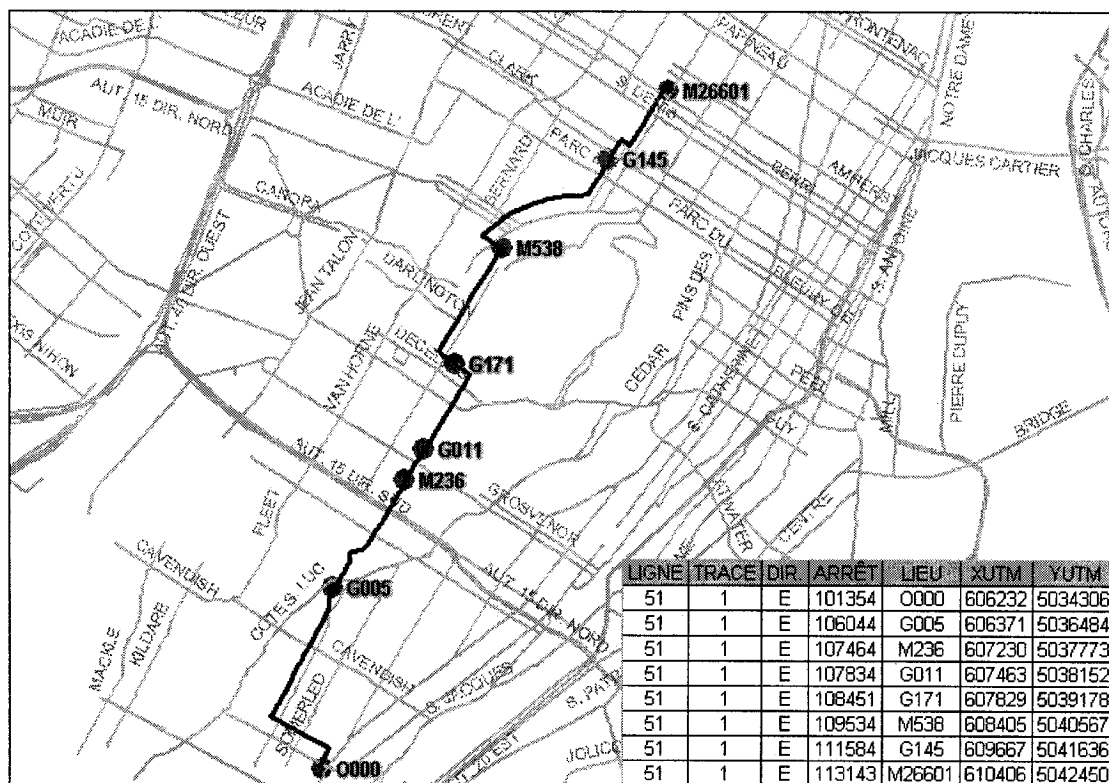


Figure 6.7 : Parcours de la ligne 51 de la STM

Les horaires de passage à chacun des points de contrôle d'une ligne, pour chaque TSD, constituent le tableau de marche.

L'exemple qui suit montre la structure de données du tableau de marche d'un TSD sur la ligne 51 de la STM. Il s'agit d'un voyage sur la ligne 51 tracé 1, direction Est, dont le départ du point d'injection O0000 est à 6h19, l'arrivée au terminus Laurier (point de contrôle M26601) est à 6h58.

Tableau 6.2 Structure de données du tableau de marche de la ligne 51-Est de la STM

LIGNE	TRACÉ	DIRECTION	VOYAGE	SEQ_GEOM	LIEU	HEURE	HRE_MIN
51	1	E	3	1	O000	619	619
51	1	E	3	2	G005	627	619
51	1	E	3	3	M236	634	619
51	1	E	3	4	G011	635	619
51	1	E	3	5	G171	641	619
51	1	E	3	6	M538	647	619
51	1	E	3	7	G145	652	619
51	1	E	3	8	M26601	658	619

La présence de 8 points de contrôles permet une segmentation en 7 tronçons de la trace du parcours de la ligne 51 direction Est. Le calcul de la vitesse de parcours de chacun des tronçons tel qu'illustré par le tableau suivant montre que la vitesse moyenne planifiée varie selon le tronçon, de 13 km sur le dernier tronçon avant le terminus à Laurier à 27 km/h l'intersection de la rue Côte-des-Neiges.

Tableau 6.3 : Exemple de calcul de la vitesse sur les segments d'une ligne de TC (ligne 51 de la STM en direction Est)

TRONÇON	LIEU1	LIEU2	HEURE1	HEURE2	DURÉE (min)	DISTANCE (m)	VITESSE (km/h)
1	O000	G005	619	627	8	2778	21
2	G005	M236	627	634	7	1626	14
3	M236	G011	634	635	1	445	27
4	G011	G171	635	641	6	1277	13
5	G171	M538	641	647	6	2255	23
6	M538	G145	647	652	5	2193	26
7	G145	M26601	652	658	6	1342	13

L'évolution spatio-temporelle du profil de vitesse pour un jour normal ouvrable est illustrée par la figure ci-dessous.

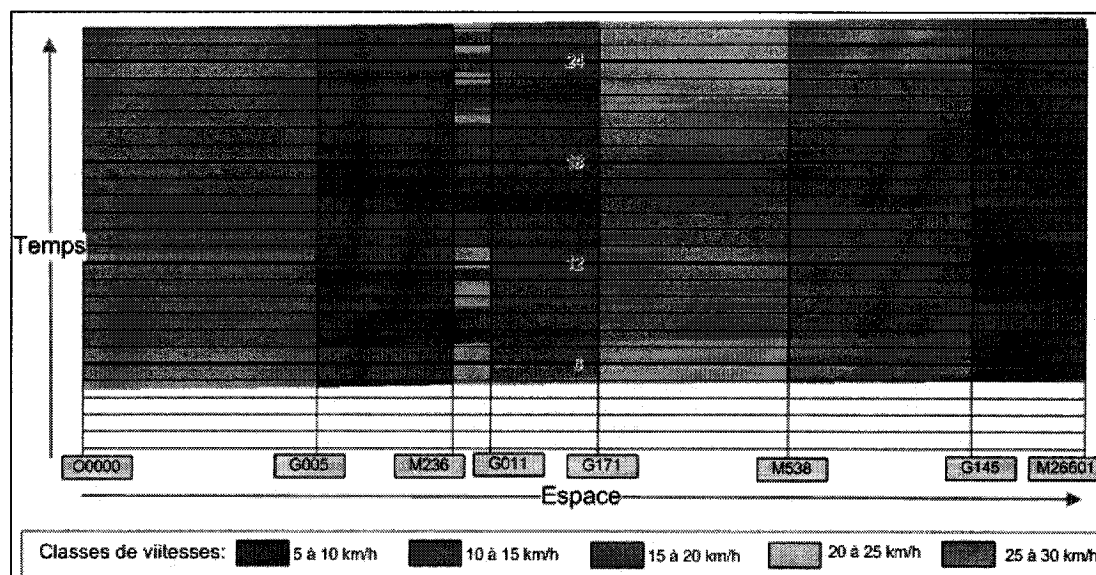


Figure 6.8 : Diagramme espace temps et profil de vitesse de la ligne 51 direction Est

Il s'agit de la visualisation du diagramme espace-temps de chaque TSD en direction Est de la ligne 51 ; la couleur indiquant les valeurs de vitesse moyenne planifiée.

6.3.2 Segmentation spatio-temporelle de la trace GPS d'un véhicule

La séquence chronologique des événements Arrêt, Démarrage, Moteur éteint, Moteur allumé, Ouverture des portes, Fermeture des portes nous instruit sur les périodes de mouvement et d'immobilisation du véhicule comme illustrées par l'exemple qui suit.

Tableau 6.4 : Extrait de la base de données des événements GPS montrant les séquences d'arrêt et de mouvement d'un véhicule

HEURE	ÉVÈNEMENT	LAT	LONG	ÉTAT DU VÉHICULE
21:42:40	Véhicule en mouvement	45.563	-73.614	
21:42:40	Porte fermée	0.000	0.000	EN MOUVEMENT
21:51:30	Véhicule Arrêté	45.550	-73.627	
21:51:32	Porte ouverte	45.550	-73.627	ARRÊT
21:54:32	Porte fermée	45.550	-73.627	
21:55:22	Véhicule en mouvement	45.549	-73.627	
21:58:27	Début d'excès de vitesse	45.554	-73.624	EN MOUVEMENT
22:07:15	Fin d'excès de vitesse	45.663	-73.513	
22:12:42	Véhicule Arrêté	45.687	-73.492	
22:12:42	Porte ouverte	45.687	-73.492	ARRÊT
22:15:28	Porte Off	45.687	-73.492	
22:15:46	Véhicule en mouvement	45.687	-73.492	
22:23:23	Début d'excès de vitesse	45.655	-73.522	EN MOUVEMENT
22:27:15	Fin d'excès de vitesse	45.605	-73.565	

Il est ainsi possible, à partir de la trace GPS, de détecter les arrêts réalisés lors de la tournée, la fréquence de ces arrêts, les temps alloués à ces arrêts (temps d'embarquement ou de débarquement). Les déplacements sur le réseau entre les différents arrêts sont caractérisés par la distance euclidienne, la distance GPS, le temps de parcours et la vitesse moyenne sur le réseau. La figure qui suit montre un exemple de l'utilisation des données des événements pour segmenter une trace GPS en période de mouvement et en périodes d'arrêt.

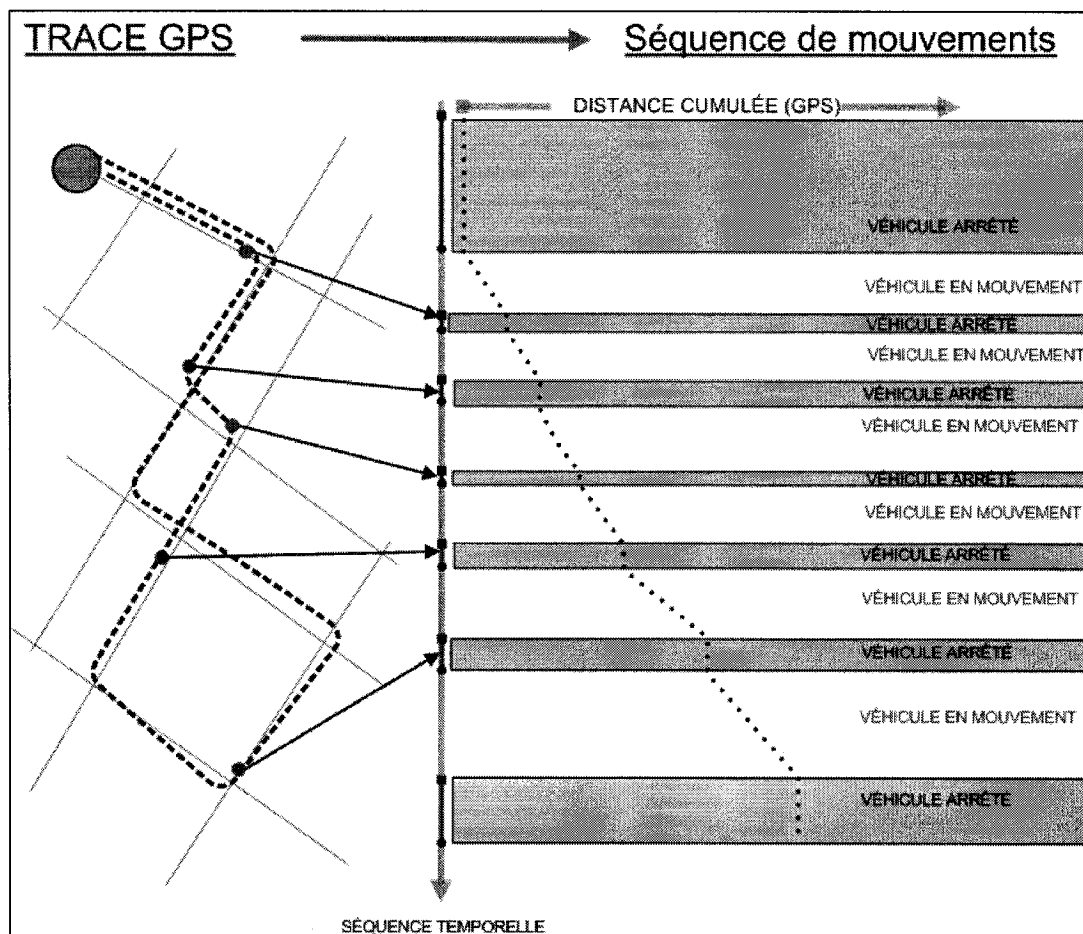


Figure 6.9 : Segmentation de la trace GPS d'une tournée en séquence d'arrêt-GPS

Tel qu'expliqué dans le chapitre 4, un arrêt du minibus est caractérisé dans les enregistrements GPS par deux événements successifs de véhicule arrêté et de véhicule en mouvement. Chaque arrêt réalisé est considéré comme un point de contrôle caractérisé par ses coordonnées, les heures d'arrivée et de départ du véhicule et par la durée de l'arrêt.

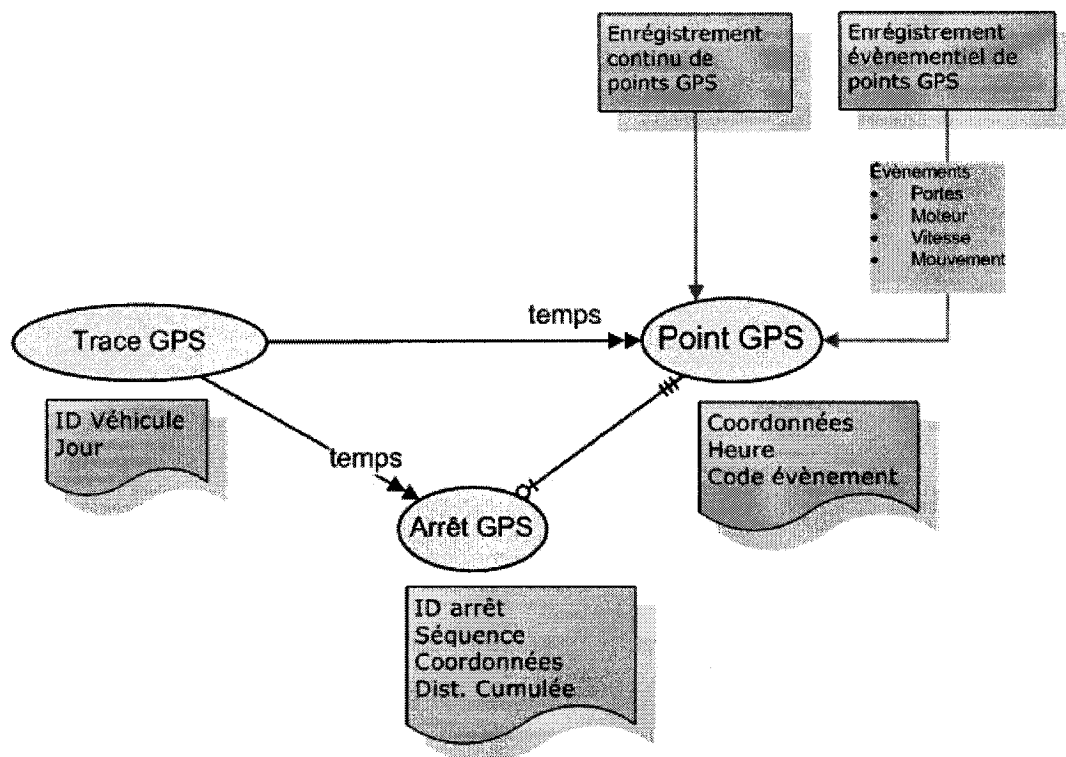


Figure 6.10 Modèle objet des entités de la trace GPS d'une tournée

Définissons comme bloc de sorties l'ensemble des sorties réalisées par un véhicule en une journée. La trace GPS de chaque bloc de sorties est traitée comme un TSD d'une ligne de transport en commun. La trace GPS est transformée en une séquence temporellement ordonnée des arrêts GPS réalisés tel qu'illustré par la figure ci-après.

Tableau 6.5 : Tableau de marche d'une trace GPS

JOUR	BLOCK_SORTIE	VEHICULE	ORDRE	DIST.EUCLID.CUMUL	DIST.GPS.CUMUL	HARRIVEE	HDEPART	DUREE	XARRIVEE	YARRIVEE	XDEPART	YDEPART
38421		43 52-325	1	0	0	-	15:05:17	-	0	0	608254	5046405
38421		43 52-325	2	32.984845	0	15:05:50	15:09:26	0:03:36	608286	5046397	608311	5046396
38421		43 52-325	3	5848.674315	6610.111179	15:20:59	15:26:08	0:05:09	604714	5041858	604806	5041839
38421		43 52-325	4	15594.75736	21971.9032	15:50:49	15:54:34	0:03:45	609585	5050225	609676	5050202
38421		43 52-325	5	16963.73054	25039.49223	16:02:47	16:12:08	0:09:21	609693	5048907	609611	5048957
38421		43 52-325	6	19770.07646	29402.34655	16:22:25	16:26:05	0:03:40	612272	5049353	612338	5049431
38421		43 52-325	7	21013.02137	32619.0581	16:33:41	16:41:19	0:07:38	613325	5050003	613363	5049917
38421		43 52-325	8	23440.16866	36425.69054	16:51:19	17:01:30	0:10:11	612589	5047716	612557	5047615
38421		43 52-325	9	27230.81716	40622.62852	17:13:15	18:04:38	0:51:23	610368	5044851	610271	5044680
38421		43 52-325	10	30097.31187	44831.20933	18:14:09	-	-	608121	5046419	0	0

Cette structure est similaire à celle du tableau de marche d'une ligne de transport en commun telle que présentée à la section précédente. Chaque arrêt GPS est caractérisé par sa localisation géographique, par l'heure d'arrivée et l'heure de départ ; ainsi que

par les évènements survenus pendant l'arrêt (ouverture des portes, arrêt du moteur) et leur durée.

Arrêt GPS	
ID du véhicule	Structure de données d'un bloc de sorties
Jour	
ID du block de sorties	
Heure de début du block de sorties	
Ordre	
Coordonnées X, Y arrivée	Caractéristiques spatio-temporelles de l'arrêt GPS
Coordonnées X, Y départ	
Heure d'arrivée	
Heure de départ	
Durée de l'ouverture des portes	
Durée d'arrêt du moteur	
Dist.GPS.Cumulée depuis l'origine de la tournée	
Distance GPS entre cet arrêt et le précédent	

Figure 6.11 Structure de données des arrêts GPS

Bien qu'elle ne conserve pas l'ensemble des données sur le parcours du véhicule, la structure de données des arrêts GPS conserve l'essentiel de la séquence de déplacements et des arrêts de la trace GPS d'un véhicule.

Les déplacements effectués entre les points d'arrêt sont caractérisés par le point d'origine, le point de destination, la distance euclidienne, la distance cumulée de la trace GPS, la vitesse moyenne et la durée du parcours. Des indicateurs comme la vitesse moyenne en déplacement, l'indice d'allongement par rapport à la distance à vol d'oiseau, la durée moyenne d'un arrêt peuvent aisément en être déduit sans devoir repasser à travers tous les enregistrements de la trace GPS.

La disponibilité d'un système d'information géographique du réseau de voirie permettrait de trouver les segments de rue empruntés et les vitesses associées. Malgré son intérêt, cette voie ne sera pas approfondie dans le cadre de ce projet de maîtrise, par manque de temps.

6.4 Fusion des données planifiées et réalisées

La validation des coïncidences spatio-temporelles entre des arrêts planifiés d'une

tournée et les périodes d'immobilisation du véhicule permet d'associer la trace GPS d'un véhicule aux différentes étapes de la tournée. La Figure 6.12 montre un exemple d'association des données de la tournée planifiée à la trace GPS de la tournée réalisée.

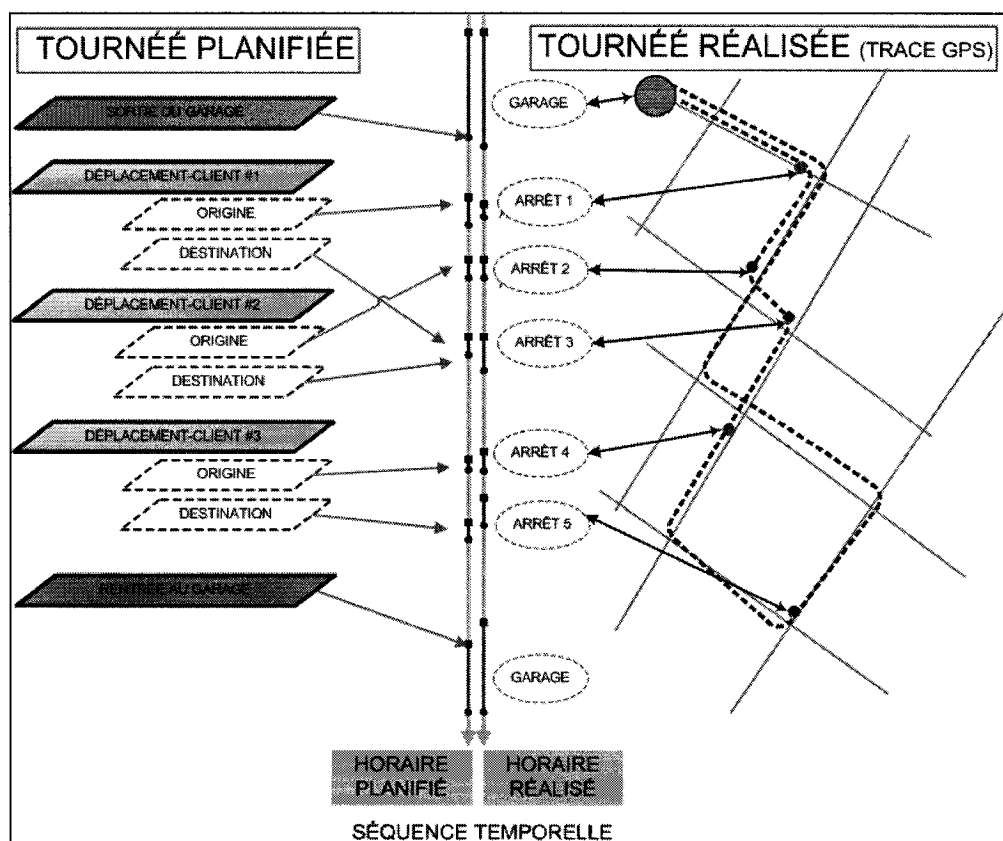


Figure 6.12 Coïncidence spatio-temporelle des arrêts planifiés et réalisés (Exemple d'une tournée desservant 3 clients en 5 arrêts)

Lors de la mise en œuvre de cette procédure pour l'association des tournées à la trace GPS, les principales difficultés rencontrées étaient l'existence de boucle dans certaines tournées et l'inversion de l'ordre des arrêts planifiés en cours de route.

6.4.1 Procédure d'association des données planifiées et réalisées

Pour chaque arrêt planifié, l'arrêt réalisé équivalent est identifié en comparant ses coordonnées et sa plage horaire à celles des arrêts GPS réalisés, déduits de la segmentation de la trace GPS, tels que présentés précédemment.

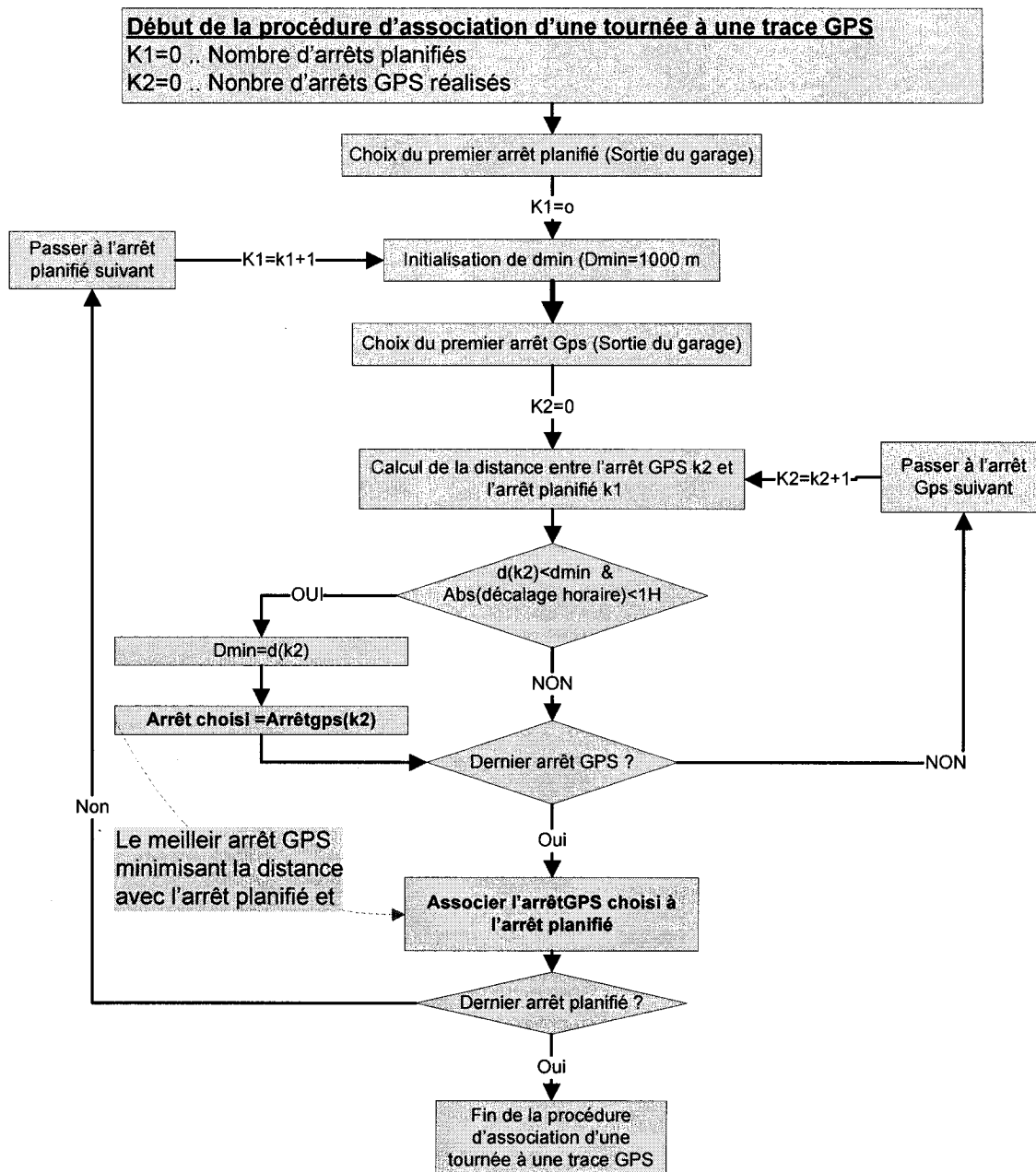


Figure 6.13 Procédure d'association des arrêts-tournées et des arrêts-GPS

Dans l'éventualité d'un retard ou d'une avance, un certain décalage entre la plage horaire planifiée et celle réalisée est admis (un décalage horaire de 1h a été jugé acceptable).

L'existence de boucles dans la séquence des arrêts planifiés entraîne parfois une fausse

détection des l'arrêts GPS équivalents. Il arrive qu'un arrêt planifié soit faussement associée à un arrêt GPS lorsque le véhicule s'arrête plusieurs fois au même endroit durant la tournée.

Dans certains cas où un client devait attendre dans le bus et subir un embarquement près de sa destination, le chauffeur a opté de le débarquer d'abord et seulement ensuite d'aller au rendez-vous pour l'embarquement du prochain client. La séquence chronologique des arrêts s'en trouve faussée ; ne permettant plus de valider l'association de l'arrêt GPS réalisé à l'arrêt planifié pour l'embarquement.

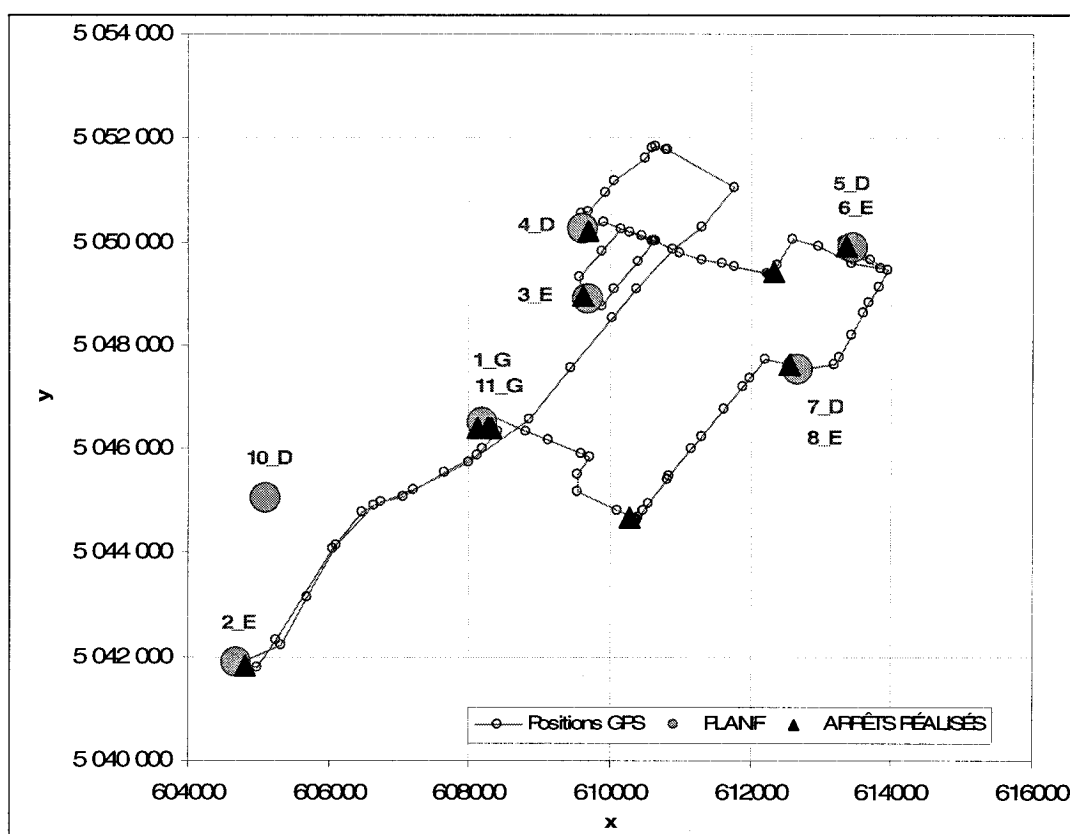


Figure 6.14 Coïncidence spatiale des arrêts planifiés, des arrêts réalisés déduits de la trace GPS. Exemple de la tournée ST11457 effectuée par le véhicule 52-325 le 10 mars 2005

La Figure 6.14 montre la coïncidence spatiale des arrêts planifiés et des arrêts réalisés, déduits de la trace GPS pour la tournée du 10 mars 2005 du véhicule 52-335. L'ordre des arrêts planifiés 3 et 4 a été modifié au cours de la réalisation du service. Alors que la

planification prévoyait l'embarquement du client 2 avant le débarquement du client 1 comme le montre l'extrait du tableau de planification (Tableau 6.6), le chauffeur a choisi de débarquer le client 1 avant d'embarquer le client 2, évitant au client 1 de subir le temps d'attente du à l'embarquement du client 2.

Tableau 6.6 : Extrait du tableau de planification de la tournée ST11457 effectuée par le véhicule 52-325 le 10 mars 2005.

TOURNEE_ID	ORDRE	MOUV	CLIENT	HRE_ARR_PL	HRE_DEP_PL	XUTM	YUTM
ST11457	1	G		15:00	15:10	0	0
ST11458	2	E	#1	15:45	15:49	604697	5041886
ST11459	3	E	#2	16:30	16:34	609692	5048898
ST11460	4	D	#1	16:40	16:44	609602	5050246
ST11461	5	D	#2	17:05	17:11	613457	5049901
ST11462	6	E	#3	17:05	17:11	613457	5049901
ST11463	7	D	#3	17:23	17:35	612668	5047524
ST11464	8	E	#4	17:23	17:35	612668	5047524
ST11465	9	T		17:59		0	0
ST11466	10	D	#4	18:05	18:09	605113	5045031
ST11467	11	G		18:35	19:00	0	0

Pour 9 des 11 arrêts planifiés qui constituent cette tournée, la procédure de détection de l'arrêt GPS équivalent a été appliquée avec succès. Les arrêts planifiés mais non détectés sont l'arrêt 9 (téléphone) et l'arrêt 10 (arrêt de débarquement du client 4).

La base de données des tournées planifiées ne contenant pas d'information sur la géolocalisation des arrêts-téléphone, il est tout à fait normal que la procédure de détection des arrêts réalisés ne puisse associer un arrêt-GPS à un arrêt-téléphone.

La trace GPS montre que le véhicule n'est même pas passé à proximité du lieu de débarquement planifié du client 4 (arrêt planifié 10). Il faut croire qu'un changement de dernière minute est survenu dans le parcours de la tournée. La trace GPS montre par ailleurs un arrêt GPS réalisé après le dernier embarquement (client 4) et avant le retour au garage (l'arrêt GPS numéro 9).

Tableau 6.7 : Détection des arrêts GPS correspondants aux arrêts planifiés de la tournée ST11457 effectuée par le véhicule 52-325 le 10 mars 2005.

JOJR	SORTIE GPS	VEH	ORDRE GPS	HARRIVEE	HDEPART	Durée ouverture portes	Durée totale	Arrêts planifiés (id Tournée_Ordre_Mouvement)
10-Mar-05	43	52-325	1	06:10:16	15:05:17	00:00	-	
10-Mar-05	43	52-325	2	15:05:50	15:09:26	00:00	03:36	ST11457_1_G;
10-Mar-05	43	52-325	3	15:20:59	15:26:08	04:03	05:09	ST11457_2_E;
10-Mar-05	43	52-325	4	15:50:49	15:54:34	02:58	03:45	ST11457_4_D;
10-Mar-05	43	52-325	5	16:02:47	16:12:08	08:49	09:21	ST11457_3_E;
10-Mar-05	43	52-325	6	16:22:25	16:26:05	00:00	03:40	
10-Mar-05	43	52-325	7	16:33:41	16:41:19	06:09	07:38	ST11457_5_D; ST11457_6_E;
10-Mar-05	43	52-325	8	16:51:19	17:01:30	08:50	10:11	ST11457_7_D; ST11457_8_E;
10-Mar-05	43	52-325	9	17:13:15	18:04:38	28:50	51:23	
10-Mar-05	43	52-325	10	18:14:09	03:54:38	00:00	-	ST11457_11_G;

L'association des arrêts planifiés aux arrêts réalisés telle qu'illustrée dans cette section rend possible la comparaison du service réalisé au service planifié, la caractérisation de la ponctualité des tournées, l'analyse des effets de l'annulation tardive et absence et la mise à jour des temps d'embarquement et de débarquement des clients.

6.4.2 Diagramme espace-temps

Plusieurs réalités spatio-temporelles coexistent lors de la réalisation d'une tournée planifiée telle que l'illustre la Figure 6.15.

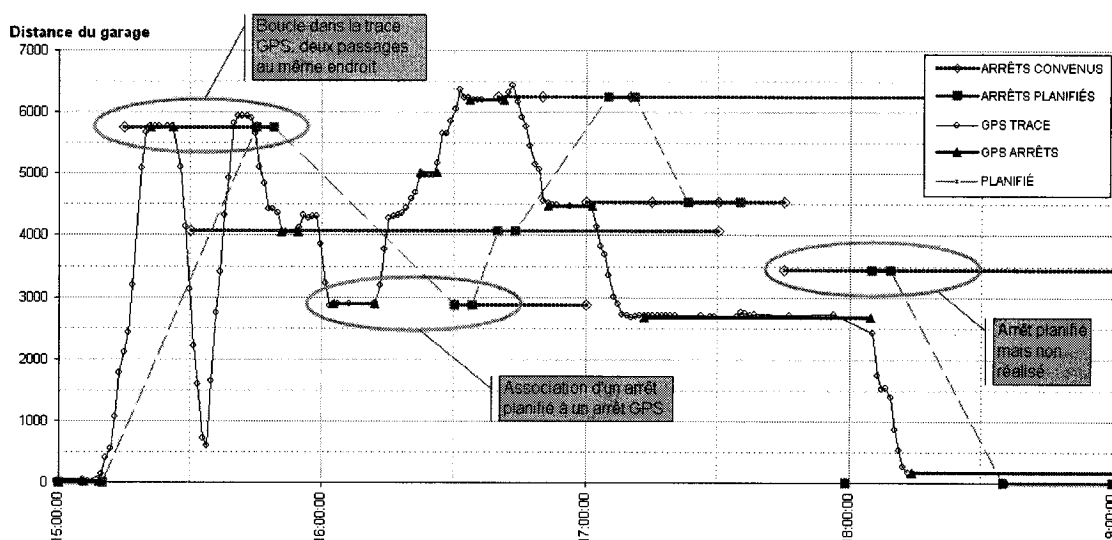


Figure 6.15: Diagramme espace temps d'une tournée du véhicule 52-325, le 10 mars 2005, de 15h à 19h. Distance en mètre.

À l'horaire planifié de chaque arrêt-tournée (heure d'arrivée, heure de départ), se juxtapose l'horaire réalisé déduit de la trace GPS, rendant possible la mesure de la ponctualité du point de vue de la planification.

Dans une perspective client, tant que l'arrivée et le départ du véhicule au point de rendez-vous se réalisent dans la plage horaire de 30 minutes convenue, le service est à l'heure. Tout comme à la section 5.5, l'horaire réalisé dérivé de la trace GPS peut être comparé à l'horaire convenu communiqué au client pour estimer la qualité du service qui lui est offert.

Dans cet exemple, il y a une avance systématique d'une trentaine de minutes des arrêts réalisés, déduits de la trace GPS, par rapport aux arrêts planifiés ; mais la tournée demeure à l'heure du point de vue du client étant donnée la grandeur des plages horaires communiquées au client.

En se référant aux sections précédentes, l'arrêt planifié mais non réalisé, indiqué à la Figure 6.15, correspond au débarquement du client numéro 4 de la tournée ST11457 du 10 mars 2005. Plusieurs hypothèses peuvent être émises sur ce qu'il est advenu de ce client ; s'il fut réellement embarqué. Dans tous les cas, la non réalisation de cet arrêt planifié est sans doute la cause de l'arrêt de plus de 50 minutes réalisé en fin de tournée, juste avant le retour au garage.

6.4.3 Mise à jour des temps d'embarquements et de débarquement

Derechef, les temps d'embarquement et de débarquement qui sont alloués à chaque client par le planificateur permettent d'estimer la durée de l'arrêt planifié et d'établir l'heure de départ planifiée, connaissant l'heure d'arrivée planifiée.

D'un autre côté, la trace GPS nous indique la durée d'ouverture des portes pour chaque arrêt GPS. La fusion des données planifiées et de la trace GPS permet de déduire les temps réels d'embarquement et de débarquement, en faisant l'hypothèse que les durées d'ouverture des portes aux arrêts correspondent aux temps d'embarquement.

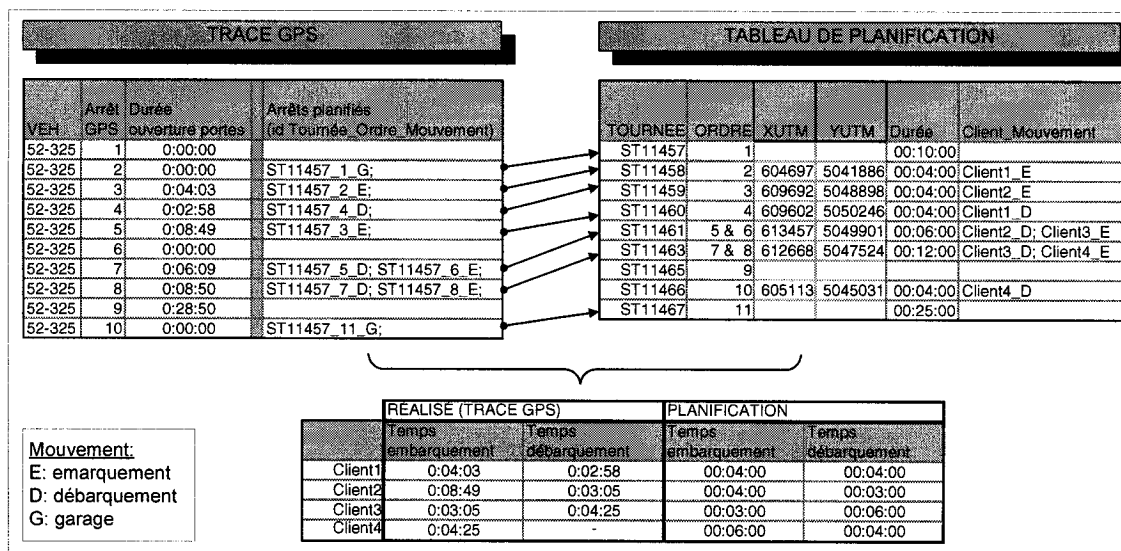


Figure 6.16 : Exemple de mise à jour des données des temps d'embarquement et de débarquements à l'aide de la trace GPS.(Tournée ST11457, véhicule 52-325, 10 mars 2005)

Dans l'exemple illustré par la Figure 6.16, la durée d'ouverture des portes est comptabilisée pour chaque arrêt planifié comme estimateur des temps réels d'embarquement ou de débarquement des 4 clients de la tournée.

Lorsque plusieurs événements surviennent au cours d'un même arrêt, la durée de chaque événement est estimée en divisant le temps total passé à cet arrêt par le nombre d'événements survenus à cet arrêt.

La mise à jour de la moyenne et de l'écart type des temps moyens d'embarquement ou de débarquement de chaque client peut se faire très simplement en implémentant l'algorithme de calcul itératif de la moyenne M et de l'écart type S pour chaque nouvelle valeur de temps t .

$$\begin{aligned}
 \blacksquare \quad M_{[N+1]} &= M_{[N]} + \left(\frac{t - M_{[N]}}{N + 1} \right) \\
 \blacksquare \quad S_{[N+1]}^2 &= \frac{(N-1) \times S_{[N]}^2 + (t - M_{[N]})(t - M_{[N+1]})}{N}
 \end{aligned}$$

6.4.4 Les annulations tardives et absences

L'observation de la trace GPS des minibus indique l'existence, presque systématique, d'un arrêt non planifié de plus de 30 minutes à chaque fois qu'il y a annulation d'un embarquement lors d'une tournée.

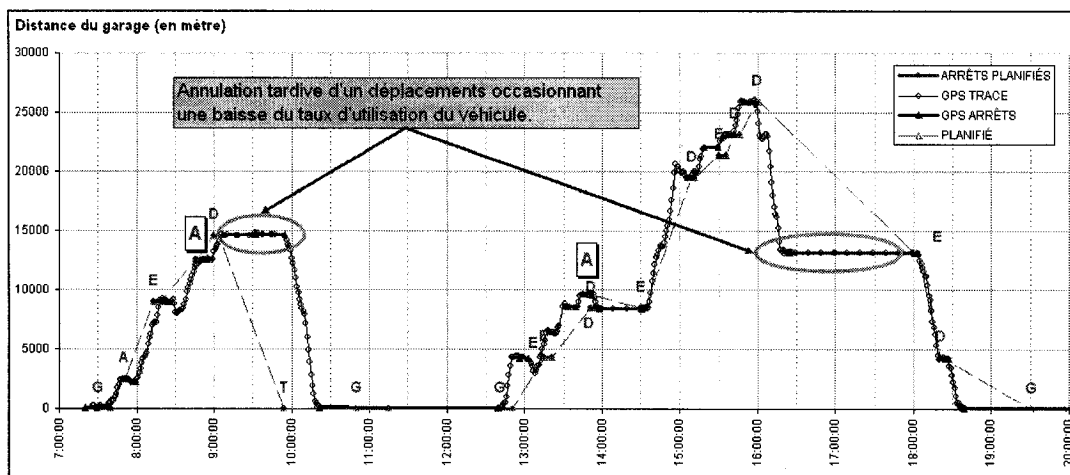


Figure 6.17: effet d'une annulation tardive d'un déplacement lors d'une tournée (véhicule 52-206, 01 mars 2005). E=embarquement, D=débarquement, A=annulation, G=garage.

Le diagramme espace-temps illustré par la Figure 6.17 montre le parcours du minibus 52-206 durant la journée du 1^{er} mars 2005. Au cours de cette journée, le véhicule est affecté à deux tournées dont la première est d'une durée de 3h45 et la seconde d'une durée de 7h30 ; pour un total de 11 heures 15 minutes de temps d'opération.

En 11 heures 15 minutes d'activité, le véhicule a subi une immobilisation de près de 50 minutes dans la première tournée et une autre immobilisation de plus de 1h30 dans la seconde tournée ; soit, en tout 2 heures 20 minutes de temps d'inactivité pour cause d'absences ou d'annulations tardives du client.

Ainsi, plus de 20% du temps d'opération du bus 52-206, le 1^{er} mars 2005, fut gaspillé pour cause d'absence ou d'annulation tardive. L'on comprend mieux la sévérité des sanctions réservées aux clients fréquemment absents.

CHAPITRE 7 CONCLUSION

Dans la perspective d'une documentation quantitative du service de transport adapté, le travail présenté dans ce mémoire a consisté à montrer le potentiel que revêt l'analyse intégrée des données de planification et des données du service réalisé, enregistrées par le GPS.

La disponibilité des données du rapport de planification a permis une caractérisation fine du service offert par la STM à sa clientèle à mobilité réduite. Les données mises à notre disposition dans la réalisation de ce mémoire portaient sur les déplacements assurés par les minibus de la STM pour les 31 jours du mois de mars 2005. 27353 déplacements sont ainsi effectués en minibus par 3833 clients dont 51% sont des femmes. Ces déplacements représentent grosso modo le tiers des déplacements des personnes handicapées assurés par la STM ; le reste étant assuré par des taxis adaptés ou non. Le service de minibus offert a consisté en 2965 tournées assurées par 109 minibus. Le nombre maximum de minibus simultanément en service était de 72 minibus ; ce qui est en concordance avec la flotte effective déclarée par la STM qui est de 85 minibus. En moyenne, chaque minibus effectue deux tournées par jour dont une de 3h45 (une pièce de travail) et une autre de 7h30 (deux pièces de travail).

La modélisation orienté-objet de l'approche totalement désagrégée s'est avérée un outil de choix pour le traitement systématique et individualisé de chacune des entités en présence que sont les clients, les déplacements, les lieux et les tournées. Les attributs opérationnels jugés pertinents sont systématiquement calculés pour chaque classe d'objets.

Chaque déplacement est caractérisé par la distance cumulée euclidienne séparant l'origine de la destination, la durée du parcours, les temps d'attente au départ et à l'arrivée. Le nombre d'arrêts intermédiaires subits par le client au cours du déplacement entre les moments d'embarquement et de débarquement est calculé pour exprimer la gêne subie par ce dernier. Le motif du déplacement est déduit à la fois du type de lieu fréquenté, de l'heure de fréquentation, du statut (travailleur, étudiant, malade ...) et de

l'âge du client.

Le statut (travailleur, étudiant, malade ...) de chaque client est déduit à la fois de ses caractéristiques sociodémographiques, du type de handicap dont il souffre, de ses lieux et de ses heures de fréquentation. La durée d'activité à chaque lieu de destination a été calculée comme le temps écoulé entre le débarquement en ce lieu et l'embarquement subséquent, du même lieu.

La nature des lieux (maison, école, lieu de travail, hôpital, autre) est dérivée du bassin d'attraction, du type d'handicap et de l'âge des clients qui les fréquentent. Le territoire est caractérisé par l'identification et la catégorisation des principaux générateurs selon les heures d'activités, la durée des activités, le type de handicap des clients qui les fréquentent.

En définitive, l'exploitation à bon escient des rapports de planification des tournées du transport adapté permet de dresser un profil fidèle de la demande et de l'offre planifiée pour y répondre. La réalisation du service demeure, cependant, un point obscur puisque les données de planification ne relatent pas toujours la façon dont le service s'est déroulé. C'est dans cette optique que la seconde partie de ce mémoire a consisté à explorer la possibilité de détecter et de caractériser les arrêts réalisés à l'aide de la trace GPS.

En s'inspirant de la structure de données du tableau de marche du TC, la trace de chaque minibus de TA fut transformée en une séquence temporellement ordonnée d'arrêts GPS. Lorsque couplés aux données de la planification des tournées, les arrêts réalisés, déduits de la trace GPS, permettent de scruter, dans les moindres détails, l'offre réelle de transport. La fusion des données réalisées et des données planifiées a permis la mise à jour des caractéristiques de mobilité des clients.

La trace GPS rend possible une meilleure estimation des indicateurs de performance tels le kilométrage mort, la distance totale parcourue, le nombre de passagers-kilomètres. L'analyse des absences et annulations tardives indique la présence presque systématique d'une immobilisation de plus de 30 minutes du véhicule après chaque absence. Cette

baisse de performance est sûrement due au fait que le véhicule n'a plus à desservir le lieu de débarquement dont l'embarquement associé n'a pas été réalisé.

Mis à part la documentation de l'offre de transport et la mise à jour des caractéristiques réelles de mobilité de la clientèle, la disponibilité de la trace GPS de certains véhicules ouvre de nouvelles perspectives en ce qui concerne la définition et la caractérisation de la congestion. Au vu de l'expérimentation menée, qui a consisté à calculer la vitesse moyenne par unité de surface, la caractérisation spatio-temporelle du niveau de vitesse est un sujet digne d'intérêt. Sous réserve de disposer d'un réseau de voiries convenablement codifié, l'association de chaque point GPS à un segment de rue par des méthodes de Map Matching permettrait de dresser le profil de vitesse pratiqué sur chaque segment de voirie à tout moment de la journée.

BIBLIOGRAPHIE

- AXHAUSEN, K.W., SCHNFELDER, S., WOLF, J., OLIVEIRA, M., & SAMAGA, U. (2004). Eighty weeks of GPS traces : Approaches to enriching trip information. Transportation Research Record, 1870, 46 -54.
- BUSSIÈRES, Y., & THOUÉZ, J.P., BERNARD, A. (1998). Enquête québécoise sur les limitations d'activité. Chapitre 4. 21 pages.
- BUSSIÈRES, Y., THOUÉZ, J.P., BERNARD, A. (1998). Enquête québécoise sur les limitations d'activité. Chapitre 9. 23 pages.
- CENTER FOR SYSTEMS AND PROGRAM DEVELOPMENT, INC. (1989). Best Practices in Specialized and Human Services Transportation Coordination. U.S. Department of Health and Human Services, DOT-T-89-20. Washington, DC.
- CHAPLEAU, R. (2004). Visual-is-action analytique du transport urbain. 39e Congrès annuel de l'association québécoise du transport et des routes. Québec.
- CHAPLEAU, R., MORENCY, C. (2002). Pour une confusion interrompue à propos des déplacements urbains. 37e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes. Québec. 18 pages.
- CHAPLEAU, R., ALLARD, B., TRÉPANIÉ, M. (1996). Caractérisation objective du transport adapté à la Société de transport de la Communauté urbaine de Montréal, Rapport final. Groupe MADITUC et Société de transport de la Communauté urbaine de Montréal. Montréal. 66 pages.
- DAGANZO, C. F. (1978). An Approximate Analytical Model for Many-to-Many Demand Responsive Transportation Systems. Transportation Research, 12, 325-333.
- DAGANZO, C. F. (1984). Checkpoint Dial-A-Ride Systems. Transportation Research, 18B(415), 315-327.
- DIRECTION GÉNÉRALE DES POLITIQUES ET DE LA SÉCURITÉ EN

- TRANSPORT. (1998). Politique d'admissibilité au transport adapté. Édition révisée de 1998. ISBN 2-550-27272-2.
- DOMENCICH, T., MCFADDEN, D. L. (1976). Urban Travel Demand: A Behavioural Analysis. North-Holland Publishing Co. 1975. Reprinted 1996.
- FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION. (2005). Best Practices for Using Geographic Data in Transit: A Location Referencing Guidebook. Defining Geographic Locations of Bus Stops, Routes and other Map Data for ITS. GIS and Operational Efficiencies. Report Number: FTA-NJ-26-7044-2003.1
- FHWA. (1967). Guidelines for Trip Generation Analysis. Urban Planning Division, Federal-Highway Administration, U.S. Department of Transportation. June 1967.
- FOUGEYROLLAS, P., CLOUTIER, R., BERGERON, H., COTE, J. ST-MICHEL G. (1998). Classification québécoise : processus de production du handicap. Québec, RIPPH/SCCIDIH.
- FU, L. (2002a). "A Simulation Model for Evaluating Advanced Dial-A-Ride Paratransit Systems". Transportation Research, Part A, 36, 291-307.
- FU, L. (2002b). "Planning and Design of Flexible Transit Services", Transportation Research Record, 1791, 59-66.
- FU, L. (2002c). "Scheduling Dial-A-Ride Paratransit under Time-varying, Stochastic Congestion". Transportation Research, Part A, 36(6), 485-506.
- FU, L. (2002d). "Simulation Model for Evaluating Advanced Dial-A-Ride Paratransit Systems". Transportation Research, Part A, 36(4), 291-307.
- FU, L. (2002e). "Simulation Model for Evaluating Intelligent Paratransit Systems", Transportation Research Record, 1760, 93-99.
- FU, L. (2004). Analytical model for Paratransit Capacity and Quality of Service analysis. Transportation Research Record, 1841, 81-89.
- FU, L., XU, Y. (2002). "Potential Effects of Automatic Vehicle Location and

- Computer-Aided Dispatch Technology on Paratransit Performance : A Simulation Study", Transportation Research Record, 1760, 107-113.
- GRATTON, G., DESCHAINTE, J.-P. (1981). Le transport et les handicapés. Commission scolaire de la ville de Laval. 6 pages.
- INSERM. (1988). Classification internationale des handicaps : déficiences, incapacités et désavantages. Paris, CTNERHI-INSERM, 203 pages.
- KIHL, M. (1993). Advanced Vehicle Location System Paratransit for in Iowa. IEE Vehicle Navigation and Information Systems Conference. Ottawa – VNIS
- KWAN, M. (2000). Interactive geovisualization of activity-travel patterns using three-dimensional Geographical information systems: a methodological exploration with a large data set. Transportation Research, Part C, volume 8.
- LEVINE, N. (2004). CrimeStat: A Spatial Statistics Program for the Analysis of Crime Incident Locations (v 3.0) [Logiciel]. Ned Levine & Associates, Houston, TX, and the National Institute of Justice, Washington, DC. May.
- MATHIAS, R., LAVE, R. (2000). State of the Art of Paratransit. Transportation in the New Millennium[Cdrom]. Transportation Research Board, Washington D.C., 7 pages.
- MORENCY C. (2003). Contribution à la modélisation totalement désagrégée des interactions entre mobilité urbaine et dynamiques spatiales. Thèse de doctorat. École polytechnique de Montréal. Université de Montréal.
- MORENCY, C., CHAPLEAU, R. (2004). De petits points lourds de connaissance : essais méthodologiques sur les données spatiales urbaines. 39e Congrès annuel de l'association québécoise du transport et des routes[Cdrom]. Québec.
- NATIONAL GEOSPATIAL-INTELLIGENCE AGENCY (NGA). (2005). [logiciel] GEOTRANS V2.2.6. Us Army Topographic Engineerieng Center, Geospatial Information Division.

- OFFICE DES PERSONNES HANDICAPÉES DU QUÉBEC. (1984). À part... égale. L'intégration sociale des personnes handicapées : un défi pour tous. Ministère des Communications, Direction générale des publications gouvernementales. Québec. 350 pages.
- OFFICE DES PERSONNES HANDICAPEES DU QUÉBEC. (2006). [site web] Consulté le 25 mars 2006, source : <http://www.ophq.gouv.qc.ca>.
- ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTE, INSTITUT NATIONAL DE LA SANTE ET DE LA RECHERCHE MEDICALE. (1993). Classification internationale des handicaps: déficiences, incapacités et désavantages. CTNERHI, Vanves, France, 203 pages.
- ORTÚZAR, JUAN DE DIOS, WILLUMSEN, L. G. (2001). Modelling Transport. Troisième édition. Toronto : Wiley.
- PAGANO, A., METAXATOS, P., MARC, K. (2003). Effect of computer-Assisted Scheduling and dispatching Systems on Paratransit Service Quality. Transportation Research Record, 1791. Transportation Research Board. National Research Council. Washington, D.C.
- QUIROGA, C. (1997). An Integrated GPS-GIS Methodology for Performing Travel Time Studies. Thèse de doctorat, Louisiana State University, Louisiane, USA.
- RIENDEAU, D. (2004). Traitement des données GPS et de comptage en transport en commun. Mémoire M.Sc.A., École Polytechnique de Montréal, Université de Montréal, Québec, Canada.
- ROUX, B. (2001). Exploration du transport adapté à Montréal en vue d'une planification en temps réel. Mémoire M.Sc.A., École Polytechnique de Montréal, Université de Montréal, Québec, Canada.
- SARAMIENTO, R. (2004). Utilisation des technologies informationnelles dans l'analyse du transport adapté. Mémoire de maîtrise. Département de génie civil, géologique et des mines. École polytechnique de Montréal, Université de Montréal,

Québec, Canada.

SILVERMAN, B.W. (1952). Density estimation for statistics and data analysis. 1986, Londres: Chapman and Hall.

SWEDISH NATIONAL ROAD ADMINISTRATION. (2002). Projet ISA : Intelligent speed adaptation. [en ligne] <http://www.isa.vv.se/index.en.htm>

TOBLER, W. (1970). A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. [en ligne] Departement of geography. University of California. <http://www.geog.ucsb.edu/~tobler/publications>. Santa Barbara. 8 pages.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. (2004). Operational Experiences with Flexible Transit Service. TRCP Synthesis, 53. National Research Council. Washington, D.C.

TRÉPANIÉ M. (1999). Modélisation totalement désagrégée et orienté-objet appliquée aux transport urbains. Thèse de doctorat. École polytechnique de Montréal. Université de Montréal. 229 pages.

TRÉPANIÉ, M., CHAPLEAU, R., ALLARD, B. (2005). Can Trip Planner Log Files Analysis Help in Transit Service Planning? Journal of Public Transportation, Vol. 8, No. 2, 2005.

VUCHIC R. V. (1978). Urban Public Transportation Systems and Technology. Prentice-Hall; 673 pages.

WALLACE R. (1997). Paratransit Customer. Modeling Elements of Satisfaction with Service. Transportation Research Record, 1571. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

WEI-HUA, L, VIJAYBALAJI, P. (2003). Simple Procedure for creating Digitized Bus Route Information for Intelligent Transportation System Applications. Transportation Research Record, 1791. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

- WEI-HUA, L., JIAN, Z. (1999). Experimental Study of Real-Time Bus Arrival Time Prediction with GPS Data. Transportation Research Record 1666. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- WOLF J., OLIVEIRA, M., THOMPSON, M. (2003). The Impact of Trip Underreporting on VMT and Travel Time Estimates: Preliminary Findings from the California State wide Household Travel Survey GPS Study. Transportation Research Board 82nd Annual Meeting. Atlanta, Georgia.
- WOLF, J., GUENSLER, R., BACHMAN, W. (2001). Elimination of Travel Diary, Experiment to Derive Trip Purpose from Global Positionning System Travel Data. Transportation research record, 1768. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. 8 pages.