

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

PROBLÉMATIQUE DE LA MODÉLISATION DES DÉPLACEMENTS DANS
LA VILLE INTÉRIEURE DE MONTRÉAL

DANIEL PICHÉ

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

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)
AOÛT 2005



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: 978-0-494-16832-5

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-16832-5

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:

PROBLÉMATIQUE DE LA MODÉLISATION DES DÉPLACEMENTS DANS
LA VILLE INTÉRIEURE DE MONTRÉAL

présenté par: PICHÉ Daniel

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

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

Mme MORENCY Catherine, Ph.D., présidente

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

M. KARSTEN BAASS, Ph.D., membre

Remerciements

L'auteur désire remercier le professeur Robert Chapleau pour son soutien et ses pistes de réflexion au cours de la réalisation de ce projet de recherche. Toujours disponible et prônant la discussion, la créativité et le questionnement, il a permis à l'auteur de développer de nouvelles compétences.

Mentionnons également la contribution grandement appréciée de tous les membres du Groupe MADITUC, plus précisément de Catherine Morency et Bruno Allard qui ont enrichi ce projet par leur expertise. L'auteur souligne l'appui des différentes institutions de transport dans la Grande Région de Montréal, donnant un accès privilégié aux données de l'enquête Origine-Destination par les ententes de recherche et développement avec le Groupe MADITUC. En outre, l'auteur tient à remercier l'Observatoire de la Ville Intérieure de l'Institut d'Urbanisme de l'Université de Montréal pour son intérêt dans le développement des méthodes analytiques de planification du transport urbain.

De plus, la réalisation de ce projet a été permise grâce au support financier des Fonds de recherche sur la nature et les technologies ainsi que du Ministère des Transports du Québec.

L'auteur tient à souligner le soutien inconditionnel de sa famille et ses amis, par leurs encouragements lors de ce périple.

Finalement, l'auteur remercie de tout coeur sa conjointe, Amélie Racette, pour son support constant, son écoute sincère, son dévouement et sa patience. L'auteur souligne l'importance de sa présence à ses côtés qui lui a permis d'affronter des épreuves personnelles et qui promet de belles réalisations communes.

Résumé

Depuis quelques années, différentes applications sur le Web permettent aux internautes d'accéder à de l'information géographique. Ces applications soutiennent les usagers dans la planification de leurs déplacements et dans la cognition des systèmes de transport, soit par la visualisation de cartes ou par un complément d'information à une requête descriptive. Dans le contexte montréalais, les sociétés de transport assistent les usagers, par le biais de systèmes d'information aux usagers sur plate-forme Web (SIUW), qui intègrent des calculateurs de trajets. Ces derniers reposent sur une connaissance détaillée de la géométrie et chronomatique des différents réseaux de transport: routiers, transports en commun et trottoirs. Ainsi, l'utilisateur accède à une information précise qui l'accompagne dans son choix d'itinéraire selon les déclarations spatiales (origine, destination), temporelles (heure de départ, heure d'arrivée) et personnelles (minimisation de la marche, utilisation du métro) effectuées. Bref, l'utilisateur du transport collectif est guidé objectivement et pratiquement dans la totalité de son cheminement. Par contre, l'utilisateur qui accède au centre-ville de Montréal par une infrastructure de transport souterraine est laissé à lui-même, puisque le réseau piétonnier de la ville intérieure reste un chaînon manquant dans les techniques actuelles de calcul de chemins.

La modélisation des déplacements piétonniers, dans ce réseau souterrain, reste un défi méthodologique par ses multiples caractéristiques discriminantes: tridimensionnalité inhérente, juridiction privée et multiple ainsi qu'absence d'une toponymie des voies de circulation. L'intégration du réseau piétonnier de la ville intérieure aux méthodes actuelles de calcul de chemins implique un niveau de détail plus fin et exige une conceptualisation structurée des déplacements au centre-ville. Ainsi, le présent projet s'intéresse à la modélisation analytique et tridimensionnelle, du réseau piétonnier protégé, en exposant la méthodologie de géocodification. Pour effectuer cette schématisation, un recensement in situ a permis le dénombrement et le positionnement

des différentes infrastructures urbaines (corridors piétonniers, escaliers fixes, escaliers mobiles, ascenseurs, portes intérieures et portes extérieures) qui définissent ce réseau souterrain. Comme ce projet s'inscrit dans l'approche de modélisation totalement désagrégée, une analyse fondée sur les données de l'enquête Origine-Destination de 1998 permet de «visualiser» le potentiel de celles-ci pour l'étude de la mobilité piétonne dans la ville intérieure. Brièvement, ces analyses permettent la caractérisation spatio-temporelle de la dynamique des activités au centre-ville et des générateurs de déplacements.

Pour réaliser ce projet de recherche, différentes technologies informationnelles ont été employées : systèmes d'information géographique, logiciels de dessin assisté par ordinateur, réalité virtuelle, tableur pour la gestion des bases de données et la création d'un visualisateur sur les générateurs de déplacements ainsi que logiciels pour l'analyse spatiale des données géoréférencées.

Abstract

In the last few years, various applications on the Web allow users to access geographic information. These applications support the users in their trip planning and the cognition of transport system by the visualization of maps or further information to support a descriptive request. In the case of Montréal, transit authorities assist their users by means of Web user information systems (WUIS), which integrate path calculators. These calculators rest on a detailed knowledge of all network geometry: roads, public transport and sidewalks. Thus, the user obtains precise information which assists him in his choice of itinerary, according to spatial (origin, destination), temporal (time of departure or arrival) and personal (minimization of walk, use of the subway) inputs carried out. In brief, the public transport user is guided objectively in the near totality of his trip. However, the user who enters the Central Business District (CBD) of Montreal by an underground transport infrastructure is left with himself, since the pedestrian network of the underground city remains a missing link in the current path calculators.

Modeling pedestrian trips in this underground network remains a methodological challenge due to its multiple and discriminating characteristics: inherent three dimensionality, private and multiple jurisdictions as well as the absence of the pedestrian corridor toponymy. Pedestrian network integration into the current path calculation methods implies a finer level of details and requires a structured conceptualization of itinerary to the downtown area. Thus, this project focuses on the analytical and three-dimensional modeling of the protected pedestrian network, by presenting the geocoding methodology. To carry out this schematization, an «*in situ*» census allowed the enumeration and the positioning of the various urban infrastructures (pedestrian corridors, stairs, escalators, elevators, internal doors and outer doors) which characterize this underground network.

Since this project supports the totally disaggregated modeling approach, an analysis based on the 1998 household survey data allows to "visualize" the potential for the study of pedestrian mobility in the underground city. Briefly, these analysis allow the characterization of people activities dynamics in the CBD, trip attractors, as well as the estimation of pedestrian flows coming from underground transit systems.

To carry out this research project, various informational technologies were employed: geographic information systems, computer-assisted drafting, database management systems, visual and interactive display on trip generators, geospatial analysis software as well as virtual reality.

Table des matières

REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVII
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte : ville intérieure de Montréal	2
1.2 Objectifs et esquisse méthodologique	4
1.3 Contenu	5
CHAPITRE 2 : FONDEMENTS ACTUELS.....	8
2.1 Approche agrégée.....	9
2.1.1 Critique de l'approche agrégée	12
2.1.2 Étude des déplacements piétonniers.....	13
2.2 Approche désagrégée	17
2.2.1 Modélisation des choix d'itinéraire des piétons.....	19
2.3 Approche totalement désagrégée	21
2.3.1 Enquête Origine-Destination.....	23
2.3.2 Approche orientée-objet transport.....	25
2.3.3 Analyse des déplacements piétonniers.....	26
CHAPITRE 3 :DONNÉES ET INSTRUMENTS:CONTEXTE MONTRÉALAIS.28	
3.1 MADITUC et la caractérisation du système de transport urbain.....	28
3.1.1 Caractérisation du territoire.....	28

3.1.2	Caractérisation des réseaux	30
3.1.3	Caractérisation de la demande	33
3.2	Les systèmes informationnels montréalais	40
3.2.1	Systèmes d'information sur la demande	44
3.2.2	Systèmes d'information aux usagers.....	47
3.2.3	Systèmes d'information géographique transport	51
3.2.4	Systèmes d'information opérationnels	53

CHAPITRE 4 : MODÉLISATION DU RÉSEAU PIÉTONNIER PROTÉGÉ...54

4.1	Réseaux: modélisation et SIG-T	55
4.1.1	Schématisation mathématique.....	55
4.1.2	Utilités	56
4.1.3	Structuration des données	58
4.1.4	Niveau de résolution	64
4.2	Problématique de la ville intérieure	68
4.2.1	Juridiction.....	68
4.2.2	Tridimensionnalité	69
4.2.3	Usager : piéton	70
4.2.4	Références spatiales et structurelles.....	71
4.2.5	Configuration et mobilier urbain.....	72
4.3	Raffinement de l'accès au centre-ville.....	73
4.4	Établissement de la géomatique filamenteuse.....	76
4.4.1	Choix du système de coordonnées	77
4.4.2	Identification de la zone d'étude	77
4.4.3	Numérisation des données de référence et recensement	77
4.4.4	Codification tridimensionnelle du réseau analytique	79
4.4.5	Ajout d'attributs pour le calcul de chemin : vers une affectation des déplacements piétonniers	85
4.5	Représentation en réalité virtuelle.....	93
4.5.1	VRML	93

4.5.2	Visualisation du réseau et animation de cheminements.....	95
CHAPITRE 5 : GÉOCODAGE ET GÉNÉRATEURS DU CENTRE-VILLE .100		
5.1	La génération de déplacements	101
5.1.1	Approche agrégée.....	101
5.1.2	Approche totalement désagrégée	103
5.2	Géocodage des extrémités de déplacement.....	104
5.3	Validation des générateurs au centre-ville	110
5.3.1	REEM.....	111
5.3.2	Validation tripartite (REEM - Générateurs - Adresses civiques)	112
5.3.3	Comparaison matricielle	116
5.4	Instrument de visualisation des générateurs de la ville intérieure.....	120
CHAPITRE 6 : ANALYSE TOTALEMENT DÉSAGRÉGÉE DE LA MOBILITÉ AU CENTRE-VILLE.....124		
6.1	Analyse spatio-temporelle de la dynamique au centre-ville	124
6.1.1	Méthode des noyaux	127
6.1.2	Animation du centre-ville	128
6.2	Accès à la ville intérieure.....	133
6.3	Étude comparative des générateurs de déplacements	137
6.3.1	Socio démographie de la clientèle.....	138
6.3.2	Spatialisation de la clientèle.....	140
6.3.3	Distribution temporelle	143
CHAPITRE 7 : CONCLUSION.....144		
7.1	Abrégé des thématiques et contributions	144
7.2	Réflexions et perspectives.....	146
7.3	Conclusion générale	147
RÉFÉRENCES 149		

Liste des tableaux

Tableau 3.1: Classes de rue du réseau de voirie montréalais (Trépanier, 1999).....	32
Tableau 4.1: Vitesse de marche moyennes en écoulement libre sur le plan horizontal	87
Tableau 4.2: Vitesses de déplacement sur différentes infrastructures urbaines (<i>I</i>)	88
Tableau 4.3: Extrait d'une conceptualisation de trajectoires en base de données	98
Tableau 5.1: Exemple d'analyse catégorielle - taux de production de déplacements (adapté de Meyer et Miller 1984).....	101
Tableau 5.2: Dictionnaires des géoréférences pour le géocodage des extrémités de déplacement – Enquête OD 1998 (Groupe MADITUC, 1999)	106
Tableau 5.3: Répartition des types de déclarations et du géocodage associé - Enquête OD98	108
Tableau 5.4: Les 15 générateurs de déplacements du centre-ville les plus déclarés - Enquête OD 98	109
Tableau 5.5: Les 10 intersections de rues du centre-ville les plus déclarées - Enquête OD 98	109
Tableau 5.6: Extrait et documentation de la base de données du REEM 2000	111
Tableau 6.1: Décomposition des usagers selon le noeud de transport collectif d'entrée et le choix du mode pour accéder à la destination.	135

Liste des figures

Figure 1.1: Réseau piétonnier et noeuds de transport de la ville intérieure de Montréal...	3
Figure 1.2: Structure générale du document et thèmes abordés.....	7
Figure 2.1: Étapes de la procédure séquentielle classique	11
Figure 2.2 : Processus séquentiel de l'approche désagrégée et des choix effectués par l'individu qui se déplace (selon Domenchich et McFadden, 1975).....	18
Figure 2.3: Itinéraire totalement désagrégé.....	22
Figure 2.4: Variables de l'enquête Origine-Destination	24
Figure 2.5: Modèle objets de l'enquête Origine-Destination (Trépanier, 2001).....	26
Figure 2.6: Arbres d'accessibilité des stations de métro (Chapleau, 1994).....	27
Figure 3.1: Procédure de modélisation de la demande	37
Figure 3.2: Visualisation 3D du chargement des déplacements automobile sur le réseau (Chapleau, 2003).....	38
Figure 3.3: Extraction et analyse de la demande par entités spatiales du système de transport.....	40
Figure 3.4: Intégration cohérente et subtile des systèmes d'information (Chapleau et al. 2000).....	43
Figure 3.5: Instrumentation de l'enquête ménage et espaces cognitifs.....	46
Figure 3.6: Fenêtres du système d'information aux usagers Tous Azimuts (réalisée à partir de www.stm.info)	51
Figure 3.7: Fonctionnalités et concepts d'un système d'information géographique (inspiré de Thériault, 1996).....	53
Figure 4.1: Représentation d'un réseau de transport en graphe	56
Figure 4.2: Bases de données relationnelles d'un réseau (inspirée de Rodrigue et al. 2004)	59
Figure 4.3: Représentation d'un réseau planaire versus un réseau non planaire (d'après Goodchild, 1998)	60
Figure 4.4: Modélisation des restrictions de virage aux intersections	61

Figure 4.5: Localisation d'évènements par référence linéaire sur un réseau (inspirée de Goodchild, 1998).....	62
Figure 4.6: Géolocalisation par adresse civique	63
Figure 4.7: Cadre conceptuel du niveau de résolution (adaptée de Han et al. 2003).....	65
Figure 4.8: Schématisation d'une intersection en transport en commun (inspirée de Chapleau, 1974)	67
Figure 4.9: Schématisation orientée-objet de l'accès au centre-ville et à la ville intérieure	74
Figure 4.10: Désagrégation des noeuds d'accès et de destination	75
Figure 4.11: Sources de données et processus vers la codification 3D du réseau piétonnier.....	79
Figure 4.12: Les différents niveaux de la ville intérieure	80
Figure 4.13: Exemple d'une schématisation en noeuds et liens.....	81
Figure 4.14: Schématisation de la circulation à l'intérieur d'une esplanade	82
Figure 4.15: Assemblage tridimensionnel des différents étages du réseau par la représentation des déplacements verticaux	83
Figure 4.16: Structure des données relationnelles suite à la codification du réseau piétonnier.....	84
Figure 4.17: Environnement de codification tridimensionnelle du réseau piétonnier	84
Figure 4.18: Visualisation d'un extrait du réseau filamenteux tridimensionnel	85
Figure 4.19: Facteurs influant sur le choix d'itinéraire	90
Figure 4.20 : Fenêtre de visualisation d'une scène 3D en VRML dans Cortona.....	95
Figure 4.21: Suite de procédures informationnelles pour la visualisation en réalité virtuelle	96
Figure 4.22: Description du réseau filamenteux en réalité virtuelle: Place Ville-Marie	97
Figure 4.23: Description du réseau filamenteux en réalité virtuelle: vue de profil de la Place Bonaventure.....	97
Figure 4.24: Visualisation en réalité virtuelle d'un itinéraire animé dans la ville intérieure	99

Figure 5.1: Table de génération de déplacements piétonniers en fonction du type et de la taille du générateur (tirée de NJDOT, 2000; sources FHWA, 1979)	102
Figure 5.2: Positionnement du générateur de déplacement dans le traitement totalement désagrégué du fichier de déplacements (Chapleau, 1999)	103
Figure 5.3: Ensemble des géolocalisations possibles pour le 1250 boulevard René-Lévesque	107
Figure 5.4: Générateurs de déplacements de la ville intérieure et intersections importantes	110
Figure 5.5: Validation tripartite des géolocalisations	113
Figure 5.6: Visualisation des polygones triangulaires	113
Figure 5.7: Exemples de validation par visualisation des polygones triangulaires	114
Figure 5.8: Excentricités relatives des géolocalisations appariées pour 80 lieux uniques	115
Figure 5.9: Comparaison matricielle des emplois et déplacements motif travail pour différents découpages	117
Figure 5.10: Régressions linéaires entre les emplois du REEM 2000 et les déplacements motif travail de l'enquête OD 1998	118
Figure 5.11: Informations générales sur le générateur	121
Figure 5.12: Fenêtre sur les ménages	121
Figure 5.13: Socio-démographie des personnes à destination du générateur	122
Figure 5.14: Répartition modale et noeuds d'entrée dans la ville intérieure	122
Figure 5.15: Temporalité des déplacements et profil d'occupation	123
Figure 5.16: Distribution des distances de parcours (origine – générateur)	123
Figure 6.1: Extrémités de déplacements : analyse de l'équilibre entre le système d'activités et le système de transport (inspirée de Meyer et Miller, 1984)	125
Figure 6.2: Spatialisation des extrémités de déplacements	126
Figure 6.3: Conceptualisation de la méthode des noyaux (adaptée de Bailey et Gatrell, 1995)	127

Figure 6.4: Surfaces d'intensité des extrémités de déplacements pour une journée moyenne de semaine	129
Figure 6.5: Profil d'occupation du centre-ville	131
Figure 6.6: Répartition temporelle des déplacements vers le centre-ville selon le motif déclaré.....	131
Figure 6.7: Dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol au centre-ville	132
Figure 6.8: Répartition des distances de marche selon le dernier mode TC emprunté..	134
Figure 6.9: Spatialisation des lignes de désir et origines des usagers à pied aux noeuds de transport de la ville intérieure	136
Figure 6.10: Localisation des générateurs de déplacements comparés.....	137
Figure 6.11: Pyramides d'âges des générateurs selon le dernier mode de transport emprunté (TC- Transport en commun, AC- Auto conducteur, AP- Auto passager, MR- Marche, AT- Autres)	139
Figure 6.12: Répartition spatiale et caractérisation des ménages	142
Figure 6.13: Profil d'occupation des générateurs de déplacements segmenté par le motif principal.....	143

Liste des sigles et abréviations

AMT	: Agence métropolitaine de transport
ATD	: Approche totalement désagrégée
EOD	: Enquête Origine-Destination
GRM	: Grande Région de Montréal
ITE	: Institute of Transportation Engineers
MADCADD	: Modèle d'analyse désagrégée (Computer aided drafting and drawing)
MADEOD	: Modèle d'analyse désagrégée sur les enquêtes Origine-Destination
MADGEN	: Modèle d'analyse désagrégée des générateurs
MADITUC	: Modèle d'analyse désagrégée des itinéraires de transport urbain collectif
MADPREP	: Modèle d'acquisition de données pour la préparation de la réponse émise par le préposé
MTM	: Modified Transverse Mercator
MTQ	: Ministère des transports du Québec
NAD	: North American Datum
OD	: Origine-Destination
RTL	: Réseau de transport de Longueuil
SI	: Système d'information
SIG	: Système d'information géographique
SIG-T	: Système d'information géographique appliqué au transport
SIG-TOO	: Système d'information géographique transport orienté-objet
SIUW	: Système d'information aux usagers pour le WEB
STL	: Société de transport de Laval
STM	: Société de transport de Montréal
UTM	: Universal Transverse Mercator
VRML	: Virtual reality modelling language
2D	: deux dimensions
3D	: trois dimensions

Chapitre 1 : Introduction

L'accomplissement d'un déplacement implique l'emprunt d'un ou d'une suite de modes de transport. Parmi ceux-ci, la marche demeure un mode incontournable dans tout itinéraire. En plus d'être un mode de transport à part entière, la marche intervient comme une composante intrinsèque dans la majorité des déplacements en permettant l'accès, le changement ou la sortie physique des réseaux de transport (Wigan, 1995). Pour les usagers du transport collectif, les segments d'un déplacement, effectués à pied, (pour accéder aux arrêts, transiter entre les lignes et accéder à la destination) peuvent jouer un rôle prédominant dans le choix d'un itinéraire. Similairement, les déplacements par mode de transport privé comportent eux aussi des segments de marche : accès au véhicule et sortie du stationnement jusqu'à la destination.

Bien que la marche soit un mode de déplacement répandu, les techniques actuelles d'analyse de la mobilité négligent le trafic piétonnier au détriment des modes motorisés (Brög et Erl, 2001). Lorsqu'il est question d'un centre-ville et par surcroît d'un réseau piétonnier protégé, comme celui existant dans le quartier centre de Montréal, la caractérisation et la modélisation des déplacements des personnes, incluant les portions à pied, constituent un défi méthodologique. Ainsi, la définition adéquate et fine du système de transport constitue la préoccupation principale pour modéliser correctement les déplacements.

Dans la Grande Région Métropolitaine de Montréal, les usagers du transport collectif urbain disposent d'une multitude de services d'assistance dans leurs déplacements par l'entremise de différents moyens de dissémination, parmi ceux-ci, des calculateurs de trajets sur Internet (Tous azimuts de la STM, Infomit à l'AMT et Itinéraires à la STL). Ces derniers reposent sur une gestion objective de données géo-référencées et opérationnelles sur les différents réseaux de transport : routiers, transport en commun et trottoirs. Bref, dans l'analyse des déplacements, l'utilisateur est actuellement pris en compte

de son origine jusqu'à sa destination ainsi que par l'ensemble des modes, ou enfin, pratiquement. Effectivement, le réseau piétonnier protégé n'est pas considéré dans les techniques actuelles et reste un chaînon manquant dans les calculateurs de chemins. Différents facteurs structurels du réseau souterrain, dont sa tridimensionnalité inhérente, imposent un raffinement de la conceptualisation des déplacements au centre-ville.

1.1 Contexte : ville intérieure de Montréal

Située au cœur du mouvement urbain, la ville intérieure a pris naissance en 1962 par la liaison souterraine de la Place Ville-Marie, complexe immobilier multifonctionnel, à la gare centrale. Depuis cet embryon, le réseau piétonnier protégé a principalement pris forme grâce aux noeuds de transport (stations de métro et gares), de véritables générateurs de déplacements enfouis dans le sous-sol. Outre ces infrastructures de transport et les facteurs conjoncturels de cette époque, les conditions climatiques caractéristiques de la région (hiver rigoureux, canicules d'été) ainsi que la présence d'un centre-ville compact, ont favorisé l'essor de cet entrelacement de ramifications souterraines (Besner, 1997). Aujourd'hui, l'hypercentre, composé de corridors d'une longueur cumulée estimée à 30 kilomètres, est alimenté par sept stations de métro, deux gares de train ainsi qu'un terminus d'autobus collectif (Figure 1.1). Ce réseau représente une interface de mobilité de choix pour les usagers à destination du centre-ville, rejoignant d'importants attracteurs de déplacements aux fonctions variées (galeries marchandes, hôtels, complexes multifonctionnels, édifices à bureaux, pavillons universitaires, amphithéâtre sportif, salles de théâtre, etc.).

Considérée comme un monde « virtuel », la ville intérieure se différencie de la réalité en surface. L'utilisateur qui s'aventure dans ce réseau souterrain s'expose à une expérience « obscure ». Il est confronté à un environnement dissemblable, sous juridiction majoritairement privée et entièrement aménagé pour le « libre » déplacement des piétons. Cependant, l'utilisateur est contraint dans un milieu où il devient ardu d'établir une perspective globale du réseau à cause de différents facteurs structurels. Les usagers à

destination du centre-ville et qui empruntent le métro sont automatiquement relégués à eux-mêmes dans le sous-sol montréalais. Ils se retrouvent dans un milieu avec de multiples ramifications, sans référence visuelle de l'activité urbaine extérieure et sans toponymie des voies de circulation. La signalisation, parfois présente, mais hétérogène, reste séquentielle et achemine les usagers d'un édifice à un autre. Le processus d'orientation est à recommencer une fois arrivé à l'immeuble voisin. Bref, les piétons ont accès à peu d'information pour les soutenir dans leurs cheminements souterrains.

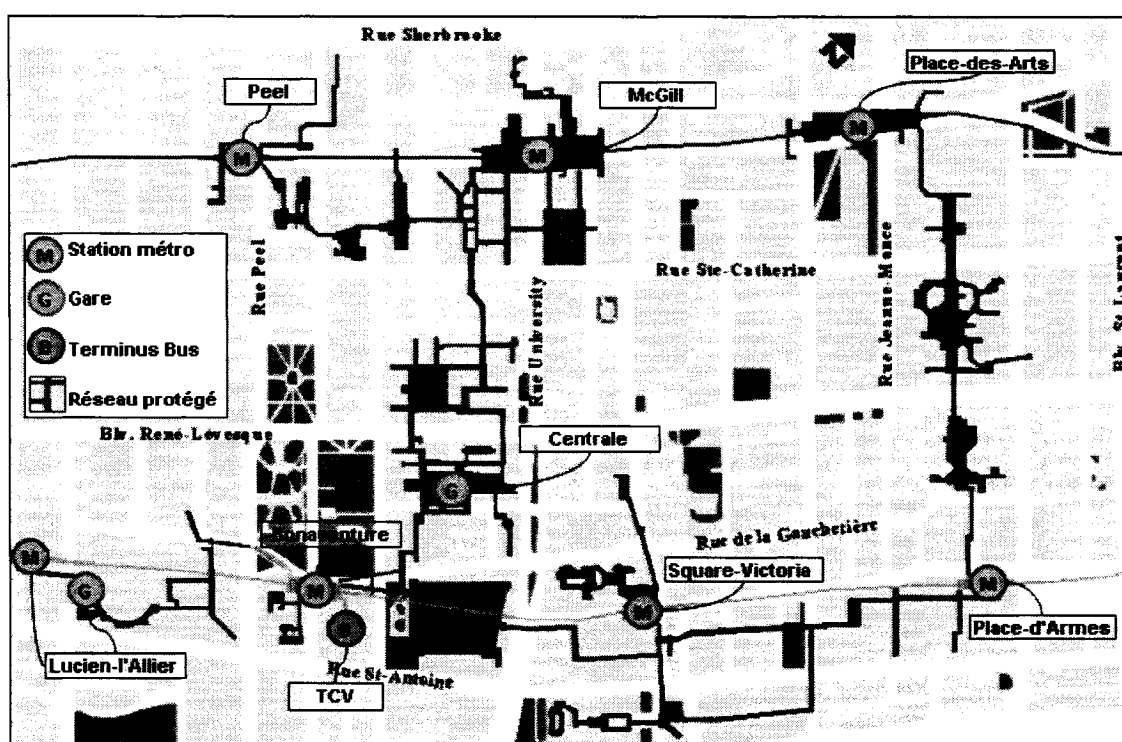


Figure 1.1: Réseau piétonnier et noeuds de transport de la ville intérieure de Montréal

1.2 Objectifs et esquisse méthodologique

C'est dans l'optique d'analyser et de modéliser ce « trou » espace-temps des systèmes d'information géographique transport (SIG-T) actuels que le présent projet vise essentiellement à :

- Définir une méthodologie de géocodification discrète du réseau piétonnier de la ville intérieure, tout en considérant les problématiques liées à son environnement dissemblable face aux réseaux de transport conventionnels;
- Représenter et visualiser en réalité virtuelle le réseau piétonnier protégé du quartier central;
- Exploiter, selon un traitement totalement désagrégé, les données de l'enquête Origine-Destination de 1998 de la Grande Région Métropolitaine pour illustrer le potentiel de ces données dans l'analyse de la mobilité piétonne au centre-ville et dans la ville intérieure;
- Examiner le niveau de précision des références spatiales utilisées pour la géolocalisation des extrémités de déplacements ;
- Caractériser les générateurs de déplacements annexés à la ville intérieure.

Afin d'atteindre les objectifs de ce projet, il devient impératif, dans un premier temps, de positionner la recherche face aux différentes approches de modélisation des transports urbains ainsi que des déplacements piétonniers. Une attention particulière à l'approche totalement désagrégée est de mise pour conceptualiser l'intégration du réseau piétonnier souterrain dans le traitement des itinéraires des enquêtes ménages. De plus, la revue de la modélisation des réseaux de transport en bases de données géoréférencées permet le développement d'une structuration stricte pour l'implantation tridimensionnelle du réseau piétonnier. Peu d'information sur la topologie du réseau piétonnier est accessible. Pour y remédier, une visite in situ envisage le dénombrement et positionnement des

infrastructures urbaines (corridors, escaliers, ascenseurs, portes) qui caractérisent ce réseau.

Pour réaliser l'ensemble du projet de recherche, différentes technologies informationnelles sont employées : systèmes d'information géographique, logiciels de dessin assisté par ordinateur, réalité virtuelle, tableur pour la gestion des bases de données et la création d'un visualisateur sur les générateurs ainsi que logiciels pour l'analyse spatiale des données.

1.3 Contenu

Suivant l'approche méthodologique de ce projet de recherche, le document traite cinq grands thèmes permettant de cerner la problématique de la modélisation des déplacements piétonniers dans la ville intérieure (figure 1.2).

En ce sens, le chapitre 2 expose, dans un premier temps, une revue des fondements actuels en terme de modélisation des transports urbains. Ces grandes familles de modélisation sont appuyées par les différents travaux sur l'étude des déplacements piétonniers afin de positionner l'approche de cette recherche.

Comme le présent projet s'inscrit dans le paradigme totalement désagrégé permettant le traitement systématique et informationnel des itinéraires de déplacements des enquêtes Origine-Destination, le chapitre 3 approfondit cette approche méthodologique. Pour ce faire, les données caractérisant les composantes intrinsèques du système de transport sont définies par la présentation des processeurs applicables. Par ailleurs, les différents systèmes d'information résultant d'une longue tradition en termes d'information sur la mobilité sont exposés.

La conceptualisation d'un réseau de transport reste une étape délicate nécessitant une structuration stricte des données à caractère spatial afin de représenter avec justesse les

mouvements possibles. En ce sens, le chapitre 4 présente la définition analytique du réseau piétonnier en noeuds et liens au sein des systèmes d'information géographique transport. Par la suite, les différents défis et complexités d'une modélisation filamentaire du réseau de la ville intérieure sont décrits, pour ensuite conceptualiser l'adjonction de ce dernier dans le traitement totalement désagrégé des itinéraires de déplacement. Suivant l'élaboration d'un système d'information pour fin d'analyse, la méthodologie de codification du réseau piétonnier est décrite. Finalement, la représentation en réalité virtuelle du réseau, par l'entremise de différentes technologies informationnelles, est présentée, illustrant le potentiel de cette avenue pour l'élaboration d'un système d'information aux usagers.

Comme les déplacements piétonniers s'effectuent sur de courtes distances, l'étude de la mobilité piétonne au centre-ville nécessite une géolocalisation fine et précise des extrémités de déplacements. Ainsi, une validation du positionnement des générateurs de la ville intérieure est exposée au chapitre 5. Par ailleurs, les composantes d'un visualisateur des générateurs de déplacements annexés à la ville intérieure sont précisées.

Le chapitre suivant illustre une analyse totalement désagrégée des données de l'enquête Origine-Destination, s'intéressant plus particulièrement aux déplacements ayant pour destination le centre-ville. En ce sens, une analyse spatio-temporelle de l'occupation du sol, une étude d'accessibilité des usagers accédant au quartier central par les infrastructures de transport collectif souterraines ainsi qu'une caractérisation comparative des générateurs de déplacements sont présentées.

Finalement, une conclusion revient sur les éléments importants de la démarche tout en conduisant vers certaines pistes de réflexion qui ouvrent la voie à des recherches futures.

Chapitre 2 : Fondements actuels

Dans différents domaines, la conceptualisation et la représentation, complète ou partielle, des systèmes du monde réel donnent accès à une meilleure compréhension des phénomènes qui s'y rattachent. En ce sens, on distingue deux grandes catégories d'approche pour le développement d'une théorie. Généralement, dans le domaine des sciences pures, une approche déductive est employée comparativement à une approche inductive dans les sciences sociales (Ortuzar et Willumsen, 1994). La première se base principalement sur l'élaboration de modèles validés par le rapprochement des prédictions aux observations sur le phénomène. En ce qui concerne l'approche inductive, les lois découlent de données recueillies et analysées. Quelle que soit l'approche, on note que les données subsistent à la base même de celle-ci et y jouent un rôle capital.

En planification des transports, la modélisation est une étape importante du processus de décision. Les modèles employés en planification des transports urbains varient du plus simple (courbes de tendance) au très complexe (simulation dynamique). Depuis le premier véritable effort méthodologique en transport, avec la procédure séquentielle classique, les technologies informationnelles et la dissémination d'informations ont poussé les planificateurs à se questionner sur cette méthode simplificatrice. Adaptée à la conjoncture de son époque, l'approche agrégée s'appuie sur des modèles mathématiques simples pour expliquer les phénomènes de mobilité.

Ce chapitre vise à investiguer les différentes approches en planification des transports afin de bien distinguer les fondements actuels dans l'étude de la demande. Bien que la marche soit très rarement considérée comme un moyen à part entière pour se mouvoir, les approches exposées révèlent les fondements de la grande majorité des travaux pour la planification des environnements piétonniers et la prévision des déplacements. Ainsi, une brève description des travaux réalisés sur la modélisation des déplacements piétonniers sera exposée pour chaque approche. Ici, la modélisation par micro-

simulation ne sera pas traitée bien qu'il s'agisse d'un domaine fleurissant pour l'étude et la gestion des foules dans des infrastructures urbaines. À cet égard, Raford (2004) effectue une revue de littérature complète sur l'ensemble des approches de modélisation des déplacements piétonniers.

2.1 Approche agrégée

Élaborée dans les années soixante pour la « (...) *planification des investissements de transports nécessaires aux régions urbaines afin de faire face à la croissance d'après guerre* » (Masson, 1998), la Procédure Séquentielle Classique s'utilise encore aujourd'hui dans certaines sociétés malgré l'évolution des techniques de modélisation et des technologies. Cette procédure vise essentiellement à estimer la demande en transport, par l'entremise d'un processus à quatre étapes séquentielles, et fondé sur l'agrégation spatiale du territoire sous formes de zones (Ortuzar et Willmensun 1994; Meyer et Miller, 1984). En effet, cette procédure s'appuie, dans un premier temps, sur les données socio-économiques et les propriétés du système d'activités, réduites à des valeurs généralement moyennes pour chaque unité territoriale. Ces attributs, associés aux zones d'analyse, sont figurés par l'intermédiaire d'un point dénommé centroïde. La figure et la description suivantes décrivent brièvement les quatre étapes qui correspondent au processus séquentiel de décision d'une personne qui : désire effectuer un déplacement pour un motif précis (génération), décide de sa destination (distribution), décide du mode emprunté (répartition modale), et décide finalement de la route choisie (affectation).

- **Génération:** La fonction principale de cette étape consiste en l'estimation, pour chaque unité territoriale, de la capacité d'émission (O_i) et de réception (D_j) en fonction de paramètres socio-économiques et de l'utilisation du sol. Ces données sont essentiellement utiles pour le développement d'un modèle qui prédit le nombre de déplacements par motif. Typiquement cette modélisation se concentre sur trois motifs : « home-based-work » (HBW), « non-home-based » (NHB) et « home-based-

other » (HBO). Les équations résultantes proviennent soit d'une régression linéaire multiple, soit d'une classification multiple, soit d'une table de taux de génération publiée par l'Institute of Transportation Engineers (ITE), soit enfin de la combinaison de ces trois méthodes.

- **Distribution:** Cette étape vise à prédire le flot de déplacements entre chaque zone productive vers les zones attractives en se basant sur les résultats de l'étape de génération. Bref, ces deux premières étapes assemblent les déplacements résultants sous forme d'une matrice spatialisée nommée matrice Origine-Destination. La technique de modélisation la plus commune reste l'utilisation du modèle de gravité qui distribue les déplacements (T_{ij}) selon le coût de déplacement entre les zones. Cette modélisation, sous un modèle de gravité, peut prendre plusieurs formes selon la fonction du coût (f_{ij}) de déplacement :

$$T_{ij} = \frac{O_i D_j f_{ij}}{\sum_{j=1}^n D_j f_{ij}}$$

- **Répartition modale:** L'étape suivante effectue l'assignation des déplacements aux différents modes disponibles (m) selon trois grandes catégories de variables : types de déplacement (motif, période, etc.), caractéristiques de l'utilisateur moyen (revenu, possession automobile, etc.) ainsi que les caractéristiques sur les réseaux de transport (temps d'accès, temps d'attente et temps de parcours). Le modèle logit représente sous forme d'une fonction de probabilité l'utilisation d'un mode m selon une utilité U_i .

$$P(m) = \frac{e^{U_i}}{\sum e^{U_i}}$$

- **Affectation:** Une fois les étapes précédentes réalisées, la procédure implique l'assignation des déplacements, suivant une règle comportementale, sur les réseaux de transports souvent limités à une schématisation noeuds/liens simplifiée. En ce sens, des liens fictifs, appelés connecteurs, relient le centroïde de zone à quelques

intersections importantes, permettant l'injection explicite des déplacements sur le réseau. Cette étape peut être effectuée selon une affectation tout ou rien (aucune contrainte de capacité), d'équilibre stochastique ou une assignation sur réseau avec considération des capacités.

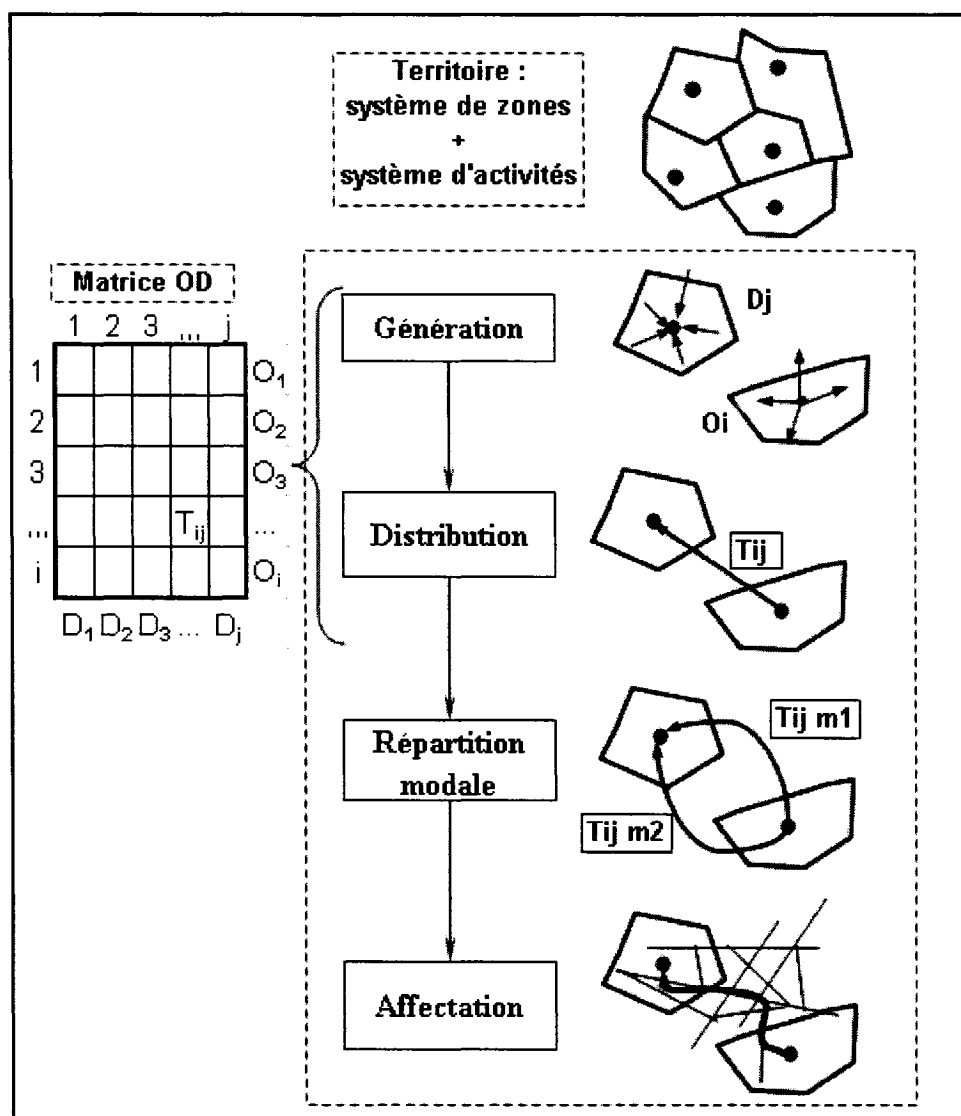


Figure 2.1: Étapes de la procédure séquentielle classique

Dans les versions plus récentes, il est à noter que chaque étape est à même de rétroagir sur les précédentes au moyen de boucles (Raux et al.1996).

2.1.1 Critique de l'approche agrégée

À l'époque, la simplification de la réalité, par l'agrégation zonale des données, s'avérait intrinsèque avec l'absence de systèmes analytiques et informatiques adéquats. Cette procédure séquentielle a été longuement employée et soutient encore aujourd'hui la prise de décisions en planification des transports.

«Fondamentalement, toute logique que soit la procédure séquentielle classique, il n'en demeure pas moins qu'elle a très peu évolué. Elle était sûrement nécessaire à une époque où les capacités d'analyse et d'exploitation statistique des données d'enquêtes Origine-Destination demeuraient artisanales, mais maintenant, elle illustre plutôt notre incapacité à intégrer les nouveaux outils technologiques et méthodologiques disponibles (plates-formes microinformatiques très puissantes, approche totalement désagrégée) à une nouvelle vision de la modélisation des transports urbains.» (Chapleau, 1993).

Plusieurs autres auteurs ont rapidement décrié les biais occasionnés par cette méthode. En ce sens, Atkins (1986) réalise un grand effort par un recueil de citations/critiques émises par différents auteurs sur cette conceptualisation agrégée. Parmi ces biais :

- L'agrégation en zones néglige l'hétérogénéité des comportements distincts aux ménages ou individus (Masson, 1998);
- L'offre en transport est omise lors du processus de génération des déplacements;
- Les déplacements intra-zonaux sont négligés lors de l'étape d'affectation résultant des flots sous-estimés;
- La modélisation de l'accès au réseau par un connecteur accorde les mêmes impédances d'accès (distance ou temps) pour l'ensemble des déplacements entrant ou sortant d'une zone;
- Les résultats qui émergent de cette suite de procédures demeurent de nature synthétique, sans aucune information individuelle sur les déplacements à cause de l'agrégation en une matrice Origine-Destination. Ainsi les flots sont de nature anonyme.

2.1.2 Étude des déplacements piétonniers

Traditionnellement, l'évaluation des mouvements piétonniers s'est basée sur le dénombrement physique ou sur photographies (Helbing et al. 2001). Comme Helbing et al. (2001) le mentionnent, ces mesures et modèles dérivés avaient tous pour finalité le développement d'un concept de niveaux de service (Fruin, 1971), le design des infrastructures, ou encore l'élaboration des grandes lignes conductrices des plans stratégiques de développement.

2.1.2.1 Dynamique des piétons

Dans un premier temps, les planificateurs ont analysé le trafic piétonnier. La modélisation de la dynamique des piétons a débutée vers le début des années 70. Suivant la théorie du trafic routier, les premières études empiriques élaboraient des modèles macroscopiques pour la détermination des capacités et niveaux de service des voies de circulation piétonnière. Les méthodes d'évaluation ont porté sur différentes catégories de piétons : étudiants (Navin et Wheeler, 1969), clients de commerces (Older, 1968) et résidents urbains (Fruin, 1971). Ainsi, les courbes théoriques vitesse-débit-densité ont été construites à partir de relations linéaires estimées par régression. Ces travaux sont toujours considérés comme références pour les différents projets de planification d'ouvrages piétonniers tels qu'employés dans le Highway Capacity Manual (Transportation Research Board [TRB] 2000). Malheureusement, ces modèles macroscopiques ne permettent pas d'établir la causalité des déplacements ou de prédire la demande.

2.1.2.2 Évaluation de la demande

Au niveau de l'évaluation de la demande en déplacements piétonniers, les premiers travaux se reportent à des modèles agrégés. Il faut mentionner que les efforts pour l'élaboration de la procédure classique séquentielle s'orientaient principalement vers la demande en déplacements automobiles, pour ensuite intégrer peu à peu les déplacements en transport en commun. Pour leur part, les déplacements non motorisés ont longtemps été délaissés dans la modélisation de la demande en transport. Malgré tout, Ness et al. (1969) ont appliqué la procédure séquentielle classique pour modéliser uniquement les

déplacements piétonniers, sur un territoire limité tel que le quartier centre de Toronto. Le découpage zonal se référait au niveau des îlots. Ce n'est que tout récemment que les modes non motorisés (bicyclette et marche) ont été intégrés dans la modélisation régionale, spécialement à l'étape de la répartition modale (Porter et al. 1999). Cependant, l'absence de données fines ou un niveau de détail souvent trop grossier (résultant de l'agrégation spatiale en zones) engendre des difficultés de taille pour la représentation de ces déplacements de courtes distances (Federal Highway Administration [FHWA], 1999). Par ailleurs, certains modèles effectuent la distinction entre les modes d'accès au réseau de transport collectif (marche et auto), mais négligent le mode marche comme un mode à part entière pour effectuer un déplacement.

Différentes méthodes agrégées d'évaluation de la demande s'appuient sur le développement de modèles de prévision. Selon des comptages, ces derniers prédisent les débits piétonniers par des régressions multiples en fonction de l'occupation du sol et de la proximité de générateurs de déplacements (Pushkarev et Zupan, 1975; Behnam et Patel 1977; Rutheford, 1979). Encore aujourd'hui ces méthodes agrégées sont utilisées pour l'estimation des débits piétonniers (Matlick, 1996 et Ercolano et al. 1997).

2.1.2.3 Modèles de configuration

Bien que la distribution des activités sur un territoire demeure une variable acceptée pour la prédiction des déplacements, certains auteurs mentionnent que ce type de modèle ne considère pas la configuration du réseau. « *Pedestrian models based on land use alone do not encompass differences in the layout of streets as movement networks* » (Desyllas et al., 2003). En ce sens, différents travaux ont mené à des modèles de configuration considérant la morphologie urbaine comme le générateur principal de mouvements piétonniers. L'analyse « configurationnelle » du système urbain pour expliquer l'intensité en déplacements piétonniers se fonde sur l'hypothèse suivante: pour une occupation du sol répartie uniformément sur l'ensemble d'un territoire, la configuration spatiale et sociale des rues explique le patron des mouvements piétonniers

dans l'espace urbain. L'intégration de ce facteur dans les modèles de prédiction s'effectue par une description topologique du réseau, ainsi que par des mesures sur la forme spatiale et la connectivité du système piétonnier. Ces variables permettent l'estimation de débits piétonniers. La confrontation de ces estimations à des données de comptages permet l'élaboration d'un modèle à régression linéaire. Les mesures les plus répandues demeurent celles se rapportant à l'approche « space syntax », développées par « University College London » (Hillier et Hanson, 1984; Hillier, 1996). Ainsi, les variables topologiques les plus communes sont (Raford et Ragland, 2003):

- la connectivité : nombre de noeuds directement liés à un noeud;
- la profondeur moyenne : le nombre moyen de liens à franchir d'un noeud à tous les autres;
- l'intégration : la facilité d'accéder à un noeud à partir de tous les autres. Cette mesure prend la forme :

$$I = \frac{2(MD - 1)}{k - 2}$$

où MD est la profondeur moyenne du réseau et k le nombre de liens dans le réseau.

L'application de ces mesures soutient qu'un lieu central sur le réseau accueille plus de piétons.

« Ces recherches montrent que le développement de la structure spatiale – l'effet de la morphologie – a des effets puissants, systématiques et indépendants, sur de nombreux aspects : les plus importants sont les influences significatives que la structure spatiale a sur la microdynamique du mouvement (piétonnier et véhiculaire), la mixité de l'affectation des sols et des densités, l'évolution des centres principaux et locaux de commerce, les taux de délits, le développement du malaise social et du sentiment d'insécurité, et plusieurs autres indices socio-culturels. » (Hillier et Charadia, 2003).

Cependant, Hacklay et al. (2001) mentionnent que lorsque les réseaux ont une géométrie stable, les modèles de configuration ne parviennent pas à tenir compte des changements

de la distribution des activités dans l'espace temps. Dans cet ordre d'idée, des travaux récents s'intéressent à l'élaboration de modèles à régression multiple incluant d'autres facteurs pour assurer une meilleure précision (Raford et Ragland, 2003; Raford, 2004). Entre autre, Desyllas et al. (2003) dressent un modèle dans lequel la capacité des trottoirs, l'occupation du sol et l'accessibilité aux noeuds de transport sont des variables qui s'ajoutent à la configuration du réseau.

2.1.2.4 Études dans la ville intérieure

Les études sur les mouvements piétonniers dans la ville intérieure se reportent à des comptages sur le terrain. À cet effet, Zacharias (2001) expose l'analyse des comptes effectués aux mois de juin et juillet 1996 par une méthode d'énumération. Pour ce faire, la personne en charge du dénombrement se déplace à la vitesse moyenne de la majorité des individus et compte les personnes en mouvement dans le sens opposé, et stationnaires, sur la voie de circulation. De cette méthode, l'intensité en déplacements piétonniers est estimée pour les deux directions sur 74 liens de la ville intérieure. À partir de ces intensités, Zacharias examine la dynamique ainsi que la distribution des déplacements piétonniers sous différentes perspectives : temporalité (comparaison semaine versus week-end), direction des déplacements, configuration du système piétonnier souterrain (centralité) ainsi que l'influence d'évènements (température extérieure, ventes extérieures). Sommairement, Zacharias constate:

- une faible différence entre la distribution des déplacements un jour de semaine versus un jour de fin de semaine;
- l'absence de patron directionnel de la circulation piétonnière dans l'espace-temps;
- une augmentation d'intensité lors de journées pluvieuses;
- une faible corrélation entre la distribution des piétons et la mesure d'intégration du système piétonnier (selon les modèles « space syntax »).

Sur ce dernier point, Zacharias mentionne que la non considération du réseau de surface, qui est en compétition directe avec le système souterrain, peut expliquer cette faible corrélation.

En conclusion, il mentionne:

- « *It seems equally likely that the generators and the space they generate are good candidates for helping to explain the spatial distribution underground.* »;
- « *If such models could be disaggregated into individual trips, we could compare movement variation over smaller areas and with regard to path layout and design.*».

D'autres travaux plus récents suggèrent l'élaboration de modèles de prédiction des débits piétonniers par l'entremise de régressions multiples basées sur des comptages effectués en 1989 et 2004 (Boisvert, 2005). Respectivement 74 et 28 postes de comptages ont permis l'élaboration de deux modèles hédonistes où les variables indépendantes s'expriment sous forme binaire pour justifier la présence ou l'absence d'une variable. Sommairement, les variables retenues par les deux modèles expriment la grande influence de la proximité de générateurs importants (édifices à bureaux, stations de métro, gare et terminus d'autobus) ainsi que la densité de commerces.

2.2 Approche désagrégée

L'arrivée des modèles désagrégés est venue pallier certaines déficiences de l'approche agrégée par l'amélioration du niveau d'observation. En ce sens, les caractéristiques socio-économiques des zones et les comportements moyens des individus sont délaissées pour une analyse fondée sur l'unité réelle : l'individu qui se déplace. Cette approche résulte de la transposition de modèles économiques au domaine des transports urbains (Domencich et McFadden, 1975). Selon les travaux de McFadden ainsi que de la théorie de l'utilité, l'individu réalise des choix face aux alternatives qui s'offrent à lui

selon l'option qui maximise son utilité. Le processus de décision est déterministe. Puisqu'il est impossible de reproduire avec certitude le comportement de l'utilisateur et de considérer l'ensemble des facteurs personnels et circonstanciels qui influencent les individus, la fonction d'utilité U se compose à la fois d'une partie connue V_r (fonction de caractéristiques observables sur la personne et de l'alternative) et d'une partie aléatoire ε_r . Cette dernière vise à représenter la différence entre la fonction déterministe et le comportement réel. Ainsi, l'utilité pour une personne t et l'alternative r prend la forme :

$$U_{rt} = V_{rt} + \varepsilon_{rt}$$

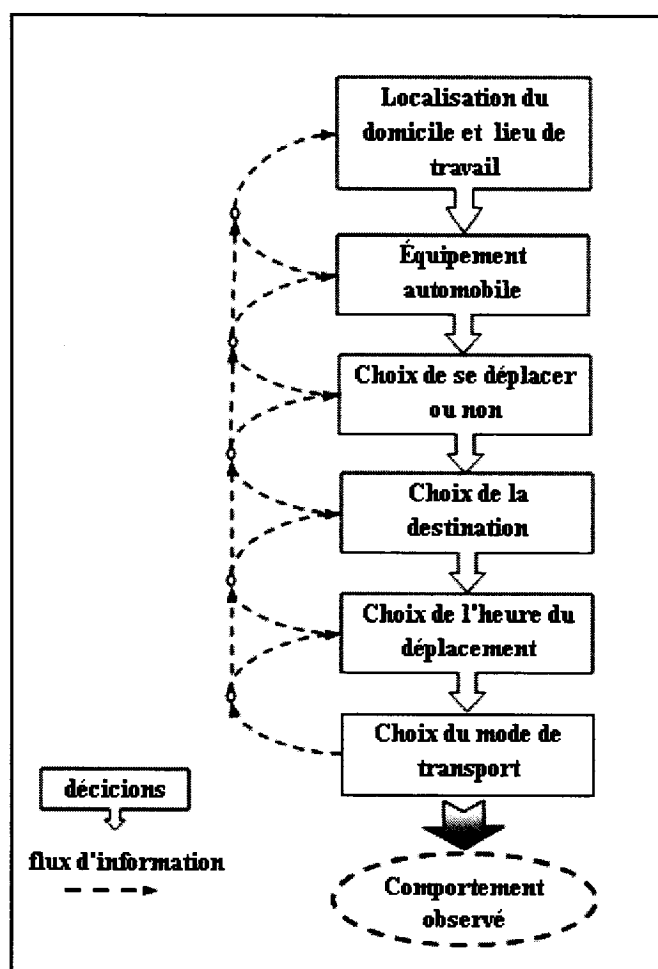


Figure 2.2 : Processus séquentiel de l'approche désagrégée et des choix effectués par l'individu qui se déplace (selon Domencich et McFadden, 1975)

De la sorte, l'approche désagrégée en transport urbain dérive la demande par une décomposition des décisions individuels en une suite logique de choix (Figure 2.2),

toujours dans la perspective de maximiser son utilité (Bierlaire, 1997). Cependant, bien que l'unité d'observation soit l'individu, l'approche se base essentiellement sur une série de modèles algébriques sensibles aux hypothèses et observations disponibles sur le phénomène.

2.2.1 Modélisation des choix d'itinéraire des piétons

Les modèles à choix discret sont grandement utilisés pour l'explication des comportements de mobilité. Ces derniers s'inscrivent dans différentes études de prévision des débits sur les voies de circulation piétonnière par des modèles de choix d'itinéraire. Entre autres, Borgers et Timmermans (1986) élaborent un modèle simple de choix d'itinéraire pour les piétons d'un centre-ville. L'unique variable déterministe retenue est la distance de marche des alternatives. Confronté à des observations, ce modèle a permis de prédire 52% des choix d'itinéraire avec exactitude.

Puisque le piéton est confronté à différents types d'infrastructures urbaines pour se mouvoir dans le plan vertical, Cheung et Lam (1998) établissent un modèle à choix discret pour estimer la probabilité relative de l'emprunt d'un type d'escalier (fixe ou mobile) au détriment de l'équipement vertical adjacent. Ce modèle probabiliste est défini par une forme logit :

$$P_{esc_mobile} = \frac{1}{1 + \exp(V_{esc_mobile} - V_{esc_fixe})}$$

où V représente la partie déterministe de la fonction d'utilité pour un type d'infrastructure donné (escalier fixe, escalier mobile). Cette dernière est décrite par :

$$V_r = C_r + \beta T_r$$

où C_r est la constante d'utilité relative de l'alternative r (escalier fixe ou mobile), β pondère le temps de marche T_r .

Ainsi, le modèle s'amène à:

$$P_{esc_mobile} = \frac{1}{1 + \exp(\alpha + \beta \Delta T)}$$

où α est la différence entre les constantes C_r de chaque infrastructure urbaine et ΔT la différence des temps de parcours pour se déplacer d'une élévation à une autre. Considérant que le piéton effectue son choix selon le lien qu'il estime le plus rapide, Cheung et Lam (1998) réalisent que les piétons favorisent grandement l'utilisation de l'escalier mobile au détriment de l'escalier fixe, spécifiquement pour effectuer un déplacement en montée. Par ailleurs, cette étude comportementale, effectuée dans une station de métro de Hong Kong, a permis la dérivation des vitesses de déplacements sur ces infrastructures urbaines. Les résultats sont exposés à la section 4.4.5.

Ce dernier modèle s'intéresse uniquement au choix entre deux alternatives pour les déplacements verticaux. Or, Daamen et al. (2004) élaborent un modèle pour représenter le choix d'un itinéraire piétonnier complet (composante horizontale et verticale) dans une infrastructure de transport. Selon un modèle logit multinomial, la probabilité qu'un piéton n emprunte l'itinéraire r sur l'ensemble des alternatives R est définie par :

$$P_n(r) = \frac{\exp(\mu V_r)}{\sum_{r \in R} \exp(\mu V_r)}$$

où μ est un facteur d'échelle et la partie déterministe (V_r) pour une personne précise est établie en fonction d'attributs personnels (âge, genre, transport de bagages), d'attributs sur le parcours (temps de marche sur plan incliné, escalier mobile et escalier fixe, ainsi qu'un indice de chevauchement des alternatives) et de constantes de pénibilité pour chaque attribut. Après une estimation des paramètres, fondée sur les observations effectuées dans une gare, les variables significantes concernent les propriétés du parcours. Ainsi, la fonction d'utilité retenue prend la forme suivante :

$$U_r = \alpha T_r^{plat} + \beta T_r^{escalier} + \gamma T_r^{esc_mobile} + \delta T_r^{rampe} + \zeta P S_r + \varepsilon_r$$

où le temps de marche T_r est décomposé selon le type d'infrastructure urbaine empruntée et PS_r est le facteur de chevauchement de l'alternative avec l'ensemble des itinéraires possibles.

Tous les modèles précédemment exposés s'appuient sur une discrétisation du réseau piétonnier (noeuds/liens). Cette conceptualisation décrit un nombre déterminé d'alternatives. Or, le piéton est un agent libre dans l'espace et le temps, donc il existe réellement une infinité de possibilités d'itinéraires où seule une représentation en continu de l'espace permet de considérer cet aspect. Ainsi, Hoogendoorn et Bovy (2004) s'intéressent à la modélisation des comportements individuels des piétons dans la planification de leurs activités, le choix d'accomplir des activités planifiées ou discrétionnaires sur le parcours ainsi que le choix des trajectoires entre chaque activité, le tout selon une description infinitésimale de l'espace. Cette approche présume que le piéton maximise l'utilité de son déplacement de manière subjective, décrivant une fonction d'équilibre entre le bénéfice de réaliser une activité et le coût perçu pour s'y rendre.

2.3 Approche totalement désagrégée

Développée au début des années quatre-vingt, cette « *approche méthodologique alternative* » (Chapleau 1992a, 1995) se veut un effort conceptuel afin de faire évoluer les moyens de planification des transports urbains. Cette méthode, fondée sur le traitement informationnel de données fines découlant d'enquêtes ménages, se distingue par :

- la désagrégation spatiale par la géo-localisation fine (x, y) de tout lieu spatial impliqué dans un déplacement (origine, destination, ménage, point de correspondance entre les modes,...)
 - le traitement individuel et multidimensionnel des itinéraires de déplacement.
- L'ensemble des variables (temporalité des déplacements, caractéristiques socio-

économiques des usagers et ménages, modes de déplacement, motifs, etc.) sont considérés et conservés tout au long du traitement informationnel des données.

Comparativement aux modèles agrégés qui emploient des modèles algébriques synthétiques, l'approche totalement désagrégée discrétise le territoire et les propriétés distinctes des personnes. Au lieu de cumuler les caractéristiques socio-économiques en une seule valeur moyenne par unité territoriale, l'approche totalement désagrégée traite individuellement l'ensemble des données disponibles sur les déplacements déclarés lors des enquêtes Origine-Destination. À cet égard, la figure suivante illustre l'itinéraire individuel totalement désagrégé. Cette conceptualisation d'un déplacement permet la modélisation de l'accès aux réseaux de transport et à la destination par l'emprunt du réseau de trottoirs, des différents modes et réseaux de transport utilisés, ainsi que l'intermodalité représentée par les noeuds de jonction. Bref, l'approche totalement désagrégée supporte un réseau multimodal qui permet le suivi d'un cheminement de l'origine à la destination tout en préservant l'ensemble des caractéristiques du ménage et de la personne rattachée.

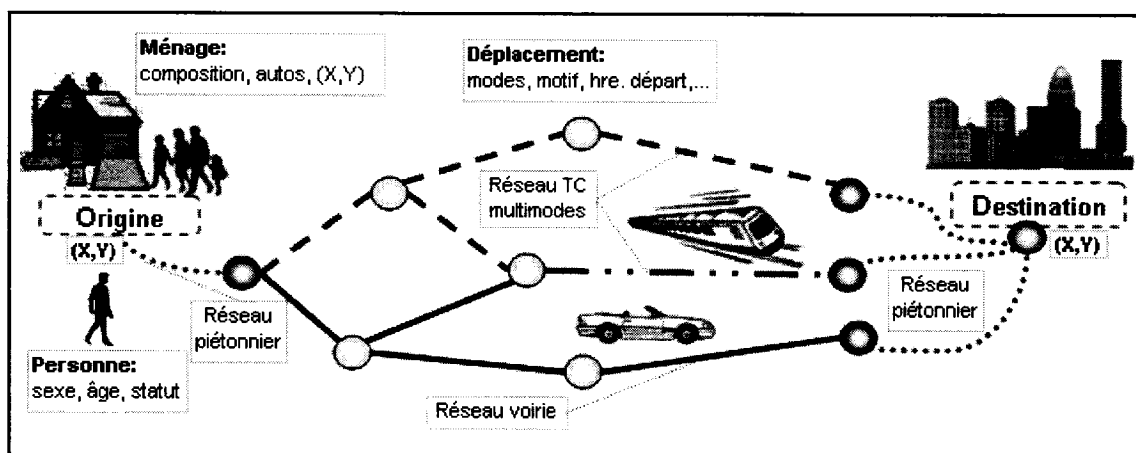


Figure 2.3: Itinéraire totalement désagrégé

2.3.1 Enquête Origine-Destination

Instrument de prédilection pour les exercices de planification de la Grande Région Métropolitaine de Montréal, les enquêtes Origine-Destination font partie de la culture montréalaise depuis 1970. En effet, effectuées environ tous les cinq ans, ces enquêtes permettent de recueillir de l'information détaillée sur les déplacements des différents membres des ménages pour une journée moyenne de semaine. Depuis la toute première enquête ménage, les techniques et instruments se sont grandement raffinés. L'évolution conceptuelle et la petite histoire anecdotique des enquêtes montréalaises sont illustrées dans les travaux de Chapleau (1995) ainsi que Chapleau et Morency (2002). Au cours des années, la méthodologie d'enquête a évolué et se base maintenant sur des systèmes d'information cohérents afin de mieux encadrer l'étape de saisie de l'information et ainsi raffiner les données recueillies. En ce sens, l'introduction d'un questionnaire intelligent aux entrevues téléphoniques, combiné à un système d'information géographique orienté transport, permet maintenant la géolocalisation et validation automatique des itinéraires déclarés lors de la saisie des données. Ces instruments informationnels seront exposés au chapitre suivant.

Depuis 1998, la réalisation de l'enquête Origine-Destination s'inscrit au sein d'un consortium réunissant les différents acteurs en transport urbain de la Grande Région Métropolitaine de Montréal : l'Agence Métropolitaine de Montréal (AMT), la Société de Transport de Montréal (STM), la Société de Transport de Laval (STL), le Réseau de Transport de Longueuil (RTL) ainsi que le ministère des Transports du Québec (MTQ) et le ministère des Affaires municipales et de la Métropole (MAMM).

Au travers de ces enquêtes téléphoniques, environ 5% des ménages (65 000 en 1998) du territoire à l'étude (5 400 km²) sont auscultés afin de connaître leurs déplacements et comportements dans une journée typique. Ces enquêtes, qui sont réalisées sur une période d'environ quatre mois en automne (mardi 25 août au vendredi 11 décembre 1998, soit 81 jours de déplacements enquêtés pour 96 jours d'enquête), permettent ainsi

de recueillir de l'information structurée et relationnelle selon trois grandes classes d'objets-variables (Figure 2.4): informations sur les ménages, les personnes ainsi que les déplacements. À ces variables peuvent s'ajouter différentes variables appelées dérivées comme : la durée d'activité (temps écoulé entre deux déplacements chronologiques), le statut de la personne (dérivé de l'activité principale de la journée) ainsi que la possession automobile (personne du ménage qui dispose du véhicule privé).

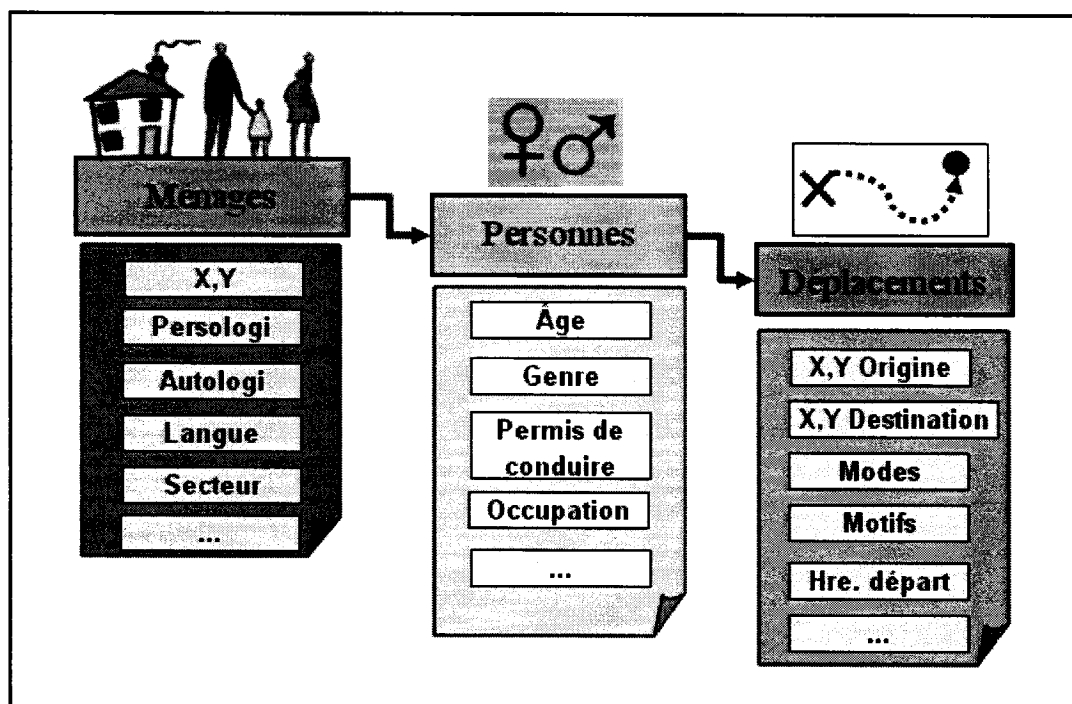


Figure 2.4: Variables de l'enquête Origine-Destination

Comparativement à l'approche classique où les données sont traitées séparément, le traitement informationnel totalement désagrégé assure l'unicité des données. Par ailleurs, les données brutes sont bonifiées par une suite de procédures permettant une validation, reconstitution et simulation des itinéraires déclarés (voir section 3.1). En ce sens, les données résultantes offre un éventail d'analyses à caractère spatio-temporel, adaptées aux préoccupations de la collectivité concernant la mobilité urbaine de la Grande Région Métropolitaine de Montréal. Les usages classiques des données de mobilité se résument en cinq grandes catégories (Chapleau et al. 2001): planification,

caractérisation de la demande, modélisation, appréciation des impacts et diffusion d'informations.

2.3.2 Approche orientée-objet transport

Le traitement individuel et systématique de chaque élément d'information des enquêtes ménages invoque l'approche orientée-objet. Cette approche, reconnue pour être utilisée en informatique, vise la conceptualisation de systèmes. Dans cette perspective, l'ajout complémentaire de cette rationalisation à l'approche totalement désagrégée offre un cadre structurant aux données et procédures applicables pour l'analyse des données. La réunion de ces approches a fait état de travaux récents : conceptualisation (Trépanier, 1999; Chapleau et Trépanier, 1998), fusion de données géospatiales provenant de réseaux distincts (Trépanier et Chapleau, 2001a) ainsi que l'analyse de la relocalisation de générateurs de déplacements (Trépanier et al. 2002).

Comme Trépanier (1999) le propose, la modélisation orientée-objet en transport, qui caractérise l'ensemble des objets, se formule autour de quatre grandes métaclasse d'objets en transport: (Trépanier et Chapleau, 2001b)

- **« Objets statiques :** *Les objets statiques possèdent une localisation fixe dans le temps et l'espace. Leur rôle est de décrire le territoire et servir de balise à l'espace utilisable pour fins de transport. Quelques exemples : les générateurs de déplacements, les codes postaux, les secteurs de recensement, les zones.*
- **Objets cinétiques :** *Les objets cinétiques sont les descripteurs du mouvement. Quelques exemples : le déplacement, la chaîne de déplacements, le trajet, la ligne d'autobus.*
- **Objets dynamiques :** *Les objets dynamiques sont les acteurs du transport. Ces objets « décident » et contribuent à leur mouvement. Ils représentent tantôt un groupe de personnes (ménages et collections de personnes), un objet mobile (train, automobile) ou une masse déplacée (telle qu'une marchandise).*
- **Objets systémiques :** *Les objets systémiques sont des groupes d'objets interreliés. Ils peuvent être opérationnels (réseau routier, réseau de métro),*

informationnels (enquêtes, recensements) ou multifonctionnels (centre-ville, banlieue). »

À titre d'exemple, la Figure 2.5 illustre la modélisation orientée-objet de l'enquête ménage, information de base pour le traitement totalement désagrégé des itinéraires.

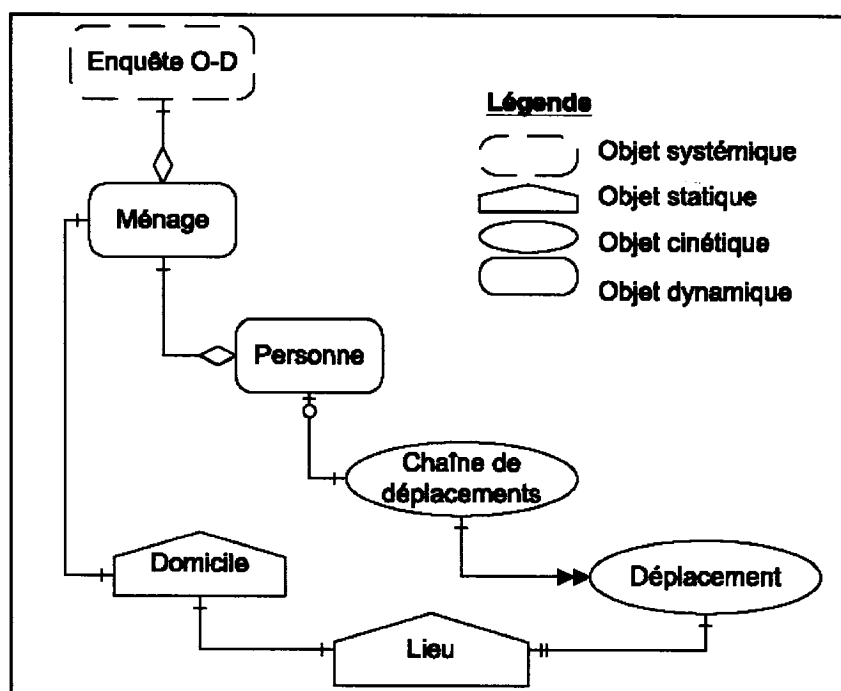


Figure 2.5: Modèle objets de l'enquête Origine-Destination (Trépanier et Chapleau, 2001b)

2.3.3 Analyse des déplacements piétonniers

Les enquêtes Origine-Destination, même si elles n'ont pas comme objectif principal de cerner les déplacements piétonniers, permettent, par le traitement totalement désagrégé, de considérer finement les déplacements effectués à pied. En ce sens, Chapleau et Lavigueur (1994) analysent et caractérisent, à l'aide des enquêtes 1982 et 1987, les usagers et modes associés aux gens à pied (vélo et taxi). En plus de considérer la marche comme un mode de transport à part entière, les segments d'accès par la marche en début et fin de déplacements motorisés sont considérés par un calcul d'accès à même le réseau

de trottoirs. Cette fonctionnalité de calcul d'accessibilité, modélisée et intégrée à MADITUC (voir section 3.1.), permet la dérivation d'indices de consommation d'utilisation du réseau (temps et distance de marche). Dans cet ordre d'idées, Chapleau (1994) réalise une étude détaillée, juxtaposant les données de l'enquête de 1987 aux données du recensement canadien de 1986, pour décrire la population avoisinante des stations de métro. Pour ce faire, différentes mesures d'accessibilité (calcul de chemins sur le réseau de trottoirs, zones radio-centriques, polygones d'influences) permettent d'extraire les déplacements et données à proximité des infrastructures lourdes (figure 2.6). De plus, les déplacements à pied issus ou se destinant à moins d'un kilomètre des 65 stations de métro de Montréal (incluant les déplacements d'accès aux stations) sont extraits pour une caractérisation spécifique.

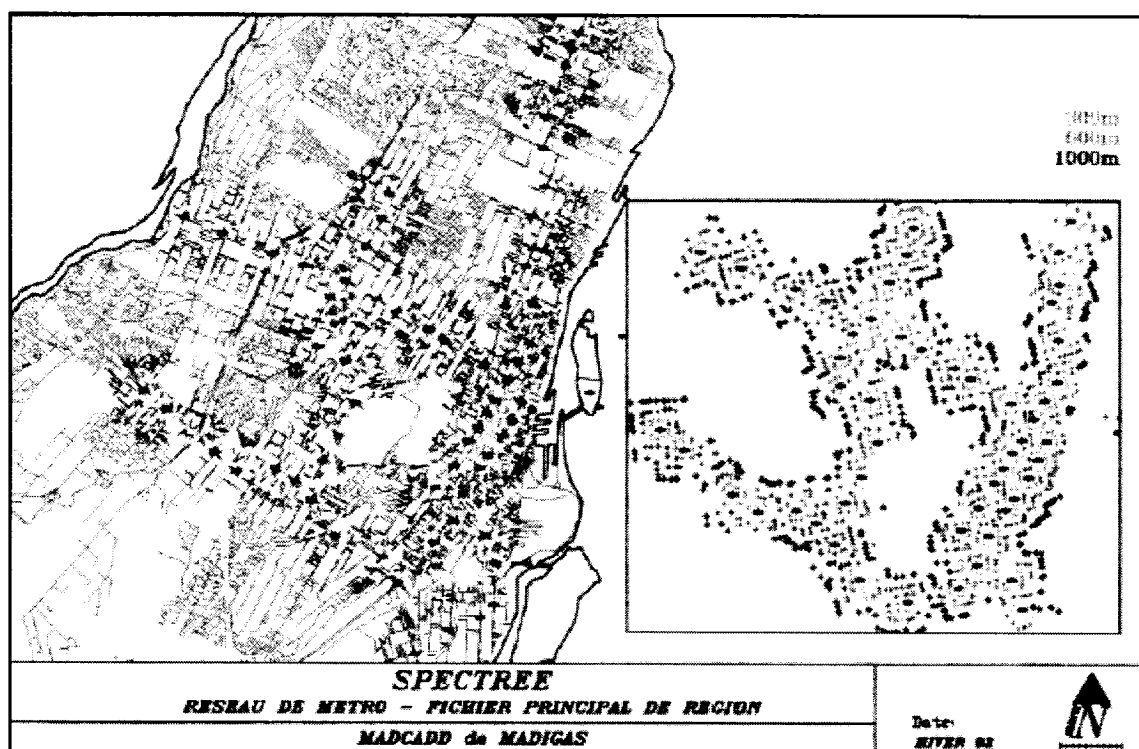


Figure 2.6: Arbres d'accessibilité des stations de métro (Chapleau, 1994)

Chapitre 3 : Données et instruments : contexte montréalais

L'approche totalement désagrégée se distingue par le traitement exhaustif et systématique des informations à caractère spatial disponibles. Pour ce faire, un encadrement spécifique est requis pour la collecte, le traitement et l'exploitation de ces données. En ce sens, différents outils, fondés sur une définition fine du système de transport, ont été développés, à commencer par MADITUC (Modèle d'Analyse Désagrégée des Itinéraires de Transport Urbain et Collectif) auquel différents systèmes informationnels se sont greffés.

3.1 MADITUC et la caractérisation du système de transport urbain

Développé vers la fin des années 1980, MADITUC se veut le descendant direct de TRANSCOM et de la partie transport en commun de EMME. Il permet la modélisation des réseaux de transports en commun, ainsi que l'affectation des déplacements individuels sur ces derniers, pour accéder à une analyse fine des chemins empruntés par les usagers. Ce logiciel se veut a priori un système d'information, plutôt qu'un amalgame de modèles algébriques (Chapleau, 1990). MADITUC s'appuie sur le traitement systématique de l'ensemble des informations individuelles et à caractère spatial des enquêtes Origine-Destination, par l'intermédiaire de modules qualifiés de processeurs (Chapleau, 1992a). Ces différents processeurs couvrent les multiples données qui définissent le système de transport urbain : le territoire, le réseau ainsi que la demande.

3.1.1 Caractérisation du territoire

L'analyse et la planification en transport se reportent à un territoire d'étude qui englobe l'ensemble des phénomènes spatiaux d'un déplacement (origine, destination, ménage, lieu de correspondance, arrêt d'autobus, etc.). L'approche totalement désagrégée s'assure du niveau de résolution le plus fin par le géocodage de ces lieux à la paire de

coordonnées x-y. Selon un système de référence précis (habituellement selon une projection cartésienne – UTM ou MTM selon l'enquête), les lieux d'activités impliqués pour la description d'un itinéraire sont géolocalisés sur le territoire. Des processeurs territoriaux dans MADITUC assurent la cohérence de ces références spatiales par l'entremise de bases de données géo-référencées. Ce niveau de résolution peut en tout temps faire l'objet d'une agrégation spatiale ultérieure selon différentes perspectives, sans pour autant perdre l'information multidimensionnelle qui résulte d'un traitement informationnel totalement désagrégué. En ce sens, l'agrégation spatiale permet l'analyse et la dérivation de tendances générales, difficilement visibles par une simple représentation ponctuelle. Ainsi, outre le positionnement x-y, on distingue typiquement les découpages territoriaux suivants (Chapleau, 1991):

- la zone fine. Entité géographique de petite taille résultant d'un découpage le plus homogène possible du territoire suivant les propriétés du système d'activité rattaché. Ce type de découpage a principalement été utilisé pour les enquêtes ménages, avant le positionnement par coordonnées x-y;
- le secteur de recensement. Découpage reconnu pour le recueil des données sociodémographiques lors des recensements canadiens. Ce découpage est souvent employé pour effectuer une validation, une pondération ou l'enrichissement des données de transport;
- les secteurs municipaux. Découpage géopolitique qui permet l'analyse agrégée par l'entremise de zones significatives au niveau d'une juridiction municipale;
- la sous-région : Entité géographique qui englobe plusieurs zones plus fines pour donner une signification géopolitique. À titre d'exemple, le territoire de la Grande Région Métropolitaine de Montréal est souvent partagé en 8 régions administratives permettant la représentation des territoires de desserte des organismes publics de transport (STM, RTL, STL ainsi que les CIT).

L'implantation de découpages s'effectue par une base de données qui caractérise le territoire et qui comporte (Chapleau, 1987) la description par un identificateur unique et

par la paire de coordonnées de son centroïde, la digitalisation du polygone qui décrit les limites de l'entité territoriale ainsi qu'une organisation hiérarchique pour le passage d'une unité spatiale à un autre. En ce sens, différents dictionnaires ou procédures analytiques de repérage spatial (fonctions courantes des SIG) permettent ces recoupements territoriaux (Chapleau, 1991).

Outre ces découpages géopolitiques, différentes techniques de division analytique du territoire peuvent être utilisés pour effectuer l'analyse spatiale de phénomènes urbains. Le découpage matriciel d'un territoire, par une série de cellules aux dimensions uniformes, est souvent utilisé pour effectuer des analyses spatiales sur une série de lieux-événements, représentés par un semis de points x-y. Ce type de découpage sera utilisé au chapitre 6 pour l'analyse spatio-temporelle de l'occupation du sol au centre-ville.

3.1.2 Caractérisation des réseaux

L'appréciation de l'offre en transport s'effectue par la définition et la caractérisation des réseaux parmi lesquels on distingue généralement le réseau routier du réseau de transport collectif. Bien que le réseau collectif de surface s'appuie physiquement sur la description du réseau de voirie, leur fonctionnalité et conceptualisation diffèrent. En effet, les véhicules privés ont une plus grande liberté pour se déplacer comparativement aux véhicules collectifs qui doivent respecter une trace précise, selon un niveau de service planifié.

La définition informationnelle d'un réseau dérive d'une description spatiale (géométrie) et alphanumérique (attributs opérationnels). Cette étape de codification des réseaux est cruciale dans le processus de modélisation du système de transport, puisque les analyses ultérieures dépendent directement de celle-ci. Pour réaliser cette codification, une interface graphique spécifique sous plate-forme AutoCAD (MADCADD) a été élaborée par le Groupe MADITUC. En plus de permettre la digitalisation des réseaux et des entités territoriales, cet outil englobe l'ensemble des fonctionnalités de MADITUC (Chapleau, 1992a): validation interactive des données d'enquêtes,

comparaison de comportements réels et simulés ainsi que visualisation 2D et 3D de différents résultats d'analyses.

3.1.2.1 Réseau de voirie

Représenté par le centre linéaire des rues, la modélisation du réseau de voirie regroupe des déplacements motorisés et non motorisés (auto, taxi, moto, vélo, marche) sur l'ensemble du territoire. Cette conceptualisation, réalisée en noeuds et liens, comporte à la fois de l'information descriptive (toponymie, direction), géo-référentielle (adresse civique) et opérationnelle (vitesse limite, nombre de voies, classe de service, etc.).

La codification analytique d'une rue est réalisée par un « polyligne » unique composé d'une suite d'arcs sur lesquels est rattachée l'information géo-référentielle. Par ailleurs, l'ensemble des arcs de ce réseau est orienté pour autoriser ou non le déplacement à double-sens sur le lien. Afin de définir la fonction propre et la classe de service des différentes rues du réseau de voirie, ce dernier est hiérarchisé. Cette classification, décrite au tableau 3.1, accorde des propriétés précises aux différents types de voies de circulation. La hiérarchisation du réseau permet plusieurs fonctionnalités dont : la considération ou non d'une catégorie de voies de circulation pour la simulation des déplacements, l'attribution de facteurs d'impédances selon la classe ainsi que l'extraction d'un réseau spécifique. En ce sens, au réseau de voirie, est affilié le réseau piétonnier de surface où seules certaines classes sont considérées accessibles aux piétons. Comparativement au réseau analytique routier, le réseau de trottoirs n'est pas orienté pour représenter la liberté directionnelle des mouvements piétonniers. Par ailleurs, le réseau de trottoirs comporte les passerelles exclusives aux piétons ainsi que les accès aux noeuds de transport collectif (stations de métro et gares) modélisés par des liens fictifs.

Tableau 3.1: Classes de rue du réseau de voirie montréalais (Trépanier, 1999)

Classe	Description	Vitesse et priorité	Orienté	Réseau opérationnel	Réseau de voirie	Réseau de marche
Autoroute	Rue orientée à accès limité	Élevée	Oui	X	X	
Artère	Rue d'importance supérieure, lien rapide entre des quartiers municipaux	Élevée	Non Oui	X	X	X
Collectrice	Rue d'importance moyenne, lien intra-quartier	Moyenne	Non Oui	X	X	X
Locale	Rue résidentielle ou industrielle de faible importance	Faible	Non Oui	X	X	X
Inactive	Rue projetée (pour faciliter les mises à jour)	Nulle				
Chemin privé	Rue utilisée exclusivement par les autobus	Faible	Non	X		
Passerelle pour piétons	Passerelle piétonnière faisant partie du réseau de marche. Doit être publique et dégagée en tout temps	N/A	Non			X
Passerelle d'accès au métro	Lien fictif permettant la connexion entre le réseau de marche et la station de métro (ou la gare)	N/A	Non			X
Bretelles	Bretelles autoroutières ou artérielles	Faible	Oui	X	X	

3.1.2.2 Réseau de transport collectif

Pour le contexte MADITUC, la modélisation du réseau en transport en commun est dite globale, c'est-à-dire multimodale (Chapleau, 1991). Ainsi, l'ensemble des modes collectifs (train, métro, réseau de surface) sont considérés. La digitalisation et la codification de ce réseau s'effectuent dans la perspective qu'il s'agit d'une interface de mobilité pour laquelle une relation usager-opérateur existe. En effet, le réseau de transport collectif est un assortiment de lieux spatiaux précis (arrêts, lignes, tracé) permettant à des usagers de se déplacer dans un espace-temps dérivé du service établi par les opérateurs. Dans cet esprit, la modélisation du réseau s'effectue en considérant deux éléments : la géométrie propre ainsi que le niveau de service associé. Pour ce faire,

tout réseau de transport en commun peut être intégralement décrit par un ensemble de noeuds et lignes (Chapleau et al, 1986).

Comme Chapleau et al. (1986) le mentionnent, les noeuds caractérisent les lieux d'activité des usagers sur une ligne de transport en commun (correspondance, embarquement et débarquement). Ils sont définis par un identificateur unique, une paire de coordonnées x-y, un descripteur qui indique la rue transversale ou la station/gare, ainsi qu'un code d'appartenance permettant le rattachement territorial. En revanche, la définition informationnelle d'une ligne de transport en commun est intimement liée à la description préalable des noeuds. En effet, la géométrie de la ligne est établie par la codification de la séquence des noeuds à parcourir par les véhicules, équivalent au tracé de la ligne. Similairement aux noeuds, la ligne comporte des attributs descriptifs pour assurer son intégrité tels qu'un identificateur unique et un descripteur nominal. Finalement, le niveau de service se transpose par des données caractérisant l'intervalle ainsi que la vitesse commerciale. Jumelée à un module-processeur, cette caractérisation des lignes de transport en commun permet la dérivation des ressources requises pour l'ensemble du réseau de transport en commun (véhicules-kilomètres, véhicules-heures, flotte de véhicules, etc.). Bref, la description du réseau établi l'offre en transport.

3.1.3 Caractérisation de la demande

L'évaluation de la demande en transport s'effectue à partir de données portant sur le désir et le besoin des individus à se mouvoir sur le territoire, ainsi que dans un espace temps. En ce sens, différentes méthodes de collecte de données sont employées. Pour la situation montréalaise, comme dans plusieurs autres endroits en Amérique du Nord, les grandes enquêtes téléphoniques demeurent un instrument privilégié comparativement aux enquêtes face à face réalisées en Europe (Bonnell et Le Nir, 1995). Ces enquêtes ménages constituent un précepte majeur dans l'étude de la mobilité d'une région urbaine. À cet effet, l'approche totalement désagrégée vise le traitement individuel et multidimensionnel de chaque itinéraire déclaré lors des enquêtes ménages. Ces

déclarations d'itinéraire se reportent à l'offre spatio-temporelle (réseaux de transport) établie sur le territoire à l'étude.

3.1.3.1 Étude de l'achalandage

À ces données brutes, peut s'ajouter, la description structurée et informationnelle des itinéraires pour analyser, par des indices de consommation, la demande détaillée sur le réseau. C'est par le module d'affectation des déplacements en transport en commun de MADITUC qu'il est possible d'analyser l'achalandage sur le réseau multimodal. Cette étape permet l'étude des flots de déplacements sur les différents tronçons, lignes et tracés. Comparativement à des méthodes de comptages ou agrégées, les flots calculés par cette méthode ne sont pas anonymes puisque l'ensemble des variables sur les personnes, ménages et déplacements sont conservés pour une caractérisation fine de la clientèle. En somme, ce module d'affectation permet l'analyse de la situation réelle de la demande en transport telle que révélée par l'enquête ménage (situation de référence). Par surcroît, il est possible d'analyser les impacts sur la demande, de la modification du système de transport ou du système d'activité (situation simulée).

Grâce à la description des lignes de transport et stations de correspondance empruntées par les usagers, il est possible de reconstruire finement les itinéraires déclarés. La logique des déclarations (connexité entre les lignes, heure de passage, distance de marche pour l'accès) est préalablement validée, simultanément ou postérieurement, par l'entremise de dictionnaires de géoréférences (adresses civiques, générateurs, arrêts, stations, intersections), lors du processus de l'enquête ménage. Cette validation informationnelle des parcours mène, selon une structuration stricte des données, à la construction des itinéraires dits « décrits », dans l'optique d'un chargement sur le réseau. L'affectation de ces itinéraires décrits forme la situation de référence révélée. Cette dernière permet, par un processus de calibrage, l'estimation des attributs de la fonction d'impédance pour un déplacement en transport en commun. En effet, le comportement décisionnel des usagers, pour l'emprunt particulier d'un itinéraire en transport en commun, se modélise par une fonction qui pondère et segmente les différents temps

perçus par l'utilisateur lors d'un déplacement: temps d'accès, temps d'attente, temps de correspondance ainsi que le temps de parcours. D'autre part, l'ensemble des statistiques de consommation et d'achalandage des réseaux découlent de cette modélisation des déplacements réels. Bref, la situation de référence décrit l'état de la mobilité régionale, ou d'une région plus fine, en fonction de l'offre en transport disponible lors de l'enquête.

L'analyse et la compréhension de cette mobilité réelle demeurent un précepte important dans la planification des transports. En outre, la situation de référence permet, par comparaison à une situation fictive, l'étude des impacts suite à une modification de service. Pour ce faire, la simulation d'itinéraires, selon la nouvelle offre en transport ou la modification des origines/destinations, s'effectue par le module d'affectation des déplacements et se décompose essentiellement en trois grandes étapes (Chapleau, 1992a) : modélisation automatique de l'accès, simulation de la trajectoire ainsi que chargement sur le réseau.

Comparativement à l'approche agrégée, la modélisation totalement désagrégée de l'accès (entrée et sortie) au réseau s'effectue implicitement. En effet, au lieu de se rabattre sur une définition explicite et simplificatrice de l'accès au réseau par l'entremise de connecteurs (liens fictifs entre un centroïde de zone et une intersection importante du réseau), l'accès est simulé à vol d'oiseau pour une série d'arrêts-lignes à proximité du point d'origine (x-y). De cette façon, un ensemble de noeuds probables d'entrée sur le réseau opérationnel est considéré. Cette modélisation implicite s'amène à un niveau de précision très fin par le calcul de chemin à même le réseau de trottoirs. De cette façon, les barrières physiques et la véritable distance de marche pour accéder au noeud d'entrée sur le réseau sont considérées. Ce type de raffinement permet une adéquation quasi parfaite avec la réalité rencontrée par l'utilisateur sur le terrain. En ce sens, les systèmes d'information aux usagers empruntent ce module d'accès pour assister l'utilisateur dans la sélection d'un cheminement selon ses restrictions. Pour sa part, la simulation de

l'itinéraire sur le réseau se base sur la fonction d'impédance, préalablement calibrée, selon la situation réelle découlant des données de l'enquête Origine-Destination. Ainsi, cette fonction ramène le temps consommé pour un déplacement sous forme d'un coût généralisé. Bref, le calculateur de trajet conduit à l'établissement du cheminement emprunté (lignes et points de correspondance) le plus plausible, correspondant au déplacement dont le coût généralisé est minimal. La décomposition des itinéraires par la description des noeuds, liens et lignes permet ensuite le chargement des déplacements sur le réseau urbain pour l'analyse des impacts sur la demande. Cette construction d'itinéraires simulés permet la confrontation à la situation de référence.

Ce processeur de simulation est grandement utilisé pour l'étude des impacts suite à un changement de l'offre (prolongement du métro - Chapleau et al. 1987; modification du niveau de service sur une ligne de train - Noel et Chapleau, 1987), la relocalisation de générateurs de déplacements importants (relocalisation d'un hôpital - Trépanier et al. 2002), ainsi que pour l'étude de projets à moyen ou long terme. S'intéressant aux préoccupations actuelles pour le financement des infrastructures en transport urbain, cette modélisation de la demande permet l'évaluation des indices de consommation des résidents sur les réseaux de différentes régions géopolitiques. Ainsi, l'élaboration d'une approche méthodologique objective, appuyée par une modélisation fine de la demande sur les réseaux, peut assister l'implantation de mesures (mesures de péréquation et partage des recettes) vers une équité dans les transports urbains (Chapleau et Morency, 2004).

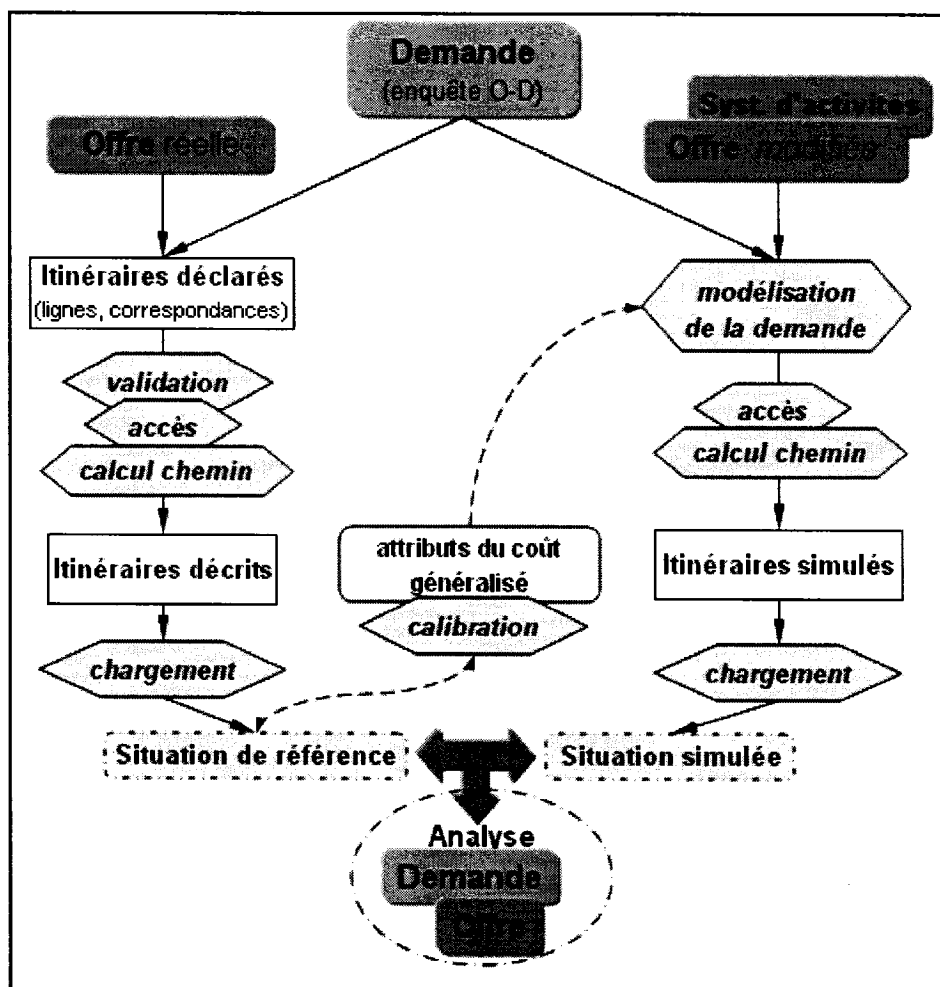


Figure 3.1: Procédure de modélisation de la demande

La description d'un déplacement en transport en commun par les noeuds d'entrée, de jonction et de sortie du réseau de transport en commun suffit pour une reconstitution complète et fine du déplacement. La reconstitution et la validation simultanées, lors des enquêtes Origine-Destination, assurent l'acquisition d'informations cohérentes. Cependant, ce processus reste plus ardu pour le cas des déplacements effectués en totalité ou en partie en véhicule privé. En effet, pour des raisons de logique et de qualité, demander aux répondants de décrire l'ensemble des liens routiers empruntés lors d'un déplacement reste une requête très exigeante, voire impossible pour le répondant et l'archivage des données résultantes. Par ailleurs, c'est généralement une seule personne

qui décrit les habitudes de mobilité pour l'ensemble du ménage. Ceci rend impossible la reconstitution complète des déplacements par la dénomination des liens viaires empruntés la veille par tous les membres du ménage. Pour ce faire, lors de l'enquête de 1998, la seule information demandée pour ces types de déplacements se réfère à l'utilisation d'un pont. De cette manière, les noeuds d'entrée ou de sortie sur un territoire ainsi que les voies de circulations rattachées sont connus. En 2003, une question supplémentaire sur les liens autoroutiers empruntés a été ajoutée. Ces informations permettent une validation supplémentaire pour les déplacements tenant de la conduite automobile. Avec l'absence d'informations permettant le recouvrement exact du cheminement, la simulation des déplacements motorisés et privés est moins juste que ceux en transport en commun. Par contre, l'affectation des déplacements automobiles sous les conditions optimales (vitesse en écoulement libre) du réseau viaire hiérarchisé et détaillé permet une analyse adéquate de la demande pour ce mode de déplacement.



Figure 3.2: Visualisation 3D du chargement des déplacements automobile sur le réseau (Chapleau, 2003)

3.1.3.2 Analyse de la demande

Avant ou suite à l'affectation des déplacements, l'analyse totalement désagrégée de la demande peut prendre différentes formes selon l'entité géospatiale explorée. En ce sens, la reconstitution et la validation des itinéraires enrichissent les données multidimensionnelles des enquêtes ménages et permettent l'analyse fine des mouvements aux différentes entités évocatrices du système de transport (noeuds, lignes et liens, secteurs). À titre d'exemple, l'étude d'accessibilité, la caractérisation des usagers des stations de métro (Chapleau, 1994) ou des gares de train (Chapleau et al. 2002) se réalisent par l'extraction des déplacements entrant et/ou sortant aux noeuds de transport. De la même manière, l'étude de l'achalandage sur une ligne de transport se reporte à l'extraction des déclarations qui mentionnent l'utilisation de cette ligne, en totalité ou en partie. Mise à part l'analyse par entités physiques du système de transport, la structuration relationnelle des données d'enquêtes permet l'analyse catégorielle selon différentes variables (personne, ménage, mode, heure de pointe ou hors-pointe, motif, etc.). Notamment, différents travaux relatent l'analyse comportementale de différentes classes d'usagers et de la demande spécifique associée, dont: travailleurs (Chapleau, 1999), personnes âgées (Chapleau, 2002). En plus des données d'enquêtes ménages, différentes sources complémentaires de données peuvent être jumelées dans l'optique d'enrichir l'information (les données des recensements canadiens demeurent les meilleurs exemples).

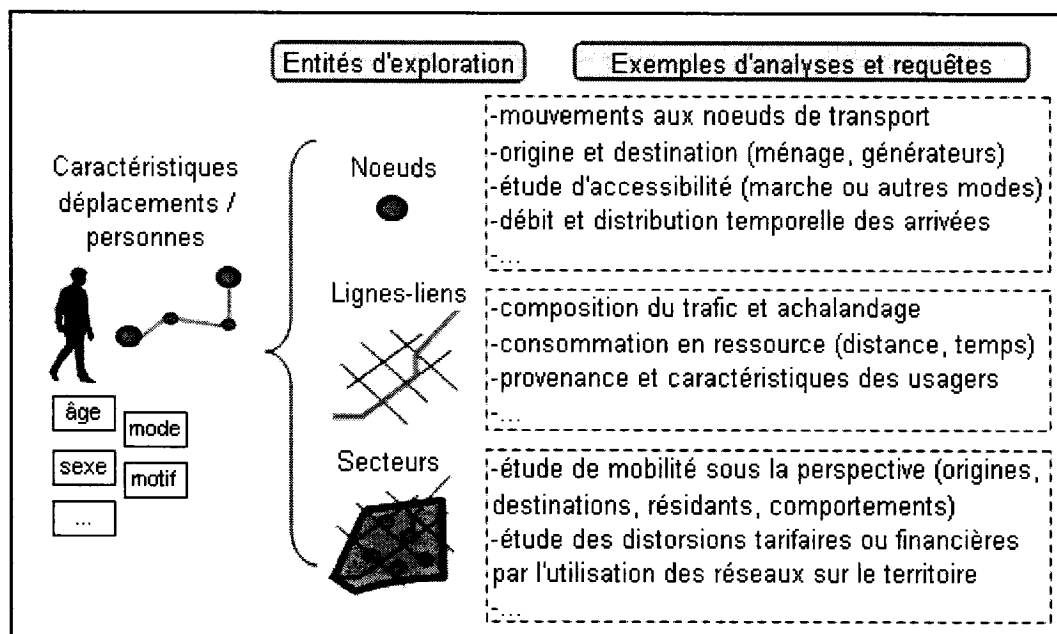


Figure 3.3: Extraction et analyse de la demande par entités spatiales du système de transport

3.2 Les systèmes informationnels montréalais

L'exploitation des données des enquêtes ménages requiert un environnement structuré et systématique, afin de répondre aux besoins et préoccupations de la collectivité en transports urbains. C'est principalement par cette tradition, en matière d'informations sur la mobilité, que le montage de systèmes informationnels dédiés au transport urbain dans la Grande Région Métropolitaine de Montréal a été réalisé. Parallèlement, ces systèmes montréalais ont su appuyer et conduire ces données à un niveau de raffinement supérieur dans l'optique de développer un capital collectif, aussi bien pour les organisations de transport que pour les usagers.

La longue tradition des enquêtes ménages de la Grande Région Métropolitaine justifie en grande partie l'émergence continuelle d'un ensemble d'instruments de recueil, d'exploitation ainsi que de dissémination. Cette gamme d'instruments rejoint les préoccupations actuelles des différents intervenants en planification des transports. C'est

par l'évolution des connaissances sur la mobilité et l'utilisation des mêmes instruments technologiques que la planification des transports dans la région montréalaise se résume en un héritage d'espaces « technologico-cognitifs » (Chapleau et al. 2001) résumés brièvement ci-dessous.

La première tentative d'instrumentation s'est effectuée à une période (début des années 1980) où la planification opérationnelle occupait beaucoup de place. De cet effort, a résulté le système d'aide à la planification (SAP) qui employait des modèles d'affectation basés sur les matrices origine-destination, résultantes premières, à l'époque, des enquêtes ménages.

Vers la fin des années 1980, « (...) *l'élagage du découpage zonal, la disparition de la notion de matrice Origine-Destination, le renversement des relations « données-opérateurs de calcul » ont tour à tour contribué au remplacement de la notion de modèle par la notion de système d'information. Ce qui a pour effet de diminuer l'effet de fixation du processus de planification sur les données!* » (Chapleau, 1995). Les instruments de planification en transport s'inscrivent donc dans un système d'information comprenant cinq composantes fondamentales et interdépendantes comme exposées et décrites par Chapleau (1991 et 1995) :

- **Le personnel technique** : professionnels et techniciens de domaines (géographes, ingénieurs, urbanistes, économistes, sociologues, etc.) et juridictions distinctes (sociétés de transport, municipalités, gouvernements, firmes privées) qui s'efforcent de manipuler, traiter, valider ainsi qu'interpréter les connaissances. Le personnel technique effectue la liaison entre la réalité et le système informationnel. Cependant, leurs actions sont limitées par leur capacité à se soustraire aux problèmes de tutelle intellectuelle et politique;
- **Les procédures** : ensemble de savoirs, de méthodes et de processus qui s'intègrent au sein de la tradition institutionnelle lors de l'approche des questions de court,

moyen et long termes. Il s'agit d'une composante éminemment culturelle qui nécessite une transparence;

- **Le matériel :** assortiment d'équipements microinformatiques et périphériques nécessaires pour la gestion des bases de données ainsi que l'acquisition de données;
- **Les logiciels :** ensemble des instruments génériques et d'applications qui permet d'accéder à une maîtrise systématique des données par l'entremise de méthodes pour le traitement, l'exploration ainsi que l'analyse des bases de données. Les technologies disponibles demeurent en constante évolution ce qui demande une redéfinition constante des outils informationnels;
- **Les bases de données :** assortiment des données qui représentent et décrivent la réalité par la modélisation des diverses composantes de la problématique de l'offre et de la demande en transport urbain (territoire, réseau, demande). Ces dernières restent quantifiables, variées (socio-économiques, démographiques), spatialisées (géomatiques) et interreliées aux autres composantes du système informationnel.

L'ère de développement technologique et informationnel constant au début des années 1990 a, par la suite, amené les systèmes d'informations, qui révèlent le caractère interdépendant de ses composantes, à un nouveau concept : le système d'information à intégration cohérente. Les nouvelles possibilités offertes par cette évolution permettent «... *le raffinement des données de référence (meilleur niveau de résolution et précision), la multiplication des interactions entre les systèmes d'information soutenant la planification stratégique, la planification opérationnelle et l'information à l'utilisateur, ainsi que le développement d'une planification à plus court terme (réajustements plus fréquents).* » (Chapleau et al. 2001). Aujourd'hui c'est dans une vision de démocratisation de l'information que les systèmes d'information à intégration cohérente s'inscrivent comme « transparents ».

Bref, le Groupe de recherche MADITUC a participé grandement à cette évolution du capital intellectuel collectif en transport urbain par sa participation étroite avec les

organismes de transport ainsi que par le développement de différents systèmes informationnels. Comme énoncé précédemment, le tout a débuté par l'instauration du logiciel MADITUC. Autour de ce logiciel gravitent différents systèmes d'information synthétisables en quatre grandes classes (Figure 3.4) : systèmes d'information sur la demande, systèmes d'information aux usagers, systèmes d'information géographiques transport orientés-objets ainsi que systèmes d'information opérationnels. Les sections suivantes proposent une description abrégée des concepts associés, ainsi que l'exemple de quelques systèmes informationnels qui ont un lien direct ou indirect avec le projet, mais qui illustrent le niveau de détail offert par le traitement totalement désagrégé des itinéraires.

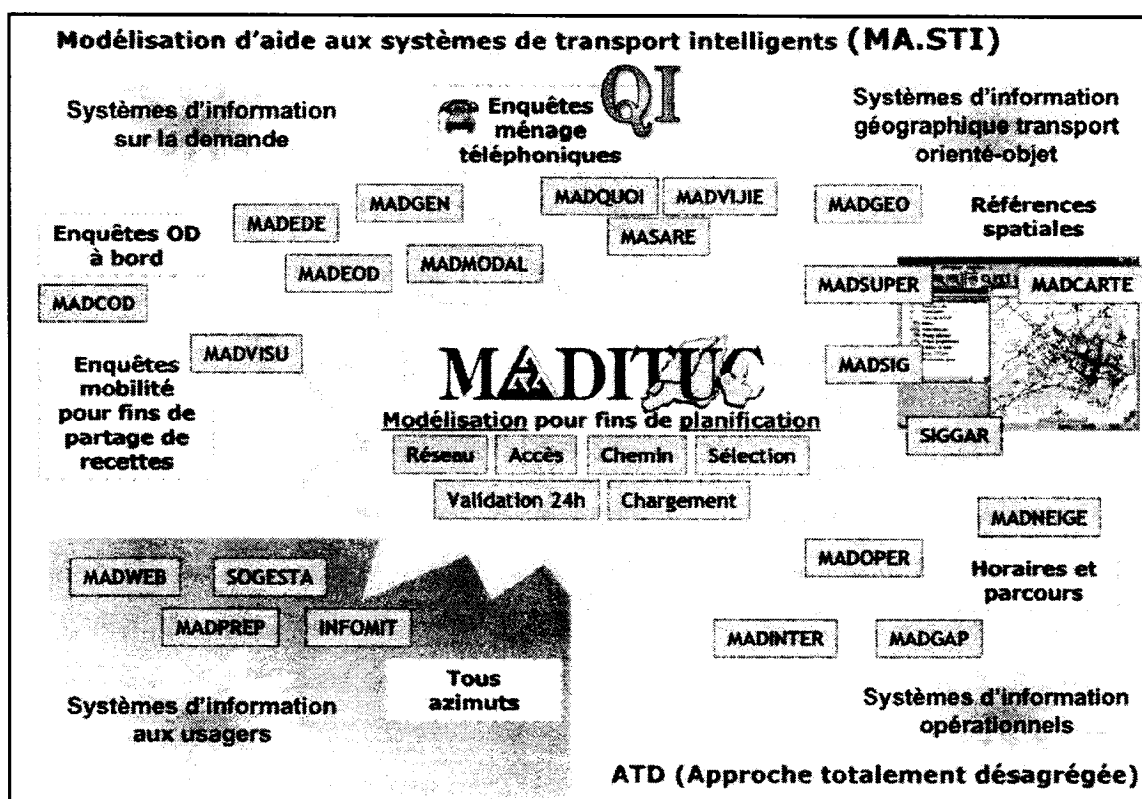


Figure 3.4: Intégration cohérente et subtile des systèmes d'information (Chapleau et al. 2000)

3.2.1 Systèmes d'information sur la demande

La collecte de données fines qui répondent à la fois à des logiques spatiales et temporelles sur la demande en transport reste un défi méthodologique. Les préoccupations sur la qualité, la pertinence ainsi que la cohérence de ces données ont conduit à l'émergence d'outils informationnels d'assistance pour la réalisation des enquêtes transport. Par ailleurs, dans l'optique d'informer la collectivité, différents instruments de dissémination ont pris forme.

3.2.1.1 Questionnaire intelligent

La cueillette de données lors d'une enquête ménage téléphonique est un processus qui fait intervenir deux interlocuteurs qui tentent, dans les limites de leurs connaissances et compréhensions, d'établir le plus précisément possible les habitudes en déplacements du ménage. Il s'agit d'un processus crucial qui peut être épaulé par l'implantation d'un questionnaire intelligent. Ainsi, l'instrumentation des enquêtes transport introduit un troisième agent dans le processus de négociation entre l'interviewer et la personne enquêtée. Cet outil informationnel permet une meilleure adéquation entre les différents espaces cognitifs en présence (Chapleau et al. 2001), comme illustré à la figure 3.5. En ce sens, une suite de trois logiciels a été conçue pour assister le processus de collecte des données.

- **MADQUOI**, le troisième agent dans la négociation, est un questionneur intelligent qui assiste l'enquêteur pour la saisie systématique et cohérente des déclarations du répondant. Différentes fonctionnalités de validation en temps réel des informations déclarées facilitent la tâche de l'enquêteur. Les procédures de validation assurent la cohérence de différentes logiques : le format de la valeur entrée, la logique spatio-temporelle des séquences de déplacements ainsi que la logique entre les objets (ménage, personne et déplacement). Pour ce faire, MADQUOI s'appuie sur un système d'information géographique de type transport accompagné des bases de données de références (générateurs, adresses

civiques, intersections, stations, arrêts) actualisées avant et pendant l'enquête. Ce système de validation en temps réel a pour objectif d'assister l'enquêteur dans l'entendement des déclarations du répondant. Ainsi, par un système de navigation interactif, l'enquêteur est à même d'intervenir pour réorienter les déclarations erronées et inscrire l'information qui est automatiquement validée et géocodée.

- Pour sa part, **MADASARE** assure un suivi strict de l'échantillon et permet de recueillir différentes statistiques sur son évolution, selon différents types d'intervalles temporels. Ainsi, le logiciel permet la gestion de l'échantillon par: l'ajout ou la suppression de numéros de téléphone, l'affectation des ménages à un interviewer spécifique pour assurer la compatibilité linguistique ainsi que la gestion de rendez-vous.
- Finalement, **MADVIJIE** intervient comme agent de monitoring pour assurer la qualité et la productivité des enquêteurs. Une interface graphique permet le suivi et la vérification en temps réel des informations saisies par les interviewers. Les statistiques résultant de ces deux derniers logiciels permettent, entre autre, d'apprécier de nouvelles perspectives lors de l'étude de la qualité de l'enquête (Chapleau, 2003 et Van Rothen, 2004). En somme, l'instrumentation des enquêtes ménages téléphoniques assure une consistance et une cohérence des données recueillies.

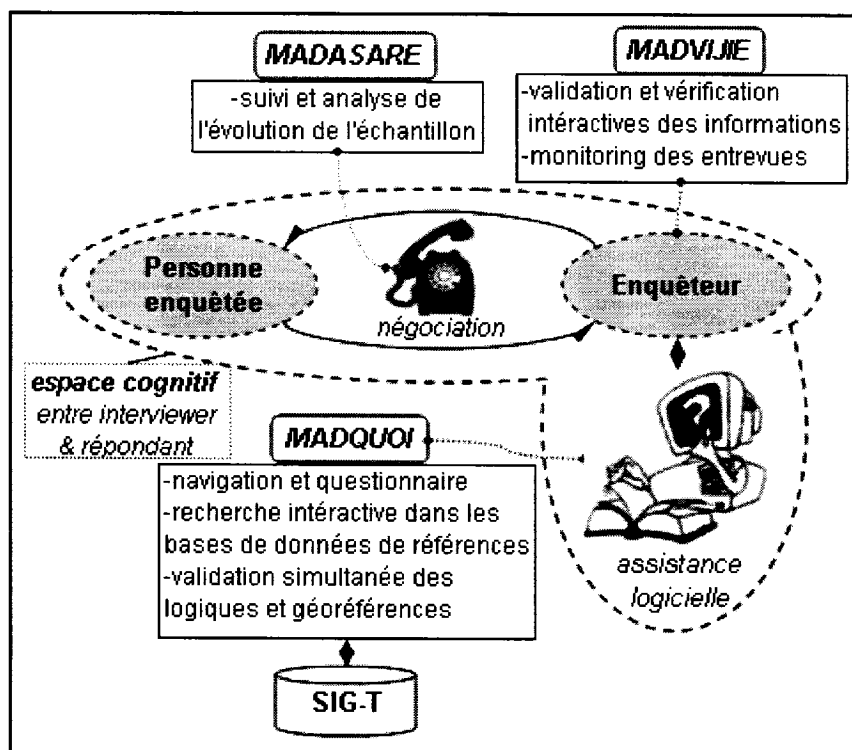


Figure 3.5: Instrumentation de l'enquête ménage et espaces cognitifs

3.2.1.2 Outils d'exploration et de dissémination

La cueillette de données ne suffit pas en elle-même pour assurer la compréhension des phénomènes urbains décrits par la base de données résultant de l'enquête. Dans l'optique de visualiser, clarifier, explorer et disséminer l'information caractérisant la mobilité de la région métropolitaine, différents outils interactifs, prenant forme sur tableur Excel, ont été développés. Parmi ces instruments (Chapleau et Morency, 2002):

- **MADEOD** : il s'agit d'un outil d'exploration de mesures sur la mobilité et des caractéristiques socio-économiques découlant des enquêtes ménage. Le Modèle d'Analyse Désagrégée des Enquêtes Origine-Destination (Lavigne et Chapleau, 1990) informe sur l'état de la mobilité, par la compilation agrégée des données sous une perspective territoriale. Ainsi, l'outil de visualisation intègre de l'information sur les personnes, ménages et déplacements reliés à chaque zone d'analyse.

- **MADGEN** : le Modèle d'Analyse Désagrégée des Générateurs de déplacements est un instrument portant un intérêt spécifique aux destinations déclarées par dénomination. En ce sens, différentes compilations permettent la visualisation et la caractérisation de la clientèle associée à ces destinations (Trépanier et Chapleau, 1996). Par ailleurs, l'information, transposable sous format html, peut être disséminée sur Internet.
- **Plaquettes municipales** : cet outil informationnel interactif dissémine de l'information sur la socio-démographie et la mobilité, par le rapprochement analytique des données de recensement et des données de l'enquête ménage. Toujours sous une perspective territoriale, différentes feuilles interactives exposent des études multidimensionnelles sur (Chapleau et Morency, 2002) : la caractérisation de la mobilité des personnes résidentes, l'étude des distances de déplacement, l'étude des liens domicile-activités ainsi que l'utilisation détaillée des réseaux de transport en commun selon les autorités garantes.

« Selon notre compréhension, ces instruments contribuent pragmatiquement à l'épuration des interprétations incertaines sur l'état de la mobilité et l'usage des réseaux tout en agissant comme agent de démocratisation et démystification des données de transport » (Chapleau et Morency, 2002)

3.2.2 Systèmes d'information aux usagers

Confrontés à des facteurs contextuels et conjoncturels peu favorables pour le transport collectif (réduction des ressources financières et humaines, étalement urbain, augmentation de la motorisation, etc.), les organismes de transport tentent par tous les moyens de rejoindre et d'assister convenablement leurs usagers, maintenant considérés comme des usagers-clients. Les tactiques usuelles (restructuration et optimisation de l'offre) font maintenant place à la perception et la connaissance du service par les

usagers. En ce sens, l'information transmise aux usagers influence la planification personnelle de leurs déplacements et contribue à l'amélioration de la desserte du service par un usage approprié du réseau. Ce contexte particulier explique, en quelque sorte, l'intérêt des sociétés de transport à investir dans l'élaboration de systèmes d'information aux usagers qui permettent une dissémination d'information juste.

La réalisation et l'établissement de systèmes d'information aux usagers s'appuient sur une connaissance détaillée de la chronomatique et géomatique des réseaux de transport, afin d'assurer une transmission d'information précise et adéquate. D'autant plus que l'utilisateur-client est à même de vérifier la cohérence de l'information, puisqu'il se retrouve dans un environnement spatial et temporel observable (Chapleau, 1995).

MADPREP est l'un des exemples de systèmes d'information aux usagers. Ce dernier assiste les préposés des centres d'appels dans leur travail de réponse aux questionnements des usagers. Par l'entremise d'une interface graphique interactive, les agents accèdent aux différentes sources de données et calculateurs de trajet pour assister et transmettre l'information à l'utilisateur. L'instrumentation du centre d'appels a nécessité un raffinement des outils pour les rendre applicables en temps réel, interactifs ainsi qu'à un niveau de résolution représentatif pour l'utilisateur (Chapleau et al. 1997). Chapleau (1995) expose les raffinements nécessaires :

- « une **géomatique complète** en ce qui concerne les **appellations** faisant référence à toute localisation spatiale (adresses, rues, intersections, monuments et places, employeurs, codes postaux, points de vente des titres de transport, stations et gares)
- une définition du **réseau de transport à géométrie variable** (selon l'heure et la journée du déplacement), spécifié au niveau de l'arrêt d'autobus;
- une définition du **réseau d'accès** (trottoirs et passages piétonniers) permettant un calcul précis de la marche;

- *un algorithme de calcul des plus courts chemins autorisant une spécification des impédances compatibles avec les desiderata de certaines catégories d'usagers;*
- *une appréciation des résultats en termes des horaires planifiés des véhicules en chaque point du réseau, ce qui exige la connaissance d'une « chronomatique » complète des mouvements de véhicules;*
- *une enveloppe à caractère pédagogique facilitant le transfert technologique tout en réalisant de nouveaux liens avec d'autres sources traditionnelles de données (cartes de quartier, horaires de trains etc.) ».*

Autre moyen de disséminer de l'information aux usagers, Internet est rapidement devenu un canal de communication et de marketing privilégié. Avec la venue d'Internet, l'utilisateur adhère au processus d'information, puisqu'il y participe activement par l'entremise des sites informationnels. Cependant, il ne faut pas croire que l'assemblage de sites informationnels se réalise par une transposition simpliste des données opérationnelles sur le Web. À cet effet, Chapleau et al. (2000) mentionnent :

« La seule possession de ces données, si nombreuses et disponibles soient-elles, ne suffit pas au montage d'un site Web informationnel puisque leur structure et leur forme n'ont pas été prévues à cet effet. En outre, le chaos informationnel risque d'être amplifié par la présence, dans l'entreprise, de systèmes logiciels particuliers, étanches aux échanges informationnels et conséquemment contraires aux préoccupations d'intégration cohérente et de proprioception appliquée. »

Bref, le montage d'un site informationnel nécessite des procédures systématiques qui permettent de récupérer, transformer, emmagasiner et publier les informations sur Internet. À cet effet, le Groupe MADITUC a participé aux efforts méthodologiques pour le montage de systèmes d'information aux usagers sur plate-forme Web (SIUW). On peut penser à Tous Azimut (STM), Infomit (AMT), Itinéraires (STL). Ces sites comportent l'information usuelle sur l'offre de service planifiée, généralement publiée

sous format papier par les organismes de transport (carte du réseau, horaire par ligne d'autobus, tarification, etc.). Ce type d'information se retrouve sur des pages appelées statiques où les requêtes de l'utilisateur dans la base de données produisent et réalisent la mise en forme automatique de l'information demandée. Par ailleurs, des pages dynamiques permettent l'interactivité entre l'utilisateur et son besoin d'information précise sur un itinéraire envisagé. Essentiellement, ces pages dynamiques comportent les fonctionnalités suivantes décrites plus en détails dans la publication de Chapleau et al. (2000):

- *« calcul d'accès à un réseau de transport collectif basé sur le réseau de marche;*
- *fonctions de recherche avancée dans la base de données à références spatiales;*
- *carte interactive munie de fonctions d'affichage circonstancié de l'information;*
- *accès rapide à l'information par l'utilisation de repères nominatifs;*
- *utilisation des fonctionnalités de navigateurs Web (cookies, signets);*
- *fonction d'affichage graphique (traçage sur un fond de carte d'un circuit);*
- *application de méthodes interactives de calcul de trajets »* (suggestion d'itinéraires selon les circonstances du déplacement : origine, destination, heure, date, pénalités de marche et utilisation ou non du métro et du train).

Ce type d'outil informationnel ouvre de nouvelles perspectives pour l'analyse de la demande en transport (Trépanier et al. 2003 et 2005). En effet, l'étude détaillée des journaux des sites informationnels sur Internet, autre que l'achalandage du site et de ses pages, dévoile des tendances en désir de déplacements. De ce fait, la collecte des déclarations effectuées par les internautes sur un déplacement planifié (origine, destination, heure de déplacement, séquence des arrêts et lignes) permet l'analyse de la demande en transport. Outre l'étude comportementale des usagers, l'examen des paramètres de recherche dans les bases de données territoriales et des erreurs rencontrées peut permettre l'amélioration des systèmes d'information géographique de référence. Comme Trépanier et al. (2005) le mentionnent, cette analyse des journaux des calculateurs sur Internet comporte des limitations. Parmi celles-ci, ce type d'outil rejoint

seulement la population ayant accès et familière à Internet. Par ailleurs, l'utilisateur peut effectuer plusieurs calculs pour un déplacement planifié sans toutefois le réaliser dans la réalité. Il est observé que ces sites Internet subissent une croissance d'achalandage rapide et permettent de rejoindre une clientèle non considérée dans les enquêtes ménages : les touristes.

Carte interactive et recherche avancée

Tous azimuts

Origine : POLYTECHNIQUE EDIFICE PRINCIPAL (UNIVERSITE) (MONTREAL)

Destination: VILLE MARIE (PLACE) (MONTREAL)

Journée du parcours : lundi - 27/06/2005

Minimiser la marche à pied : ☒ Oui ☐ Non

Heure souhaitée* : 08 h 00

Utilisation du métro : ☒ Oui ☐ Non

Utilisation du train : ☐ Oui ☒ Non

Calculer le parcours

Options par défaut

Suggestion de parcours

Origine: POLYTECHNIQUE EDIFICE PRINCIPAL (UNIVERSITE) (MONTREAL)
 Destination: VILLE MARIE (PLACE) (MONTREAL)
 Jour: 27/06/2005, Heure d'arrivée demandée: 8h00
 Péroriser la marche: oui, Métro actif: oui, Train actif: non
 Durée du parcours: 42 minutes

Heure (dep.)	DE	Marche	Heure (arr.)	A
7h17	POLYTECHNIQUE EDIFICE PRINCIPAL (UNIVERSITE) (MONTREAL)	Marche sur 1425 mètres	7h38	Côte-des-Neiges / Queen-Mary
7h38	Côte-des-Neiges / Queen-Mary	535 Voie réservée Du Parc / Côte-des-Neiges dir. Est	7h57	René-Lévesque / Mansfield
7h57	René-Lévesque / Mansfield	Marche sur 150 mètres	7h59	VILLE MARIE (PLACE) (MONTREAL)

Figure 3.6: Fenêtres du système d'information aux usagers Tous Azimuts (réalisée à partir de www.stm.info)

3.2.3 Systèmes d'information géographique transport

Les systèmes d'information géographique (SIG) se distinguent principalement des autres systèmes informationnels par le caractère spatial des données manipulées. En effet, comparativement aux systèmes de gestion des bases de données conventionnels, les données associées aux SIG font référence à une description spatiale d'un lieu précis sur

la surface de la terre (Thill, 2000). Subséquemment, un SIG est défini comme un système qui intègre une interface graphique, un système de gestion de bases de données, et des outils de modélisation spatiale, permettant la géocodification, la collecte, la manipulation, la visualisation, la dissémination, ainsi que l'analyse de l'information à caractère géographique et des attributs associés (Dueker et Ton, 2000). Dans l'optique de modéliser des phénomènes réels, l'information spatiale est décrite géographiquement par des entités topologiques spécifiques (point, ligne, surface). De plus, chaque objet spatial est caractérisé par des données alphanumériques structurées en bases de données. L'organisation de ces données spatiales, sous formes de couches superposables, ainsi que la modification des propriétés des entités, permet la visualisation, sous différentes formes et perspectives, de phénomènes spatiaux. L'introduction de données ainsi que de fonctionnalités propres aux problématiques de transport (modélisation d'un réseau, calculateur de chemins, etc.) s'inscrit dans la dénomination d'un système d'information géographique transport (SIG-T) (Miller et Shaw, 2001).

L'approche informationnelle totalement désagrégée accorde une place importante à la spatialisation des objets et lieux impliqués dans la description du système de transport (générateurs de déplacements, géométrie des réseaux, adresses, codes postaux, intersections, découpages territoriaux, etc.). La collecte, la géocodification, la mise à jour, le traitement, la visualisation ainsi que la dissémination de ces données spatiales requièrent un encadrement précis, offert par les systèmes d'information géographique. C'est par l'intermédiaire de ces SIG-T, qui gravitent autour du système MADITUC, que l'analyse spatiale, la validation des déclarations lors de l'enquête et le raffinement des calculateurs de trajets sont rendus possibles. *« Un logiciel destiné au transport ne saurait faire abstraction de l'utilisation du sol et des géoréférences dans l'accomplissement de ses fonctions de planification, d'information, de modélisation ou de simulation. »* (www.sti.transport.polymtl.ca)

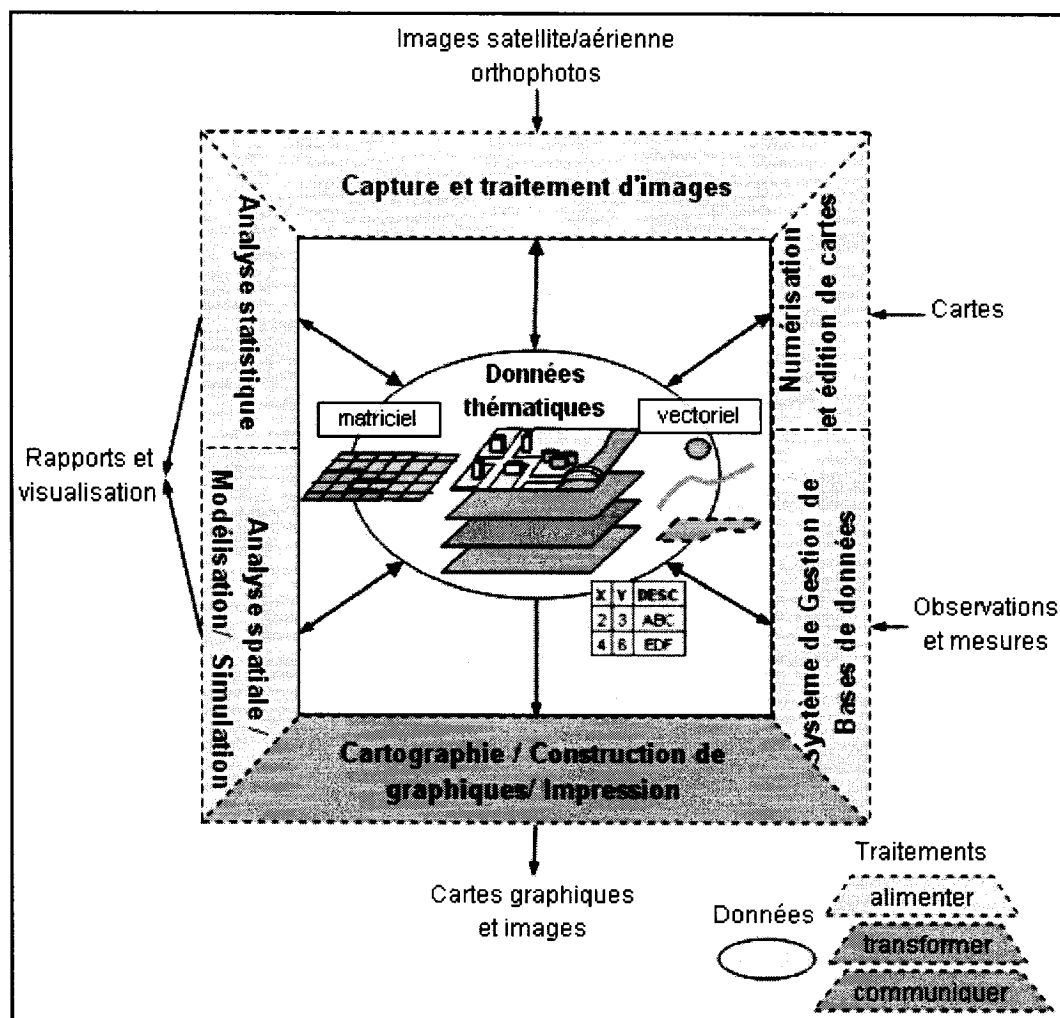


Figure 3.7: Fonctionnalités et concepts d'un système d'information géographique (inspiré de Thériault, 1996)

3.2.4 Systèmes d'information opérationnels

Au prise avec la gestion opérationnelle des réseaux, les organismes responsables veulent, a priori, connaître les ressources requises pour un niveau de service précis. En plus de cette préoccupation pour l'établissement de l'offre, les systèmes d'information opérationnels interviennent comme lien informationnel pour la caractérisation des réseaux, la gestion du mobilier (arrêts et abris d'autobus), la minimisation des itinéraires improductifs (véhicule à vide) ainsi que l'optimisation de parcours (déneigement, collecte d'ordures).

Chapitre 4 : Modélisation du réseau piétonnier protégé

Les représentations actuelles de la ville intérieure se limitent à une forme cartographique 2D conventionnelle, imprégnée aux éléments structurants du quartier centre de Montréal. En effet, lorsqu'on observe les différentes cartes proposées, le réseau protégé est intégré dans le contexte urbain du centre-ville par une projection 2D de ses différents étages. Ce type de représentation reste à la fois simple et pratique pour une appréciation globale des liaisons entre les édifices. Cependant, la complexité intrinsèque et tridimensionnelle reste négligée. Les différents niveaux, les multiples corridors et les différentes possibilités de cheminements ne sont pas représentés par ces schématisations graphiques. Lorsqu'on s'intéresse à un problème de planification et d'analyse des transports, on aborde un problème méthodologique d'un autre ordre. La conceptualisation d'un réseau de transport, qui représente l'ensemble complexe des mouvements possibles pour les usagers (automobilistes, usagers du transport en commun, piétons, cyclistes, etc.), demeure un défi méthodologique difficile. *«Transportation network data is complex since it is often multi-modal, exists across many different jurisdictions and has different logical views depending on the particular user or stakeholder.»* (Miller et Shaw, 2001). La modélisation du réseau piétonnier de la ville intérieure ne fait pas exception par son rôle d'interface modale, sa juridiction privée et multiple, ainsi que ses changements d'élévations non négligeables pour des usagers qui se déplacent à pied.

Dans cet ordre d'idée, le présent chapitre expose la méthodologie pour l'élaboration d'une géomatique décrivant les voies de circulations piétonnières de la ville intérieure de Montréal. Pour ce faire, une brève revue des différentes approches de modélisation en données spatiales des réseaux de transports est présentée. Cette dernière permet de positionner la problématique et le défi méthodologique face à l'élaboration d'un réseau analytique de la ville intérieure. Par la suite, la conceptualisation de la ville intérieure en

un réseau filamenteux est exposée pour finalement présenter une méthode de visualisation en réalité virtuelle, par l'entremise d'un langage de représentation tridimensionnelle.

4.1 Réseaux: modélisation et SIG-T

L'analyse de l'offre et de la demande d'un système de transport dépend de la représentation spatiale de ce dernier. Pour ce faire, le réseau réel ou logique se doit d'être symbolisé par un « réseau mathématique », dans l'optique d'une modélisation des déplacements.

4.1.1 Schématisation mathématique

La topologie de tout réseau de transport peut être représentée symboliquement sous forme d'un graphe (G). Cette schématisation se base sur une branche des mathématiques: la théorie des graphes. La finalité première d'un graphe est de préciser la structure, la nature ainsi que la connexité d'un ensemble complexe, en exprimant les relations entre ses éléments. Il s'agit d'une méthode de pensée afin de modéliser un ensemble de relations. À la base, un graphe ne représente pas l'apparence réelle d'un réseau, mais sa topologie. Ce processus de modélisation s'appuie, dans un premier temps, sur l'élaboration de la liste des noeuds (N) qui consistent, pour un réseau de transport, en tout point d'intersection ou de terminaison (origine ou destination) du réseau. En somme, il s'agit d'une abstraction d'un lieu, tels un arrêt d'autobus, une station de métro, une intersection de rue, etc. Dans un second temps, la dérivation des liens (L), à partir des noeuds, permet la représentation de la connexité ainsi que de l'interaction ou du mouvement possible entre les noeuds. Généralement, un réseau de transport est représenté par un graphe orienté, pour représenter les mouvements directionnels (sens unique, tracé des autobus, etc.). Ces liens peuvent représenter des relations physiques (exemple : rues, lignes de métro) ou logiques (exemple : corridors aériens entre deux villes). À ces entités se greffent des attributs qualitatifs ou quantitatifs

afin de représenter respectivement le caractère propre à certains objets et la faisabilité (sens unique) ou la pénibilité du déplacement sur le lien (impédance : distance, temps). L'appartenance de ces attributs aux entités différencie le réseau d'un graphe.

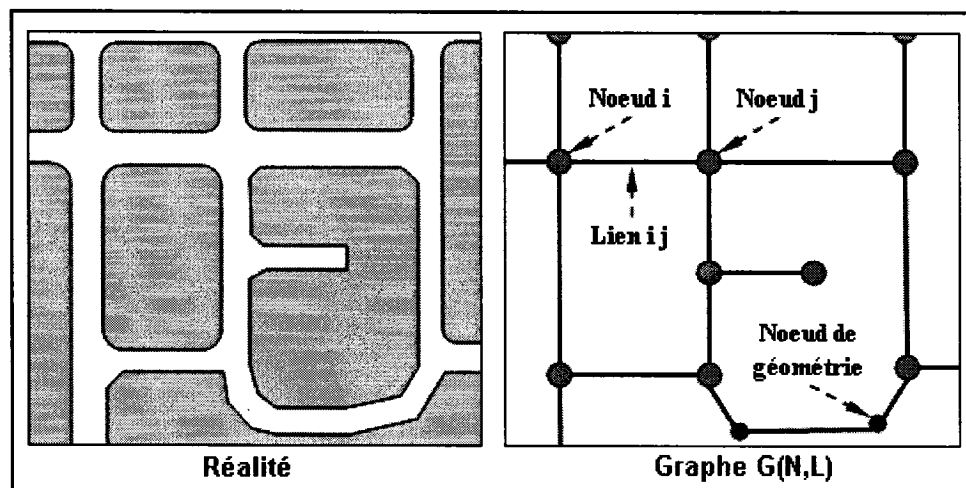


Figure 4.1: Représentation d'un réseau de transport en graphe

Bien que les graphes demeurent une schématisation mathématique, ceux-ci peuvent devenir un moyen d'appréhender le réel lorsqu'on y incorpore des références géographiques et des noeuds indiquant les limites géométriques du réseau. Ainsi, le réseau représente le plus fidèlement la réalité tant au niveau topologique que géographique (Figure 4.1). Par l'ajout de ces noeuds de géométrie, la modélisation s'intègre dans des systèmes d'information géographique où d'autres couches d'informations peuvent être combinées et ainsi permettre la visualisation de cartes géographiques ou de tout autre phénomène relié aux réseaux de transport.

4.1.2 Utilités

Comme le mentionne Rodrigue (2004), on recense quatre grandes utilités à la modélisation des réseaux de transport: la topologie, la cartographie, le géo-référencement ainsi que le cheminement et l'assignation.

- **Topologie** : La finalité première d'un graphe reste la représentation schématique des relations existant entre les différents lieux. Bref, le bien-fondé réside en la

représentation de la topologie du réseau par l'entremise des lieux d'activités, directions et connexités.

- ***Cartographie*** : Par l'intermédiaire d'une modification des propriétés ou de l'attribution de symboles aux différentes entités (noeuds, liens) du réseau, il demeure possible d'élaborer une carte géographique. Pour ce faire, la structuration des données doit intégrer des attributs alphanumériques pour chacune des entités, afin de permettre une représentation symbolique et caractéristique (largeur, couleur, etc.) du type de voie de circulation.
- ***Géocodification*** : La modélisation d'un réseau permet la dérivation d'une géolocalisation selon un système à références linéaires (voir section 4.1.3). Ce type de système implique l'association d'attributs référentiels aux liens. Par exemple, un lien modélisant un segment de rue comporte les adresses civiques de début et de fin pour permettre la localisation précise d'un édifice ou d'une résidence, par l'entremise d'une interpolation linéaire entre les bornes de début et de fin.
- ***Cheminement et assignation*** : La modélisation des réseaux de transport offre la possibilité d'effectuer des calculs de chemins, d'assister un système de navigation et d'assigner des déplacements sur le réseau. Ce type d'utilité requiert une topologie stricte assurant la connexité de tous les éléments du réseau. L'ajout d'attributs, sur les liens et/ou noeuds, permet l'imputation de facteurs d'impédances pour le calcul de chemin et l'affectation sur le réseau. À cet effet, plusieurs algorithmes permettent ce type de calcul, le plus couramment utilisé étant celui de Dijkstra (1959). Par ailleurs, différents problèmes d'optimisation peuvent être résolus par l'entremise d'une modélisation en réseau. Entre autre, on peut noter le problème du postier chinois (tourné optimale qui visite tous les liens) et du commis voyageur (tourné optimale qui visite une suite de noeuds).

4.1.3 Structuration des données

La conceptualisation d'un réseau, qui représente l'ensemble complexe des mouvements possibles pour un usager, demeure un défi méthodologique difficile. Pour se déplacer d'une origine à une destination, à un moment précis de la journée, l'utilisateur emprunte différents modes et réseaux de juridictions distinctes. L'utilisateur se déplace dans l'espace-temps selon des contraintes contextuelles. Il devient impératif d'incorporer ces contraintes dans la modélisation du réseau, afin de traiter le déplacement le plus fidèlement possible. Pour ce faire, une abstraction d'une situation réelle est réalisée par un modèle de données, composante intrinsèque d'un système d'information. Comme le mentionnent Miller et Shawn (2001), les modèles de données comportent trois éléments. En premier lieu, la base de données se compose d'objets ou entités qui forment les piliers de la structure. En second lieu, des règles générales d'intégrité contraignent l'occurrence d'entités identiques dans la base de données. Finalement, des opérateurs peuvent être appliqués aux différents objets.

4.1.3.1 Modèle relationnel

Le modèle le plus couramment utilisé dans les systèmes d'information géographique pour schématiser un réseau demeure la modélisation noeuds liens par bases de données relationnelles (Miller et Shawn, 2001; Rodrigue, 2004). Cette structuration se fonde sur deux bases de données, essentiellement dressées de la façon suivante :

- ***Table des noeuds*** : cette base de données décrit l'ensemble des noeuds du réseau et contient au minimum trois champs; identificateur unique ainsi que la paire de coordonnées (X, Y) du noeud;
- ***Table des liens*** : cette base de données définit la liste des liens, à partir de la table des noeuds pour assurer la connexité, et comporte les champs essentiels suivants: identificateur unique du lien et identificateurs du noeud d'origine et de destination.

Afin de répondre à différents problèmes reliés aux calculs de chemins ou à la visualisation de cartes, les bases de données peuvent être enrichies par l'intermédiaire d'attributs supplémentaires (direction, classe des routes, type de localisation, capacité, vitesse à écoulement libre, nombre de voies de circulation, etc.).

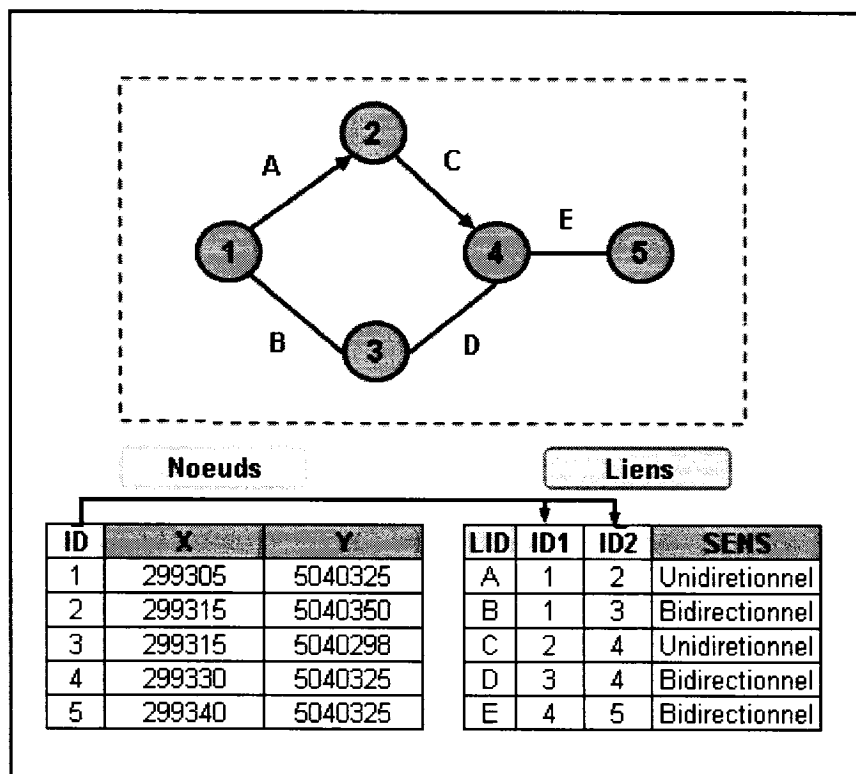


Figure 4.2: Bases de données relationnelles d'un réseau (inspirée de Rodrigue et al. 2004)

4.1.3.2 Réseau planaire et table de virage

La majorité des fonctions topologiques des SIG s'estiment selon une représentation planaire d'un réseau, afin d'assurer l'intégrité de connexité lors de l'étape de la codification. Ce type de représentation assure la consistance topologique par la création d'un noeud à tous les croisements de liens. Cependant, un réseau planaire limite la modélisation des réseaux de complexité plus étendue. Par exemple, un passage à niveau d'une route nécessite l'utilisation d'une représentation non planaire pour assurer la

connexité réelle (Figure 4.3). Bref, un réseau planaire peut seulement symboliser un réseau sur un plan 2D et ne permet pas la superposition de mouvements conflictuels. Afin d'intégrer ce type d'éléments, un assouplissement de la contrainte d'un réseau planaire est requis.

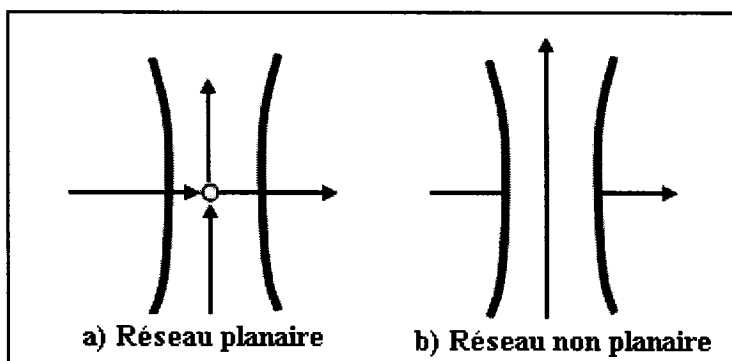


Figure 4.3: Représentation d'un réseau planaire versus un réseau non planaire (d'après Goodchild, 1998)

Toutefois, cet assouplissement ne parvient pas à résoudre toutes les restrictions de mouvements. À cet effet, certains virages à une intersection sont plus onéreux ou tout simplement impossibles. Par exemple, il est reconnu que le virage à gauche est plus difficile par le croisement de flux conflictuels qu'un tournant à droite. L'ajout d'un lien, pour chaque virage possible à une intersection, alourdit considérablement les bases de données. Pour y remédier, l'addition d'une table de virage permet de contrer cette problématique tout en conservant une modélisation où un noeud unique caractérise une intersection (Figure 4.4). De cette façon, la table de virage permet l'incorporation d'impédances pour les déplacements qui impliquent un tournant à l'intersection. Ce type de modélisation est souvent utilisé dans les systèmes de navigation intégrés à bord de véhicules. Un autre moyen de modéliser cette pénalité ou interdiction de virage réside en la hiérarchisation des rues. En effet, le fait de passer d'une classe de rue à une autre peut intervenir dans le calcul de chemin.

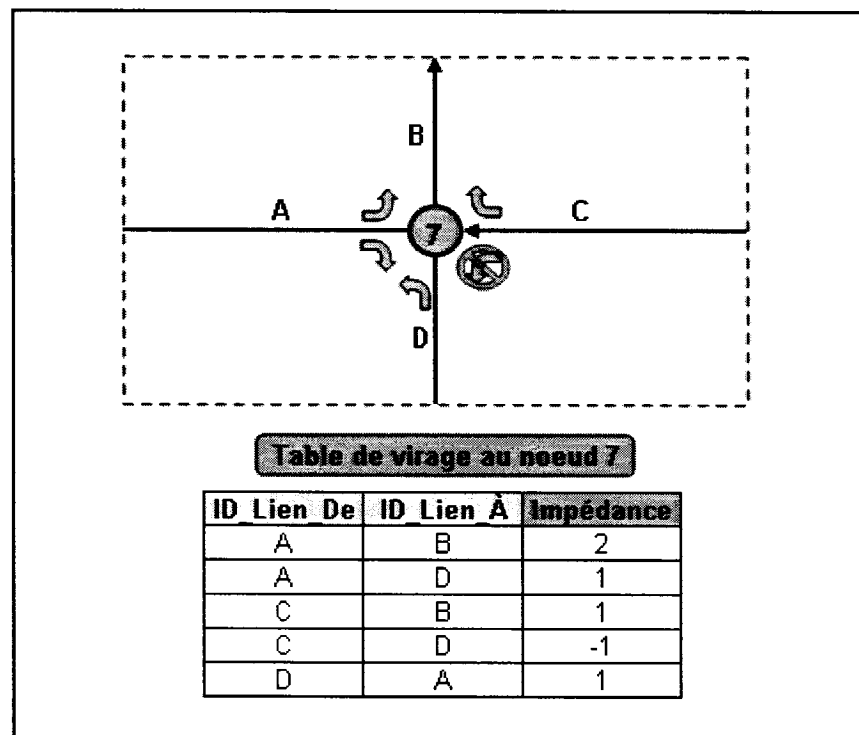


Figure 4.4: Modélisation des restrictions de virage aux intersections

4.1.3.3 Modèle à référence linéaire et segmentation dynamique

Le modèle relationnel en noeuds et liens pose comme hypothèse l'homogénéité des propriétés tout au long d'un lien. Le seul moyen de représenter un changement de propriété (ponctuel ou linéaire) sur un lien est l'ajout d'un ou deux noeuds intermédiaires. De ce fait, l'avènement d'une propriété ponctuelle peut être simplement représentée par l'ajout d'un nouveau noeud qui partage le lien initial en deux nouveaux. La segmentation par l'annexion de noeuds/liens dans les bases de données respectives augmente rapidement la complexité de mise à jour et implique éventuellement une gestion impossible (Goodchild, 1998). C'est ici qu'intervient le modèle à référence linéaire qui est reconnu comme un avancéement notable dans le domaine des SIG-T (Nyerges, 1990). Ce type de modélisation soutient de multiples fonctionnalités dans divers domaines d'application, qui nécessitent le positionnement ou l'attribution de caractéristiques le long ou à un lieu précis d'un réseau de transport. Ce système s'appuie

sur trois composantes (Sutton, 1997): le réseau de transport décrit selon un modèle noeuds/liens, la méthode de référence linéaire ainsi que des points de références. La méthode de référence permet le positionnement d'une localisation, ponctuelle ou linéaire, sur le réseau, à partir de points connus (points d'ancrage). Un exemple très répandu d'un système de référence linéaire est le chaînage des voies de circulation où tout élément peut être géolocalisé en relation avec le point d'origine ou une borne.

Le recensement spatial d'événements, de lieux ou de caractéristiques sur un réseau, peut s'effectuer par l'élaboration d'une base de données connexe qui conserve les localisations en relation avec le réseau (figure 4.5). Ce type de géopositionnement peut s'effectuer et être implanté automatiquement par une fonctionnalité courante dans les SIG : la segmentation dynamique (Nyerges, 1990). Cette fonctionnalité effectue la segmentation automatique des liens pour l'intégration et le géoréférencement relatif des événements sur le réseau.

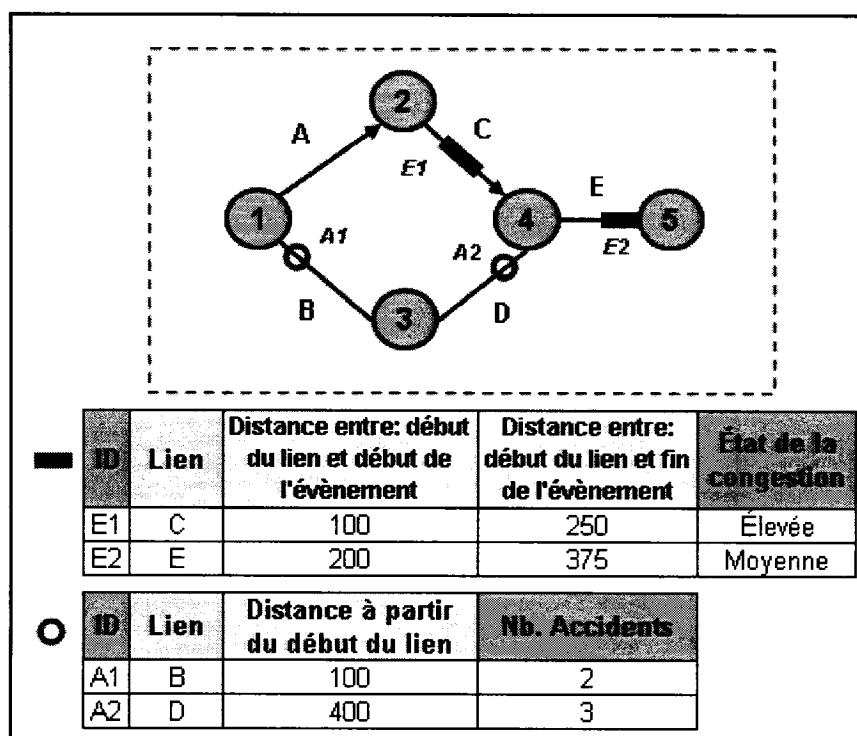


Figure 4.5: Localisation d'évènements par référence linéaire sur un réseau (inspirée de Goodchild, 1998)

Un moyen conventionnel pour désigner un lieu sur un territoire est d'indiquer l'adresse civique. Ce système de références respecte une logique, sensiblement uniforme sur l'ensemble d'une municipalité, par la segmentation des numéros pairs et impairs sur chaque côté des voies de circulation. Par l'alliance des numéros civiques de début et de fin pour chaque lien, il est possible, par interpolation linéaire, de géolocaliser une résidence ou un édifice par l'entremise de son adresse civique. Il est à noter que la toponymie complète des voies de circulation intervient pour ce type de géoréférencement. En effet, le nom « René-Lévesque », le type « boulevard », la direction « Ouest » et la municipalité « Montréal » rattachés à la voie de circulation se doivent d'être incluses, selon un format standardisé, pour un géopositionnement fiable.

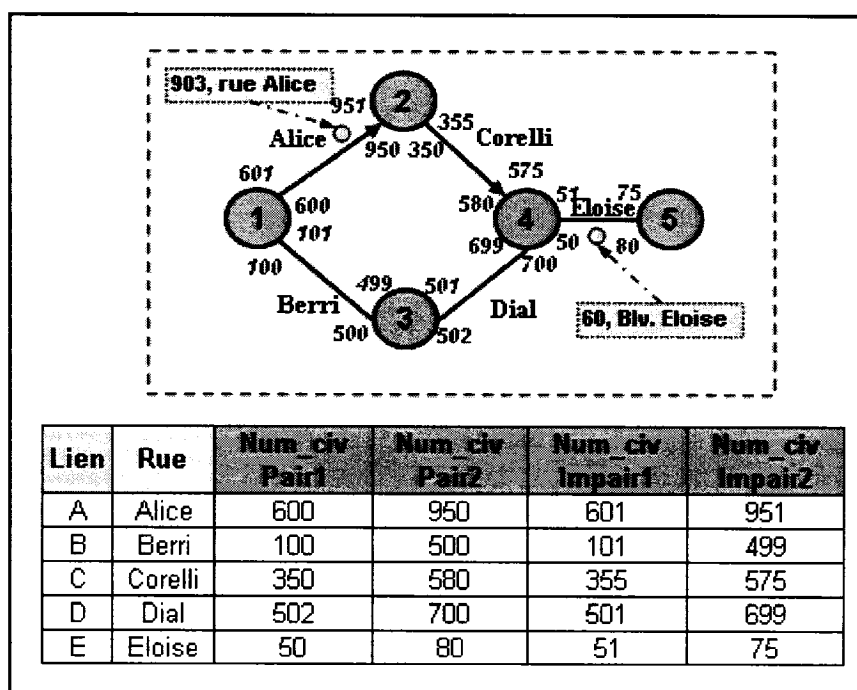


Figure 4.6: Géolocalisation par adresse civique

4.1.4 Niveau de résolution

Une conceptualisation en données spatiales résulte d'une généralisation de la réalité dans le but de clarifier et de faciliter la compréhension de ce phénomène physique. Ce processus peut varier considérablement d'un système d'information géographique à un autre, selon la finalité recherchée, l'utilisateur visé, ainsi que le personnel qui établit cette abstraction. Lorsque le même phénomène est représenté différemment, l'échange de données reste un défi considérable. Han et al. (2003) élaborent un cadre conceptuel pour l'échange de ces modélisations de données (Figure 4.7). Ce schéma est repris ici afin d'illustrer les niveaux de résolution, ainsi que les différentes dimensions à considérer pour tenir compte de la durée de vie utile du système et des possibilités d'échange de données.

Or, un phénomène réel peut être représenté à un niveau d'abstraction donné. Pour rendre une conceptualisation la plus proche de la réalité, les données spatiales deviennent de plus en plus complexes, mais précises. Parallèlement, l'utilisateur et l'utilité concordent avec le niveau de résolution. Par exemple, le gouvernement fédéral peut s'intéresser aux mouvements entre les villes et miser sur un réseau routier dans lequel les villes sont symbolisées par des nœuds et où seules les autoroutes sont considérées comme liens de circulation. À l'opposé, la réalisation d'un système de navigation à bord d'un véhicule privé s'appuiera sur une géomatique du réseau de voirie la plus fine possible. En ce sens, la conceptualisation misera sur l'ensemble des voies de circulation (autoroutes, collectrices, ruelles), contraintes (vitesses limites, sens uniques, droits de virages), et localisation des lieux importants (hôtels, stationnements, générateurs, etc.), pour fournir à l'utilisateur l'information la plus représentative de la réalité sur le terrain. De surcroît, l'aspect temporel reste une variable prépondérante. En effet, une conceptualisation se doit de prendre en considération qu'un système de transport reste un objet dynamique par la constante évolution de ses infrastructures (nouvelle ligne de bus, changement de tracé, nouvelles voies de circulation, etc.) et de ses propriétés (chronomatique des voyages, états de congestion, etc.).

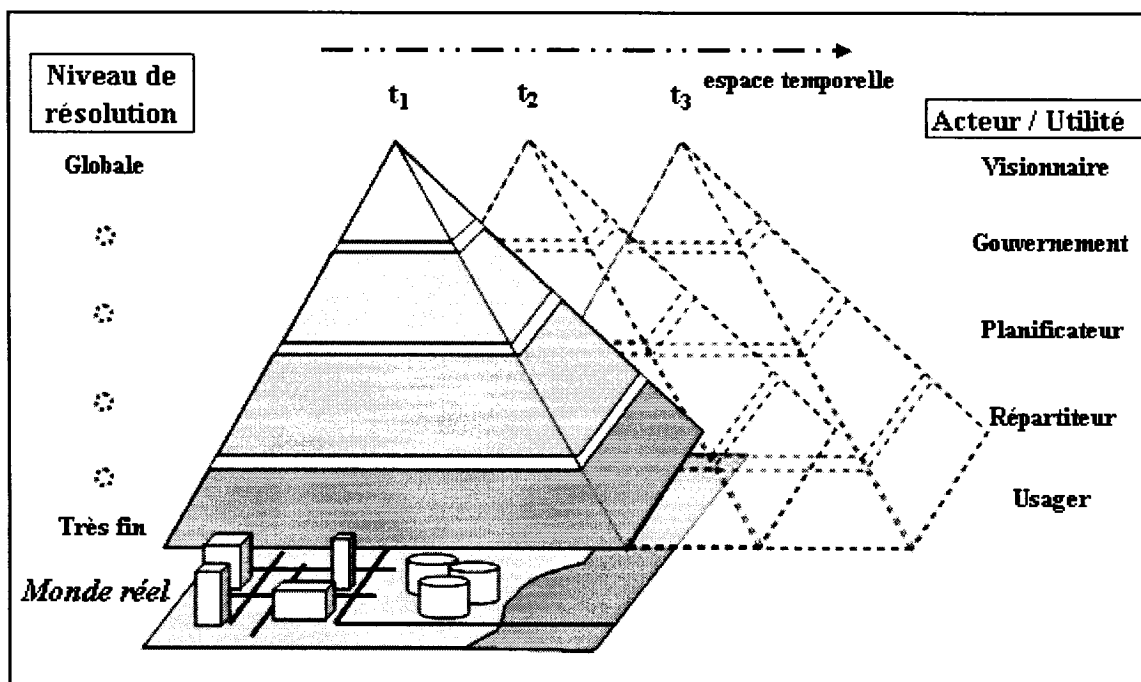


Figure 4.7: Cadre conceptuel du niveau de résolution (adaptée de Han et al. 2003)

Ce cadre conceptuel de résolution se retrouve dans toutes les modélisations du monde réel. À cet effet, le réseau de transport en commun peut être représenté à des niveaux de résolution distincts selon l'application et l'utilité recherchée. En ce sens, Trépanier (1999) souligne que la modélisation des réseaux de transport collectif s'est raffinée au cours des années grâce à l'approche totalement désagrégée, permettant ainsi le rapprochement aux préoccupations évolutives en planification des transports urbains. Essentiellement, Trépanier (1999 et 2001) expose les différents niveaux de résolution pour la modélisation du réseau de transport collectif montréalais sous quatre formes : code HASTUS, noeud MADITUC, à l'arrêt d'autobus et à la projection intégrale sur le réseau de voirie.

Décrit initialement comme un réseau opérationnel, le réseau de transport en commun peut être conceptualisé au niveau du code HASTUS permettant ainsi la dérivation des assignations des chauffeurs et la définition non spatialisée des différents voyages. Ce code, emprunté dans la Grande Région Métropolitaine de Montréal, représente le tracé

des lignes uniquement par le positionnement des points de contrôle qui décrivent le lieu et l'heure de passage planifiés pour les différents voyages.

Pour sa part, la modélisation MADITUC induit un raffinement par l'introduction du noeud MADITUC. Ce noeud représente, spatialement, tout lieu de correspondance pour les usagers. Comme illustré à la Figure 4.8, le croisement de deux lignes d'autobus à une intersection (a) génère huit possibilités de mouvements pour les usagers qui effectuent une correspondance à cette intersection (b). Pour modéliser analytiquement ces mouvements, huit noeuds et douze liens sont nécessaires (c). La grande quantité de données nécessaires pour assurer la schématisation explicite de ces correspondances engendre une lourdeur inappropriée pour des systèmes de calcul. Ainsi, le noeud MADITUC (d) dissimule ces interactions par un noeud unique où les mouvements de correspondance sont considérés de manière implicite. En plus des noeuds de correspondance, des noeuds de géométrie interviennent pour raffiner la schématisation spatiale du réseau.

À un autre niveau, l'intérêt de gérer les arrêts comme entités physiques nécessite la considération spatiale de l'ensemble du mobilier. Cette modélisation fine, pour l'entretien et la mise à jour des informations sur les panneaux des arrêts, n'assure pas la connexité entre les lignes et ne permet pas la représentation des correspondances aux arrêts.

Finalement, le réseau d'autobus peut être représenté par sa projection sur le réseau de voirie. Cette modélisation permet une représentation spatialement plus proche de la réalité des usagers, par l'intégration de tous les types de noeuds précédemment décrits. La transposition sur le réseau de voirie permet ainsi d'obtenir des fonctionnalités telles que le calcul d'accès au réseau, ou le calcul de chemin pour les véhicules et les usagers. Ce type de modélisation a entre autre permis la réalisation du système INTERLIGNE qui permet l'optimisation des déplacements à vide des autobus.

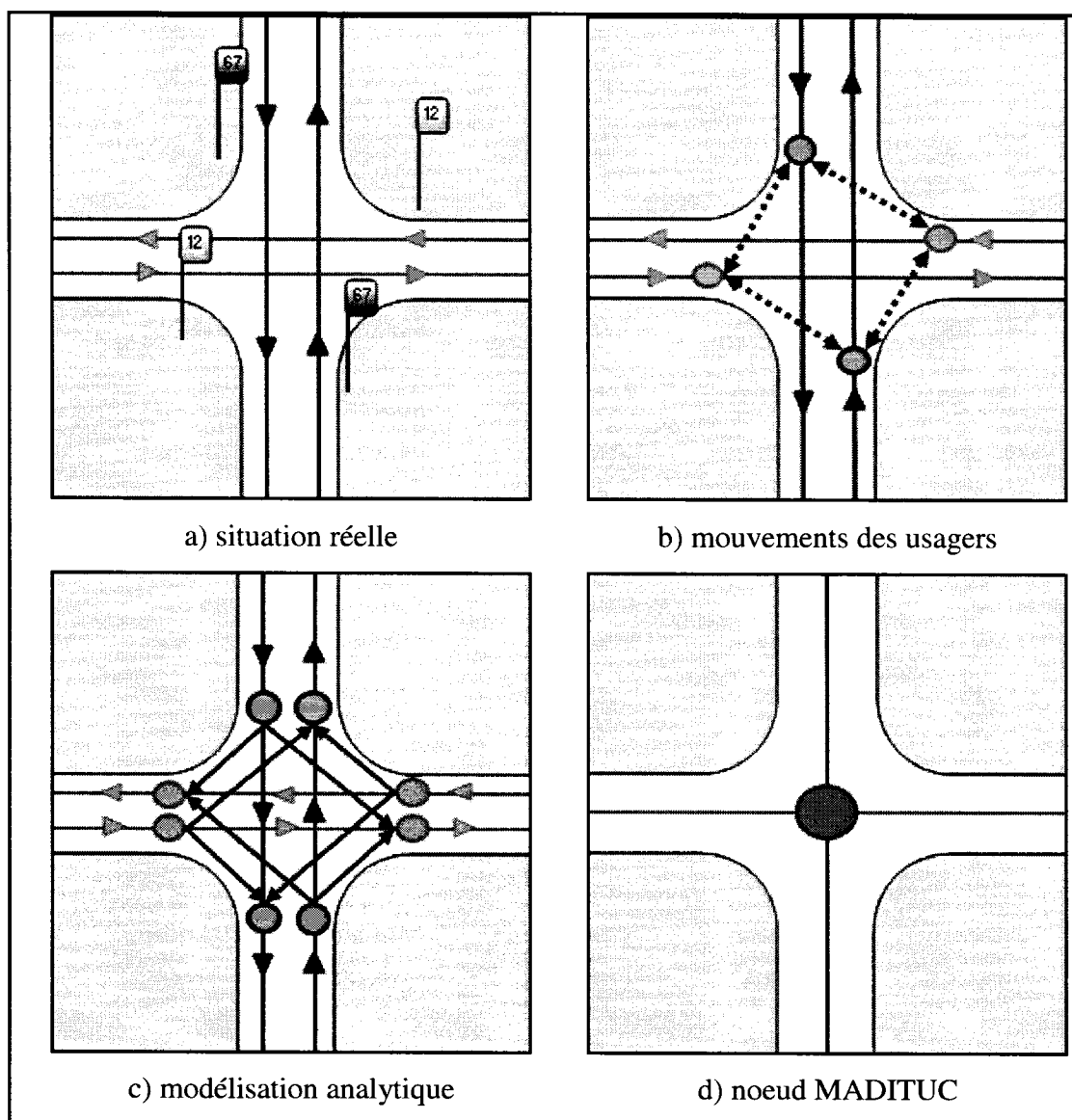


Figure 4.8: Schématisation d'une intersection en transport en commun (inspirée de Chapleau, 1974)

À juste titre, le réseau de la ville intérieure peut être représenté à différents niveaux de résolution. Au niveau le plus grossier, les noeuds distinguent les édifices et les liens établissent l'existence d'une connexité entre les immeubles reliés par un corridor piétonnier. En revanche, ce même réseau peut être défini plus finement pour ainsi

représenter l'ensemble des cheminements possibles à l'intérieur de la ville souterraine. Différentes utilités peuvent être envisagées telles : l'affectation et l'estimation des débits piétonniers sur l'ensemble des liens du réseau, le calcul de chemins selon des facteurs d'impédance et de préférence de l'utilisateur ainsi que la visualisation des cheminements réels. C'est à ce dernier niveau de résolution que le présent projet s'intéresse, par la création d'une géomatique filamenteuse en nœuds et liens.

4.2 Problématique de la ville intérieure

La modélisation du réseau piétonnier protégé implique de nouvelles considérations dans la conceptualisation des mouvements des usagers. Cinq aspects interviennent dans la modélisation et la codification du réseau piétonnier intérieur : la juridiction du réseau, la tridimensionnalité inhérente, le type d'utilisateur qui l'emprunte, l'absence de références spatiales structurées ainsi que la présence de configurations non linéaires et de mobiliers urbains.

4.2.1 *Juridiction*

Pour tout réseau de transport, différentes juridictions interviennent. Au niveau routier, on distingue les routes nationales, provinciales, municipales ainsi que les chemins privés. Pour sa part, le réseau de transport en commun est géré par différents organismes de transport sur des territoires géopolitiques précis. Ces multiples juridictions imposent une tarification, une réglementation ainsi qu'un niveau de service propre à chacun, mais le réseau reste accessible à tous les citoyens.

En ce qui a trait à la ville intérieure, elle est considérée comme un réseau sous juridiction majoritairement privée et multiple (propriétaires des immeubles et Société de Transport de Montréal pour les stations de métro). Chaque propriétaire demeure l'unique responsable du sous-sol attenant, hormis les passages piétonniers sous les servitudes municipales. Le réseau souterrain est souvent considéré public par son accès direct aux

stations de métro et des gares. Cependant, les propriétaires des immeubles sont responsables de la sécurité, de la signalisation, des droits d'accès et de la réglementation dans leur propriété. C'est pourquoi, certains corridors sont interdits au public. Par exemple, le corridor qui relie le Complexe Desjardins à la tour d'Hydro-Québec est contrôlé par carte magnétique autorisant seulement les travailleurs de cette entreprise. Dans le même ordre d'idées, les heures d'ouverture ainsi que les règlements diffèrent d'un édifice à un autre. Néanmoins, les heures d'ouverture correspondent généralement à celles du réseau de métro. Par ailleurs, dans la conjoncture actuelle, l'accessibilité à des données de localisation (plans d'architecture des sous-sols) reste ardue face à cette juridiction privée et multiple.

4.2.2 Tridimensionnalité

Les représentations et modélisations actuelles des réseaux de transports ne tiennent pas compte de la troisième dimension, plutôt négligeable dans l'analyse des déplacements motorisés. Cependant, le caractère tridimensionnel de la ville intérieure demeure un élément inhérent pour la considération et la représentation de cheminements piétonniers. Comparativement aux véhicules motorisés, le piéton est fortement influencé par l'effort physique demandé pour se déplacer sur une voie inclinée ou l'emprunt d'un escalier. « *Pedestrian activity occurs as a function of physical and behavioural characteristics that influence individual travel decision.* » (Shriver, 1997).

Par ailleurs, la superposition de différents niveaux implique la considération de la troisième dimension et par le fait même l'assouplissement de la contrainte d'un réseau planaire pour la modélisation en graphe. En effet, les piétons se déplacent sur le plan horizontal et accèdent à différents étages par des déplacements verticaux réalisés par l'intermédiaire d'escaliers ou d'ascenseurs, pour ensuite poursuivre leur chemin. De plus, la profondeur caractéristique des stations de métro montréalaises, relativement au niveau de rue, engendre des différences d'élévations non négligeables pour un usager qui se déplace par la marche. Par exemple, entre la mezzanine de la station Bonaventure

et le niveau de la rue, il existe une dénivellation verticale d'environ 22,6 mètres. Bref, la modélisation du réseau de la ville intérieure se doit d'incorporer la troisième dimension (coordonnées x, y, z) lors de l'étape de la codification.

La modélisation 3D de réseaux piétonniers a fait état de travaux récents grâce aux technologies informationnelles supportées par des systèmes d'information géographique 3D. En ce sens, l'implantation expérimentale d'un réseau tridimensionnel des corridors d'immeubles à étages multiples aux géobases traditionnelles de réseau 2D a été réalisée (Kwan et Lee, 2005). La finalité de ce projet est de concevoir un système d'information et de navigation pour gérer et améliorer l'évacuation des occupants en situation de crise. Ce système vise à calculer et représenter le chemin le plus rapide pour les services de sécurité, selon les obstacles à caractère événementiel qui obstruent certains passages. À cet effet, Lee (2001) propose l'élaboration d'un modèle filamenteux 3D qui s'intègre dans la modélisation 2D actuelle du réseau de voirie. L'étape de la codification du réseau piétonnier se réalise automatiquement. Pour ce faire, un algorithme, s'appuyant sur les fondements des polygones de Thiessen et de cartes vectorielles 2D de chaque étage des édifices à bureaux, détermine le centre linéaire des corridors. Bien que cette méthode reste efficace, l'absence de données sur les différents étages de la ville intérieure ne permet pas ce type de codification automatique. Dans le même ordre d'idée, un réseau tridimensionnel en noeuds et liens du campus de l'EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) a été conceptualisé dans l'optique d'une intégration dans un système de navigation pour assister les piétons dans leurs cheminements (Büchel et Gillieron, 2004). La codification tridimensionnelle est réalisée à partir de plans architecturaux des différents étages des pavillons.

4.2.3 Usager : piéton

L'abstraction d'un réseau de transport en graphe vise à représenter le plus fidèlement possible les possibilités de mouvements pour un usager précis. Dans le cas d'un réseau piétonnier, l'usager se distingue grandement des véhicules motorisés. En effet, c'est principalement le fondement propre de la mobilité et du réseau associé qui diffère. Le

piéton est un agent libre de se mouvoir dans le sens et la direction de son choix, contrairement aux usagers de véhicules privés qui se doivent de respecter le code de la route. Pour leur part, les véhicules collectifs doivent eux aussi respecter les contraintes physiques et législatives de la route. De surcroît, ils doivent respecter leur assignation et les temps de passage aux arrêts. De ce fait, la codification doit tenir compte de ces éléments qui caractérisent les mouvements des usagers du réseau afin de représenter le plus fidèlement les déplacements possibles.

Malgré les caractéristiques propres aux piétons, certaines contraintes et hypothèses peuvent simplifier la modélisation des déplacements piétonniers. Effectivement, ces usagers restent des êtres rationnels qui tentent d'optimiser leur chemin selon différents critères (temps de parcours, distance, convivialité, sécurité, etc.). Par ailleurs, les piétons sont confinés dans un environnement fermé, restreignant leurs mouvements à cause de la présence de murs qui forment des couloirs majoritairement linéaires et similaires aux trottoirs. Bref, un modèle relationnel en noeuds et liens peut permettre de représenter les déplacements piétonniers dans la ville intérieure.

4.2.4 Références spatiales et structurelles

Le réseau de voirie se caractérise par une dénomination distincte pour chaque élément routier, facilitant ainsi la cognition des usagers pour s'orienter dans le système urbain de surface. Cette toponymie demeure un élément de référence grandement utilisé pour l'orientation spatiale, ainsi que la localisation de lieux, par l'entremise d'un système universellement reconnu : l'adresse civique. Cependant, le réseau piétonnier est confronté à une juridiction privée et multiple qui, pour l'instant, n'a prévu aucun plan de toponymie pour l'ensemble des voies de circulation de la ville intérieure. L'absence de toponymie engendre une difficulté pour la codification et validation du réseau, ainsi que pour l'orientation des usagers dans un système de couloirs ramifiés. Pour l'instant, le seul outil informationnel, permettant d'assister l'utilisateur dans son cheminement

souterrain, réside dans une signalisation fondée sur une dénomination successive des édifices à franchir pour accéder à la destination.

Malgré l'absence d'une toponymie des voies de circulation, les différents immeubles possèdent une organisation référentielle propre pour la localisation des bureaux. Comme dans tout édifice à étages multiples, les différents locaux sont numérotés suivant une logique verticale où le numéro de l'étage se retrouve dans un code alphanumérique. La méthode de référence est malheureusement plus ardue lorsqu'on s'intéresse à un ensemble d'édifices ou à l'assortiment des locaux de la ville intérieure. Il n'existe aucune unicité et normalisation de la numérotation des locaux. Une toponymie des voies de circulation permettrait et faciliterait une standardisation pour l'attribution de références spatiales dans la ville intérieure. À titre d'exemple, la géolocalisation des boutiques des différentes galeries marchandes demeure un défi en soi. En effet, ces lieux subissent de constants déménagements et fermetures. Ainsi, la géolocalisation explicite de ces lieux serait constamment à recommencer. L'utilisation d'une référence linéaire similaire à l'adresse civique, uniforme pour l'ensemble de la ville intérieure, permettrait de maintenir plus facilement des modifications dans le réseau.

4.2.5 Configuration et mobilier urbain

La configuration architecturale du réseau piétonnier est composée de différents couloirs, similaires aux trottoirs de surfaces par leur aspect linéaire, mais enclavés entre deux murs. Cependant, les usagers rencontrent des aires ou esplanades (Gare Lucien l'Allier, Complexe Desjardins) qui impliquent une infinité de courants linéaires de déplacements piétonniers. Cette configuration surfacique nécessite une modélisation en noeuds et liens qui reconnaît les différents chemins empruntables par les piétons. Cette dernière est exposée dans la méthodologie de codification de la ville intérieure à la section 4.4.4.

Par ailleurs, les usagers sont confrontés à différents mobiliers urbains qu'ils se doivent d'emprunter ou traverser pour poursuivre leur déplacement : de multiples portes, escaliers mobiles ou fixes, ascenseurs et tourniquets. Ce mobilier urbain comporte des

propriétés distinctes qui influencent le mouvement sur ces liens. Similairement aux intersections de rue ou aux arrêts d'autobus, le mobilier urbain intervient comme point de passage obligatoire pour un piéton qui emprunte le couloir associé ainsi qu'un lieu de décision. Bref, ce mobilier urbain peut être conceptualisé en noeuds et liens.

4.3 Raffinement de l'accès au centre-ville

La modélisation analytique du réseau piétonnier s'inscrit dans le traitement totalement désagrégué des itinéraires exposé dans les chapitres 2 et 3. Bien que le déplacement individuel soit considéré de son origine jusqu'à la destination, la modélisation de l'accès aux générateurs de déplacements du centre-ville comporte un chaînon manquant. Jusqu'à présent, les usagers en transition dans l'interface souterraine (station de métro, gare, terminus d'autobus, stationnement intérieure) sont reportés automatiquement au réseau de surface des trottoirs afin d'atteindre leur destination finale. Bref, l'accès par la ville intérieure est négligé.

La schématisation de l'adjonction d'un réseau analytique modélisant le réseau piétonnier protégé se réalise par une approche orientée-objet. La Figure 4.9 expose les différents concepts et la structuration orientée-objet du raffinement de l'accès aux générateurs de la ville intérieure. Par la caractérisation totalement désagrégée de l'itinéraire, le noeud d'injection dans la ville intérieure dérive du dernier mode de transport emprunté. Par exemple, une personne arrivant à une station de métro est injectée au noeud/objet tourniquet, afin de se mouvoir par l'entremise du réseau protégé. La connexité entre le réseau de surface et souterrain se réalise par l'intermédiaire des noeuds « portes extérieures ». Finalement, le noeud de terminaison découle du motif principal de déplacement. Sommairement, les noeuds de jonction lors de l'entrée au centre-ville et de destination subissent une désagrégation supplémentaire afin de raffiner la modélisation de l'accès par la marche au centre-ville.

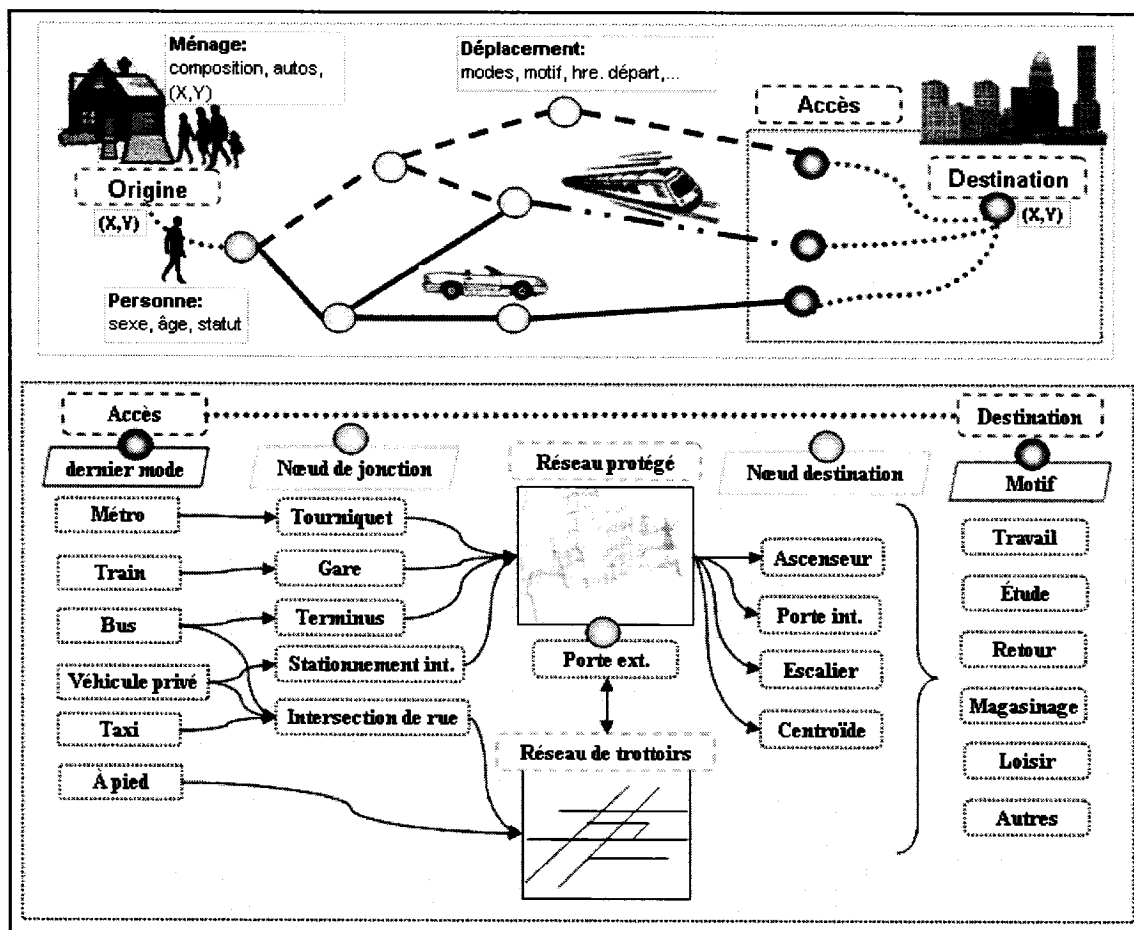


Figure 4.9: Schématisation orientée-objet de l'accès au centre-ville et à la ville intérieure

La Figure 4.10 illustre un exemple de désagrégation supplémentaire permettant de modéliser la connexité entre le réseau piétonnier et les noeuds d'accès ou de terminaison. Dans la modélisation actuelle, les usagers qui accèdent au centre-ville par une station de métro ou gare sont automatiquement relégués sur le réseau de trottoirs, par l'intermédiaire de liens fictifs schématisant les accès sur rue qu'offrent les édifices des stations. Pour le niveau de résolution à l'étude, le report explicite des usagers au niveau de la rue ne subsiste plus, puisque le réseau piétonnier protégé intervient à titre d'interface de mobilité entre les noeuds de transport intérieurs (station de métro, gares, stationnement intérieurs) et le réseau de surface. En somme, l'accès par un noeud de transport est ici redirigé au niveau des tourniquets permettant à l'utilisateur de poursuivre

son cheminement dans le sous-sol montréalais et/ou emprunter le réseau de trottoirs. De la même manière, les noeuds de destination (générateurs) subissent une désagrégation pour permettre l'accès au générateur, par l'entremise de différents lieux représentatifs du motif. À titre d'exemple, la Place Ville-Marie, qui est reconnue pour sa tour principale en forme de croix, comporte quatre autres tours à bureaux ainsi qu'une galerie marchande à son sous-sol. La Place Ville-Marie évoque donc six destinations modélisables par des noeuds significatifs et distincts. De la sorte, les ascenseurs évoquent les destinations pour les usagers qui s'y déplacent pour le motif travail (travailleurs) et étude (stages, formation, etc.), tandis qu'un noeud central situé au niveau de la galerie marchande représente la destination des déplacements pour les motifs magasinage et loisir.

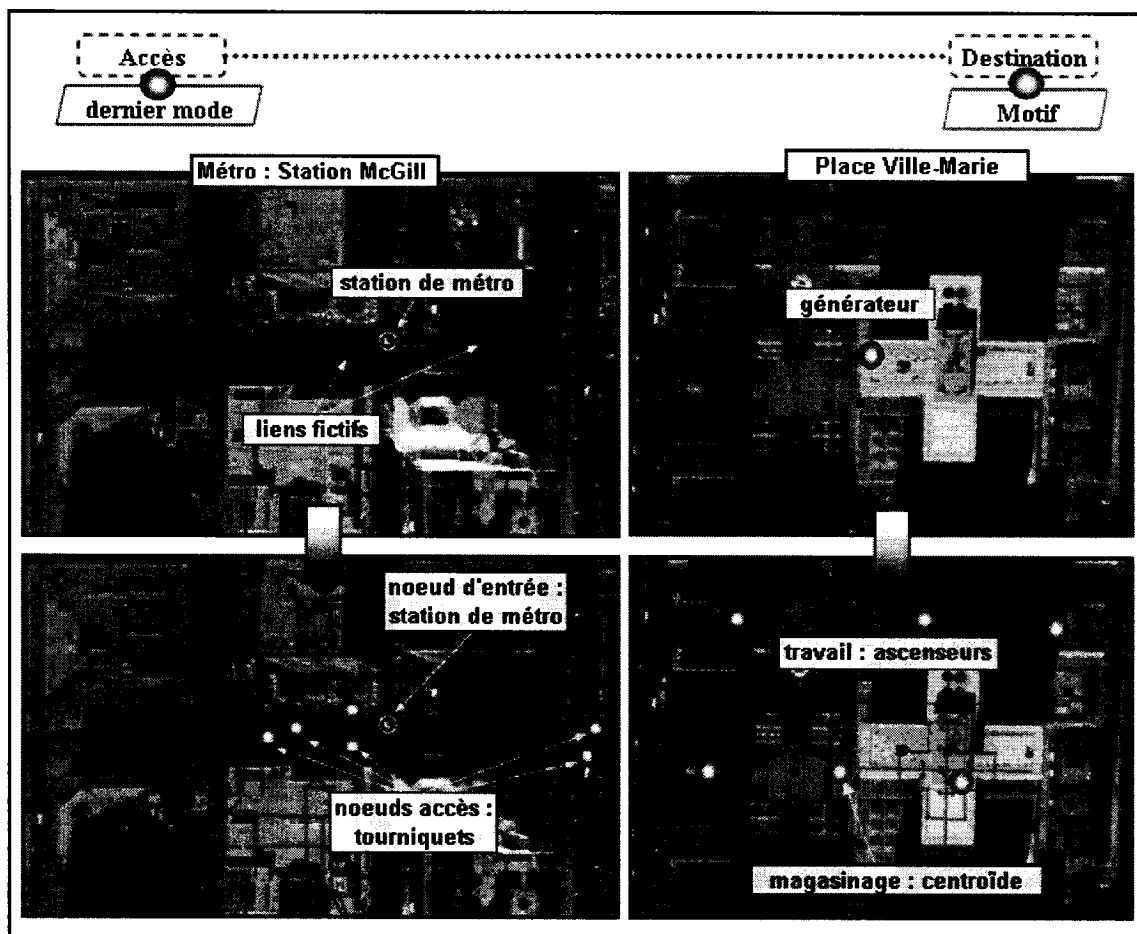


Figure 4.10: Désagrégation des noeuds d'accès et de destination

4.4 Établissement de la géomatique filamenteuse

Dans tout problème de transport, l'étape la plus ardue consiste en la schématisation juste du système de transport à l'étude. Cette représentation d'un phénomène réel et complexe joue un rôle important pour la justesse des analyses subséquentes qui se baseront sur cette modélisation. Cependant, ce modèle reste souvent asservi aux données disponibles. L'accès à des données fines sur la localisation des infrastructures souterraines reste difficile. Malgré cette situation particulière, il demeure possible d'élaborer une géomatique du réseau de la ville intérieure pour des fins d'analyse et de planification. Chapleau (1992b) l'illustre pour le cas de Marrakech, par l'élaboration d'un système informationnel de référence pour fins d'analyse et planification de transports urbains. Pour ce faire, Chapleau exprime la conception de ce système par une démarche à huit composantes énumérées ci-dessous:

- Identification d'un système de coordonnées de référence;
- Définition du littoral et du territoire d'analyse;
- Codification du plan des rues (localisation et modes opératoires);
- Constitution des attributs cartographiques;
- Inventaire et codification des aires désignées (monuments);
- Définition du découpage territorial (zones, frontières);
- Dérivation d'indicateurs et du réseau d'adjacence;
- Développement des réseaux analytiques.

Dans la même lignée, l'élaboration de la géomatique filamenteuse, schématisant les voies de circulation piétonnière de la ville intérieure, se résume en six étapes : choix du système de coordonnées, identification de la zone d'étude, numérisation des données de références et recensement in situ, géocodification tridimensionnelle du réseau et enfin l'ajout d'attributs pour le calcul de chemin.

4.4.1 Choix du système de coordonnées

Au Canada, on reconnaît deux grands systèmes de coordonnées cartésiennes. Au niveau fédéral, le système UTM. (Universal Transverse Mercator) est généralement utilisé. Toutefois, le gouvernement québécois préconise le système MTM (Modified Transverse Mercator). Le système MTM divise le territoire du Québec en sept fuseaux de trois degrés en longitude. Ce système est unique au Québec et diminue la distorsion causée par l'aplanissement du globe. Puisque la géomatique québécoise converge vers ce système de référence, la codification du réseau piétonnier se base sur le système MTM NAD83. En ce qui concerne l'élévation (coordonnée z), cette coordonnée se réfère au niveau moyen des mers, référence utilisée dans les différentes sources de données (plans des stations de métro, cadastre des rues, etc.).

4.4.2 Identification de la zone d'étude

La ville intérieure de Montréal se situe en plein coeur du mouvement urbain du centre-ville. L'aire d'étude porte strictement sur la zone centrale de la ville intérieure. En effet, ici on fait abstraction des deux autres réseaux indépendants, respectivement annexés aux stations de métro Berri-UQAM et Atwater. Bref, la zone d'étude regroupe essentiellement le réseau piétonnier relié à sept stations de métro : Peel, McGill et Place-des-Arts sur la ligne verte ainsi que Place-d'Armes, Square-Victoria, Bonaventure et Lucien-l'Allier sur la ligne orange. Ce réseau principal en forme de « U » est délimité par la rue Sherbrooke au Nord, le boulevard St-Laurent à l'Est, la rue Notre-Dame au Sud ainsi que la rue Guy à l'Ouest. Ces artères du réseau routier définissent clairement le territoire d'analyse pour l'établissement de la géomatique (voir Figure 1.1).

4.4.3 Numérisation des données de référence et recensement

Le réseau piétonnier de la ville intérieure est principalement du domaine privé. Ceci a pour résultat que jusqu'à maintenant, très peu de données sont disponibles sur l'emplacement du mobilier urbain et de la structure multi étages du réseau. La STM dissémine (www.stm.info), par l'intermédiaire de ses plans de quartiers à proximité des stations de métro, une carte 2D du réseau protégé. Il s'agit d'une projection des

différents étages qui composent la ville intérieure. Pour localiser et référencer les différents corridors, escaliers, accès et stationnements, quelques plans sous format papier sont fournis aux comptoirs du service à la clientèle des différentes galeries marchandes inscrites dans le réseau. Ces plans, distribués par les propriétaires d'édifices privés, ne comportent pas d'échelle visible. Cependant, la combinaison des plans diffusés par la STM et des plans de galeries privés, permet la dérivation numérique de la projection actuelle 2D du réseau souterrain dans un système géoréférencé.

Une fois cet amalgame réalisé, survient l'étape de recensement in situ. Ce recensement, réalisé principalement lors la période estivale de 2004, a consisté à relever, valider et segmenter par niveau, tous les corridors de la ville intérieure en se basant sur la projection 2D précédemment numérisée. Par ailleurs, tout mobilier urbain (portes, escaliers mobiles, escaliers fixes ainsi que les ascenseurs) a été relevé et positionné sur la projection des niveaux, dans l'optique d'une numérisation tridimensionnelle. Finalement, la visualisation du réseau, combinée aux orthophotos, a permis de valider le positionnement de lieux stratégiques, comme les ascenseurs et les portes extérieures donnant accès au réseau de trottoirs, selon le cadre bâti visible sur les images aériennes.

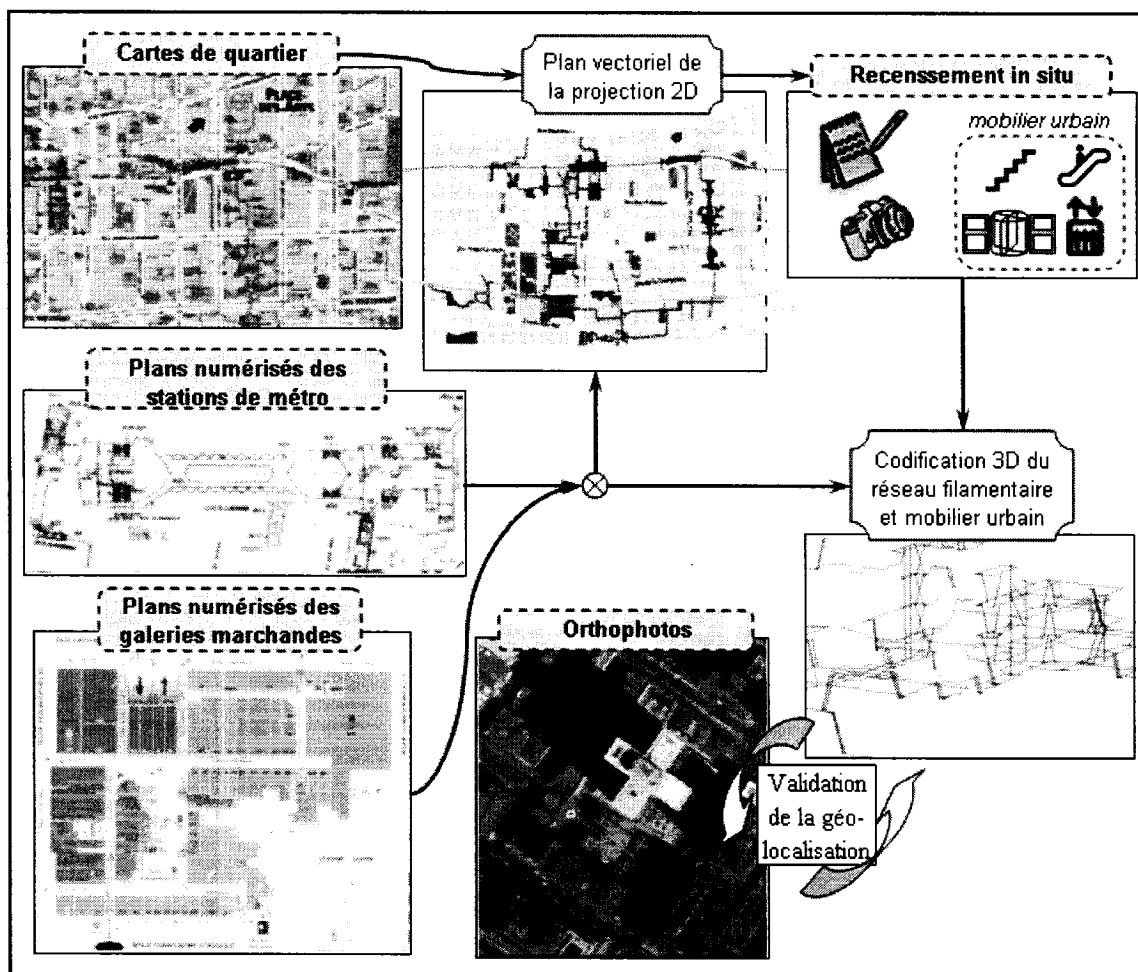


Figure 4.11: Sources de données et processus vers la codification 3D du réseau piétonnier

4.4.4 Codification tridimensionnelle du réseau analytique

À cette étape intervient la modélisation en graphe fondée sur les différentes sources de données précédemment décrites. Différents logiciels SIG permettent la codification d'un réseau par entités ponctuelles, linéaires et surfaciques. Cependant, ces derniers n'offrent pas la possibilité de codifier un réseau non planaire et de travailler dans un espace tridimensionnel. Pour remédier à cette problématique, un logiciel de dessin assisté par ordinateur a été utilisé, en l'occurrence AutoCAD. Dans le but de simplifier l'étape de la codification et d'assurer la connexité entre les liens et les noeuds, la codification se réalise dans un premier temps en 2D pour chaque niveau. En effet, la ville intérieure se compose de multiples niveaux superposés qui diffèrent selon la fonctionnalité et le type

d'édifice. En règle générale, ces niveaux rejoignent usuellement la structure exposée à la Figure 4.12 où le profil de la rue est la référence.

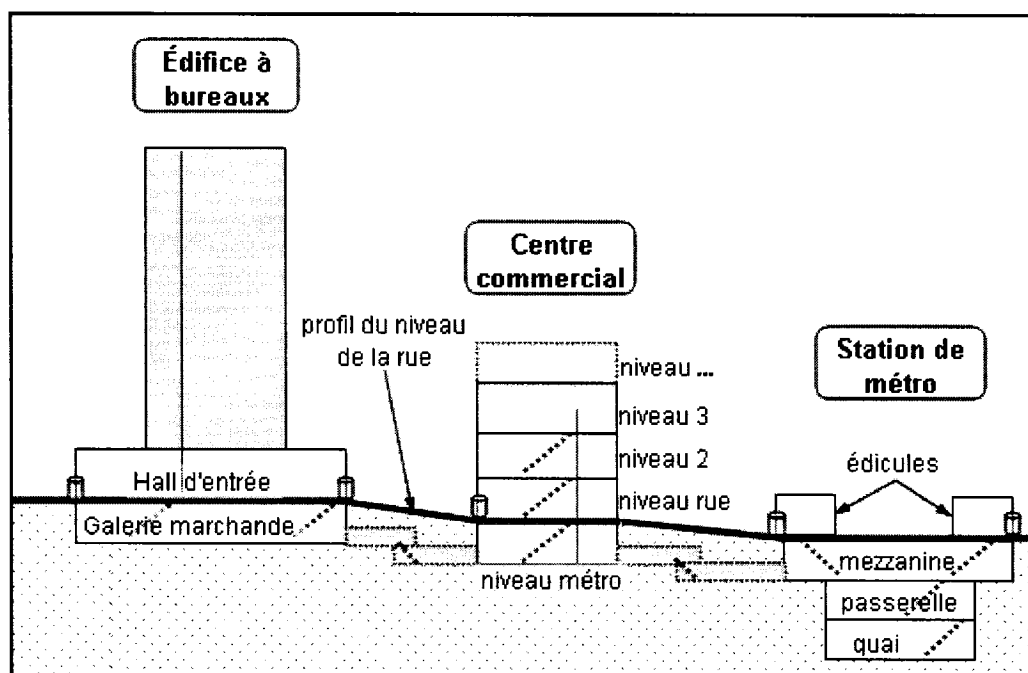


Figure 4.12: Les différents niveaux de la ville intérieure

Pour chaque niveau, on procède à la localisation des lieux d'activités, c'est-à-dire au positionnement des noeuds nécessaires à la description fine des mouvements autorisés pour les piétons. Ces lieux d'activités représentent, pour un piéton, un lieu de décision menant à un changement de direction, d'élévation, de réseau ou de juridiction. Sommairement, il s'agit de tout lieu qui définit :

- un début ou une terminaison d'un couloir piétonnier;
- une intersection entre au moins deux courants piétonniers;
- un changement de direction (noeud de géométrie des corridors);
- un changement de juridiction (délimité par une porte intérieure ou extérieure);
- un point de correspondance avec le réseau de voirie ou transport collectif (porte extérieure, stationnement intérieur, tourniquet des stations de métro);
- un changement d'élévation (bas et haut d'escaliers, ascenseurs).

À chaque noeud sont associés les attributs suivants : un identificateur unique pour assurer l'intégrité des données, le triplet des coordonnées (x, y, z), la couche d'information sur laquelle le noeud a été codifié et qui le caractérise et enfin la juridiction respective (dénomination de l'édifice de surface, station de métro, etc.).

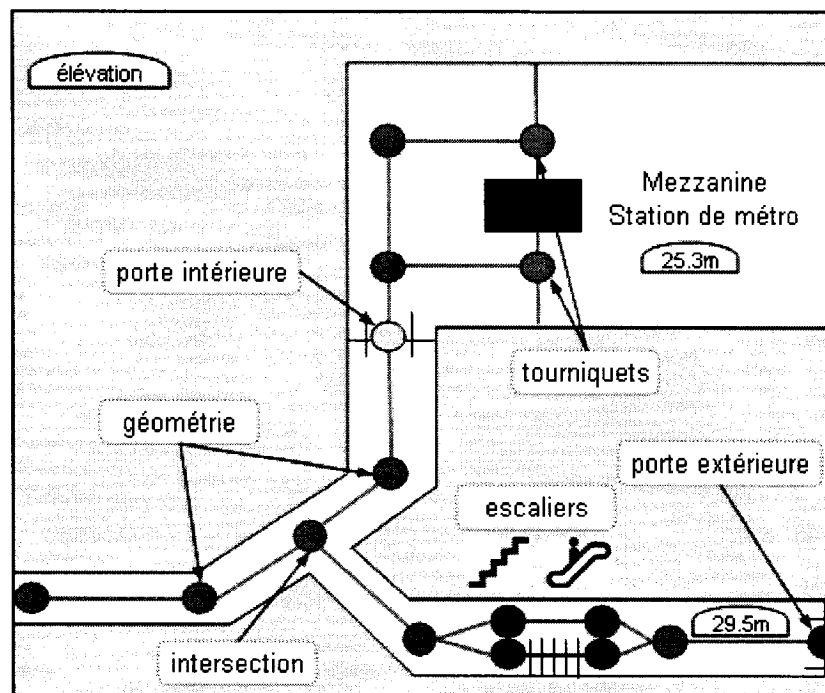


Figure 4.13: Exemple d'une schématisation en noeuds et liens

Une fois les noeuds géoréférencés, la représentation des voies de circulation piétonnière s'effectue par le codage des liens. Ces derniers représentent tout déplacement possible ou courant piétonnier linéaire dans l'environnement côtoyé. Bien que la ville intérieure se compose majoritairement de couloirs, on observe différentes configurations architecturales où subsiste une absence de structure spécifique pour restreindre les déplacements. À ce titre, les esplanades, lieux de mouvements conflictuels et aléatoires, peuvent être représentées en noeuds et en liens par différentes descriptions et à des niveaux de résolution distincts (Figure 4.14). Le positionnement d'un noeud de centralité et des noeuds de terminaison des corridors aboutissant à l'esplanade, est la structuration

choisie. Celle-ci permet de simplifier la représentation et d'assurer un noeud de centralité pouvant être utilisé pour évoquer une destination lors de calculs de chemins.

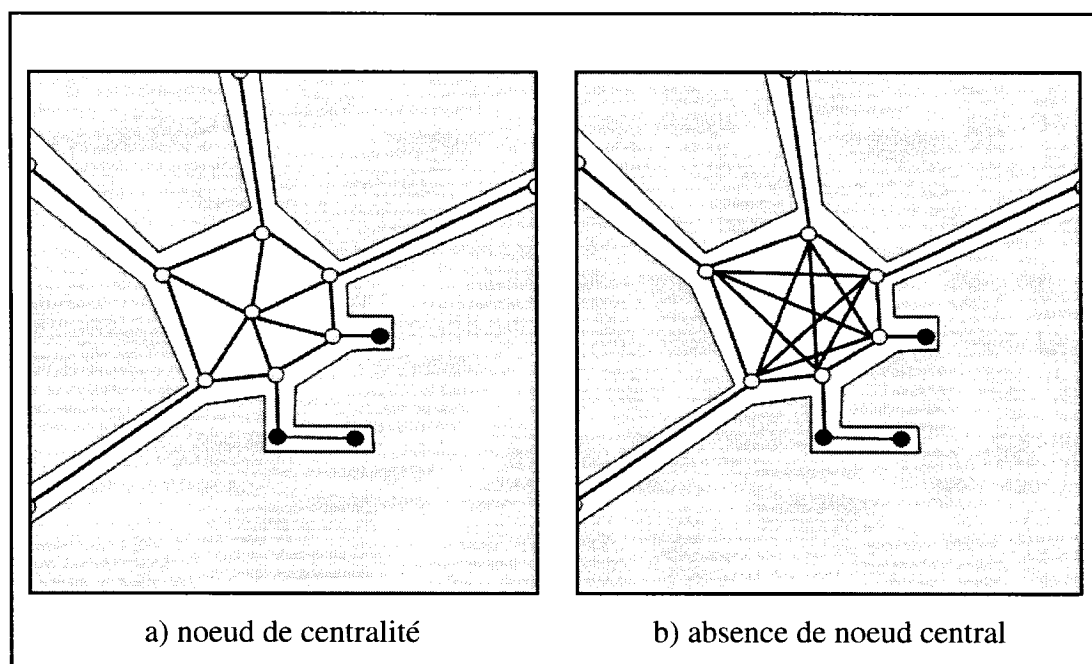


Figure 4.14: Schématisation de la circulation à l'intérieur d'une esplanade

En ce qui concerne la connexité verticale, cette dernière est assurée par des liens 3D qui représentent les escaliers et ascenseurs. Grâce à la codification des noeuds spécifiques au changement d'élévation pour chaque étage (bas et haut des escaliers, ascenseurs), les déplacements verticaux sont définis par la paire des noeuds associés. Cette codification s'effectue dans un environnement 3D, pour ainsi combiner les différents niveaux (Figure 4.15). Or, la composante verticale des différents niveaux est dérivée en fonction d'élévations connues (niveau de la rue, niveau de la mezzanine et édicules des stations de métro) et/ou par l'entremise du nombre de marches qui séparent deux niveaux successifs. La hauteur moyenne des marches est estimée à seize centimètres lors de l'absence de données sur les élévations.

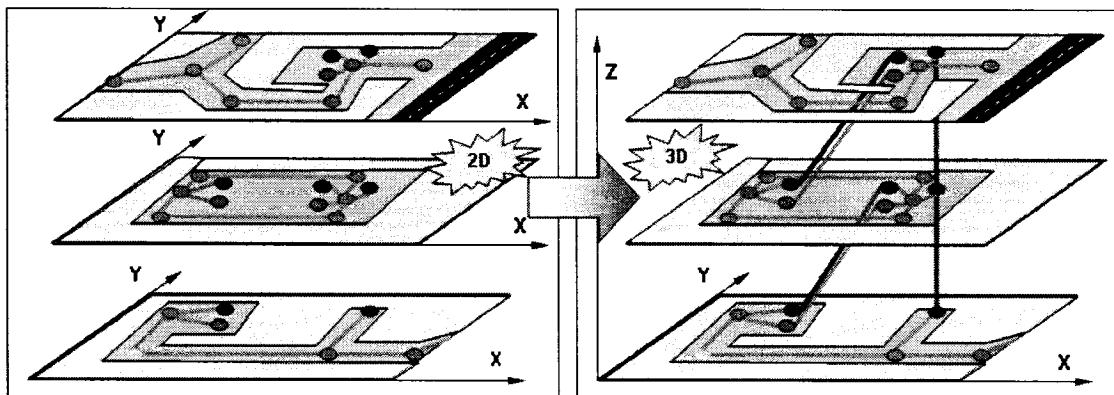


Figure 4.15: Assemblage tridimensionnel des différents étages du réseau par la représentation des déplacements verticaux

La définition des liens s'appuie directement sur la base de données des noeuds. En ce sens, une paire d'identificateurs de noeuds permet la description du lien tout en assurant l'intégrité et la connexité. À ces identificateurs s'ajoute la direction autorisée sur les liens : cet attribut est principalement associé aux escaliers mobiles où le sens ascendant ou descendant résulte automatiquement du vecteur directionnel, entre le noeud d'origine et de terminaison, provenant de la codification du lien. D'autres liens peuvent être encodés comme unidirectionnels, afin de restreindre l'accès à des portes ou tourniquets qui autorisent le passage dans une seule direction.

Suite à l'étape de codification et à l'assemblage tridimensionnel du réseau piétonnier, l'exportation du dessin vectoriel en bases de données procure une versatilité permettant son exploitation dans différents logiciels. Les bases de données relationnelles résultantes et leurs structurations sont illustrées à la Figure 4.16. Sommairement, le réseau est défini par 2349 noeuds (155 portes extérieures, 160 intérieures) et 2832 liens (199 escaliers fixes et 199 mobiles). L'addition des longueurs linéaires des liens (projetées dans le plan x-y) totalise une distance de 31,3 kilomètres.

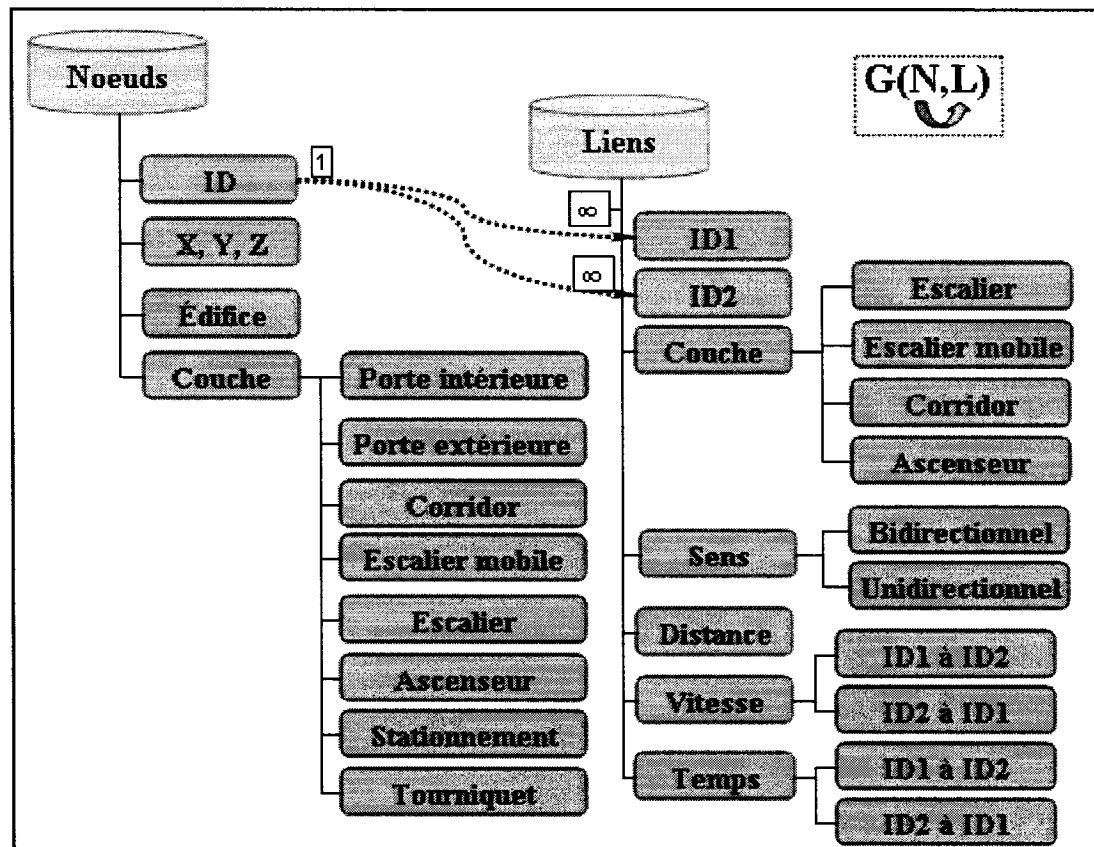


Figure 4.16: Structure des données relationnelles suite à la codification du réseau piétonnier

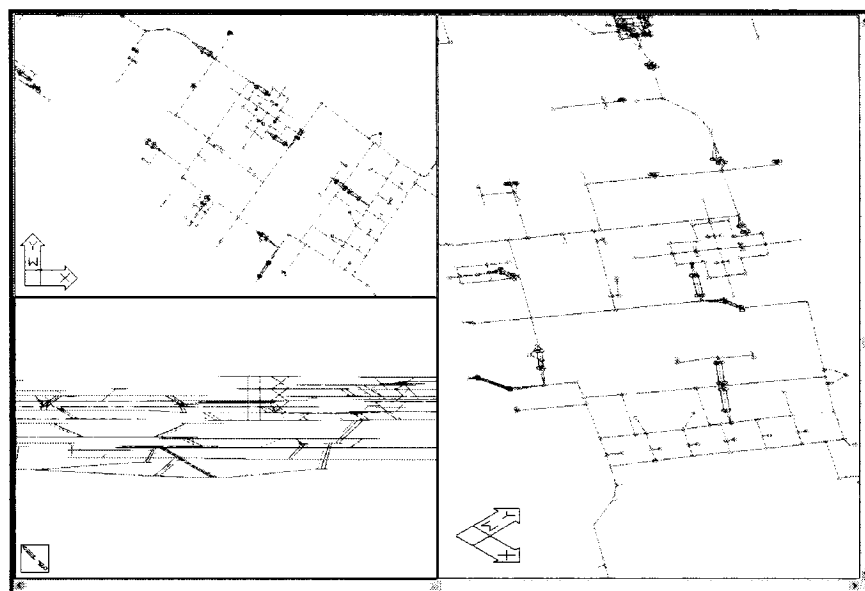


Figure 4.17: Environnement de codification tridimensionnelle du réseau piétonnier

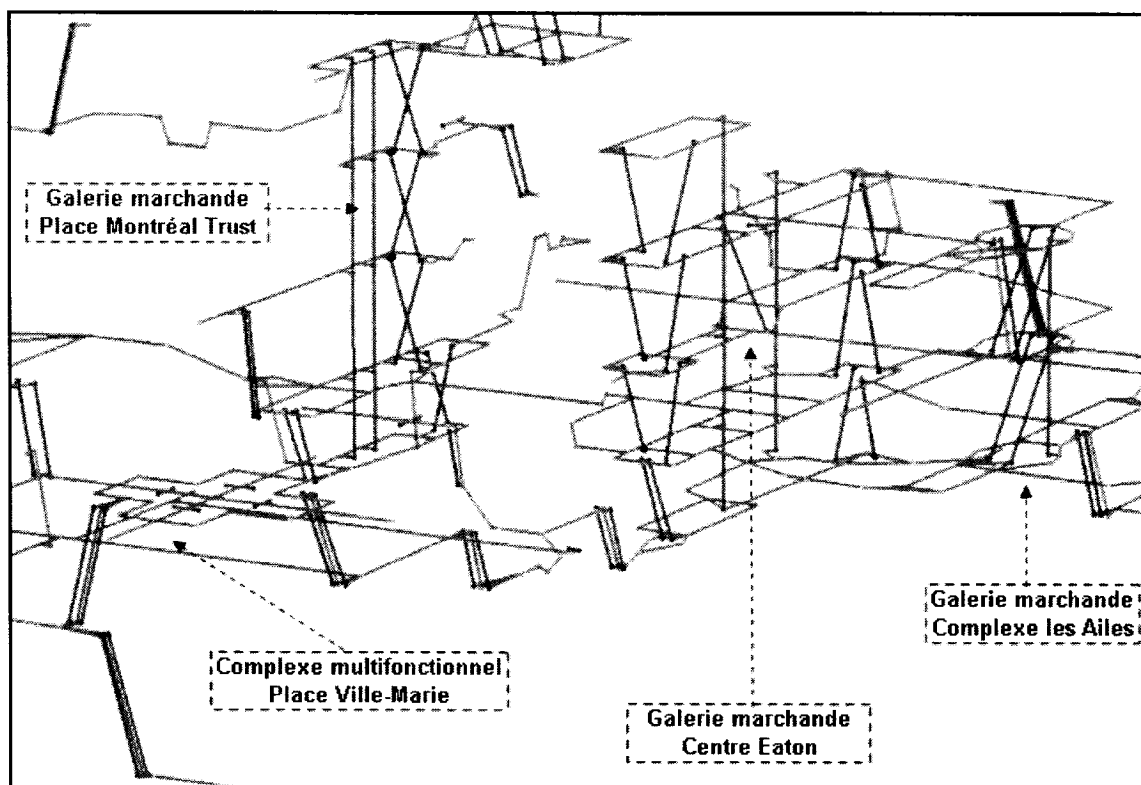


Figure 4.18: Visualisation d'un extrait du réseau filamenteux tridimensionnel

4.4.5 Ajout d'attributs pour le calcul de chemin : vers une affectation des déplacements piétonniers

Différents calculs de chemins peuvent s'intégrer à un système d'information aux usagers. Ces calculs peuvent contribuer à dériver les cheminements empruntés par les piétons. Ainsi, dans l'étude des paramètres pour élaborer un système de guidage des piétons sur un campus universitaire, Tseng-Chyan et Lai (2004) recensent cinq types de calcul de chemins applicables pour les piétons :

- chemin le plus court (*distance de parcours*);
- chemin le plus rapide (*temps consommé*);
- chemin le plus simple (*changements de direction et d'élévation*);
- chemin le plus facile (*l'effort physique demandé*);
- chemin le plus scénique (*présence de lieux d'intérêt*).

Tous ces types de calcul de chemins peuvent s'effectuer sur un réseau conceptualisé en noeuds/liens avec impédances associées aux entités et jumelé à un algorithme spécifique ; l'algorithme de Dijkstra (1959) est celui le plus couramment utilisé et adapté. Ce dernier permet le calcul de l'arbre des chemins minimaux sur un réseau comportant des poids positifs sur les liens.

Pour le calcul du chemin le plus court, l'impédance se reporte à la longueur des liens. Cette dernière s'obtient directement de la géométrie des liens L_{ij} par le calcul de la distance d entre les noeuds i et j :

$$d_{Lij} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2}$$

En ce qui concerne le calcul des temps de marche sur les différents couloirs de la ville intérieure, la distance et la vitesse sont nécessaires. Les vitesses peuvent se reporter, sous forme hiérarchique, à la classe des différents liens. Ainsi, quatre classes de voies de circulation piétonnières peuvent être considérées : corridor, ascenseur, escalier fixe et escalier mobile. Au même titre que le réseau de voirie, la hiérarchisation des voies de circulation piétonnières permet l'établissement du niveau de service (vitesse en écoulement libre) ainsi que le retranchement ou la pénalisation d'un type particulier de voie de circulation. Dans cet ordre d'idées, la proposition d'un chemin pour une personne à mobilité réduite s'effectue par l'imposition d'une pénalité pour l'emprunt d'escaliers au profit d'ascenseurs ou d'escaliers mobiles.

Différentes études macroscopiques du trafic piétonnier établissent des vitesses de marche moyennes sur le plan horizontal (tableau 4.1). Comme Morrall et al. (1991) le mentionnent, les vitesses varient d'une région à une autre selon les comportements et les propriétés physiques des personnes. D'autres facteurs comme l'âge, le genre et le motif influencent la vitesse de marche (Fruin, 1971).

Tableau 4.1: Vistesses de marche moyennes en écoulement libre sur le plan horizontal

Source	vitesse moyenne (m/s)	Lieu
Daly et al. (1991)	1,47	Grande-Bretagne
Fruin (1971)	1,40	États-Unis
Lam et al. (1995)	1,19	Hong Kong
Morrall et al. (1991)	1,25	Sri Lanka
	1,40	Canada
Navin, Wheeler (1969)	1,32	États-Unis
Older (1968)	1,30	Grande-Bretagne
Virkler, Elayadath(1994)	1,22	États-Unis

En ce qui concerne les déplacements avec une composante verticale, les piétons adoptent une vitesse qui diffère selon le type de mobilier urbain emprunté. Différents travaux sur l'étude des relations vitesse-débit à l'intérieur d'infrastructures de transport ont été réalisés : station de métro de Londres (London Underground) (Daly et al., 1991 ; Harris, 1991), station de métro de Hong Kong (MRT) (Lam et al. 1995; Cheung et al. 1998) ainsi que la station de train à Hong Kong (KCR) (Lam et al. 2000). Ces analyses se basent sur l'estimation des temps de parcours sur une infrastructure piétonnière selon la fonction du Bureau of Public Roads (BPR) (1964), largement utilisée pour la prédiction des temps de parcours sur les réseaux de voirie :

$$t(v) = t_0 + B \left(\frac{v}{C} \right)^n$$

où t_0 = temps (s) de parcours à écoulement libre; v = débit ou densité (piétons/m/h ou piétons/m²); C = capacité de l'infrastructure (piétons/m/h ou piétons/m²); B et n = constantes estimées lors du processus de calage du modèle.

Le tableau 4.2 expose les résultats obtenus par ces auteurs.

Tableau 4.2: Vitesses de déplacement sur différentes infrastructures urbaines (1)

	Vitesse à écoulement libre (m/s)			Vitesse à capacité (m/s)			Capacité (2)		
	MTR	KCR	LU	MTR	KCR	LU	MTR	KCR	LU
Escalier mobile (ascendant)	0,89	0,85	0,84	0,72	0,70	0,51	120	118	120
Escalier mobile (descendant)	1,05	1,01	1,00	0,73	0,70	0,64	120	118	120
Escalier (ascendant)	0,86	0,77	0,59	0,43	0,42	0,51	70	70	62
Escalier (descendant)	0,97	0,87	0,67	0,60	0,57	0,64	80	73	68
Couloir	1,37	1,32	1,53	0,61	0,60	0,60	92	88	86

(1) sources: MTR et KCR (Lam et al. 2000); LU (Daly et al. 1991)

(2) escalier mobile (piétons/escalier/min.); escalier et couloir (piétons/m/min.)

Cheung et Lam (1998) poussent plus loin l'étude comportementale des piétons pour l'emprunt des escaliers, par l'élaboration d'un modèle probabiliste du choix effectué entre l'utilisation d'un escalier mobile ou fixe. Le modèle de mouvement vertical s'appuie sur le temps d'attente pour accéder aux escaliers, le temps de parcours sur chaque type d'escalier ainsi que la longueur du mobilier urbain. Se basant sur l'hypothèse que le piéton effectue son choix selon le lien qu'il estime le plus rapide, Cheung et Lam (1998) réalisent que le piéton favorise grandement l'utilisation de l'escalier mobile au détriment de l'escalier fixe, spécifiquement pour effectuer un déplacement en montée. Cela démontre que le piéton ne considère pas seulement le temps et la distance pour se déplacer, mais aussi l'effort physique à fournir pour effectuer un déplacement avec une composante verticale.

Bref, l'ensemble des études énoncées illustrent la variation de la vitesse moyenne dans les conditions extrêmes de circulation. Par ailleurs, la vitesse varie selon le sens (ascendant ou descendant) par lequel le mobilier est emprunté. Cet aspect peut être conceptualisé dans la table des liens par l'insertion de la vitesse dans le sens allée et retour dans des champs distinctifs.

Puisque le réseau est de juridiction privée et multiple, les heures d'ouvertures sont variables et non uniformes. L'ajout d'un champ dans la table des noeuds peut s'avérer utile pour modéliser le droit ou l'interdiction de passage aux différentes portes du réseau selon l'heure de la journée. Toutefois, le recensement effectué sur les lieux n'a pas permis de recueillir une information fiable et adéquate pour son intégration dans la modélisation informationnelle du réseau.

Vers une affectation des déplacements piétonniers

La modélisation du choix d'itinéraire piétonnier reste complexe dans la mesure où l'utilisateur est influencé par plusieurs facteurs. Daamen (2004) recense, sous quatre catégories, les facteurs mentionnés dans différentes études empiriques sur le processus du choix d'itinéraire (Figure 4.19). Ainsi, une personne choisit son itinéraire, entre une origine et une destination, selon sa motivation ou intention initiale. Par ailleurs, ce choix est influencé par la perception et la connaissance des caractéristiques du réseau.

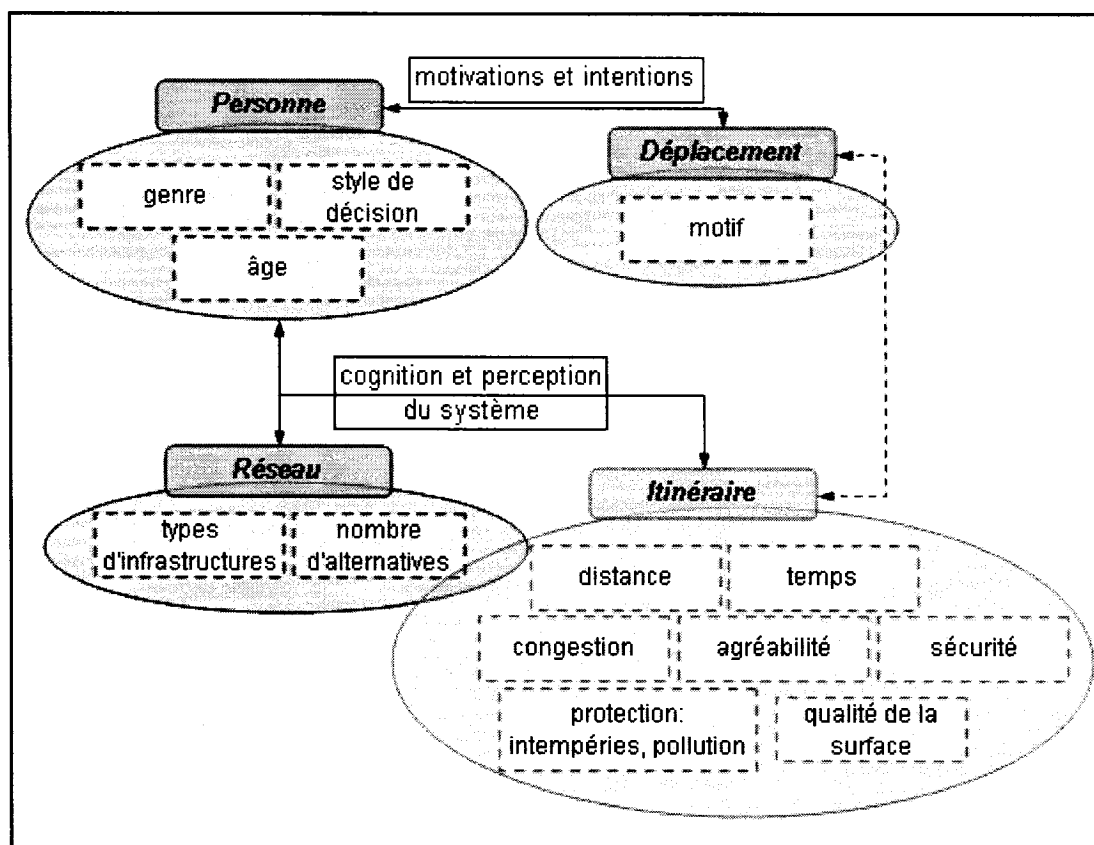


Figure 4.19: Facteurs influant sur le choix d'itinéraire

Par l'étude de ces facteurs pour l'établissement d'un modèle à choix discret, Daamen et al. (2004) concluent, selon des observations effectuées dans une gare, que les caractéristiques de la personne ont très peu d'influence sur le choix d'itinéraire. Le seul facteur retenu est le temps de parcours segmenté par le type d'infrastructure emprunté (couloir, rampe, escalier et escalier mobile). Ainsi, pour l'étude et l'analyse de la demande, le calcul du chemin le plus rapide reste une hypothèse valable pour la majorité des déplacements, spécifiquement pour un déplacement réalisé tel que planifié (Seneviratne et Fraser, 1991). « *In general, minimized paths characterize the majority of trips in pedestrian systems, although complex trips, and those including important leisure and entertainment components, will not minimized* » (Zacharias, 2000). En effet, le motif du déplacement intervient comme un facteur influant sur le choix de l'itinéraire. Par exemple, une personne, qui se destine au centre-ville pour magasiner, est plus

encline à être distraite par les activités environnantes qu'un travailleur qui se rend à son lieu de travail pour une heure précise. La modélisation des déplacements dans la ville intérieure reste plus complexe par l'existence d'une compétitivité avec le réseau de surface. À vrai dire, le piéton a le choix de poursuivre son cheminement sur ou sous le réseau de surface. Cette complexité demande un raffinement de la modélisation du réseau de trottoirs pour l'étude comportementale des usagers qui se déplacent au centre-ville. En effet, le réseau de trottoir, actuellement conceptualisé en 2D, ne considère pas les dénivellations du terrain, facteur influant sur la pénibilité d'un segment à pied. Ce raffinement pourrait être approfondi davantage par la considération des temps d'attente aux feux de circulations piétons. Un autre facteur important qui intervient dans cette situation de concurrence reste la protection contre les intempéries. Souvent mentionné comme un élément catalyseur de la croissance de la ville intérieure (Besner, 1997), le climat hivernal montréalais peut inciter les usagers à favoriser l'utilisation du réseau souterrain au détriment du réseau de surface. Dans cet ordre d'idée, Zacharias (2000) constate que l'achalandage dans le réseau protégé est accru lors de conditions pluvieuses à l'extérieur.

La modélisation actuelle de la demande en transport suppose que les usagers établissent leur itinéraire pour minimiser leur temps de parcours. En ce sens, la reconstitution des déplacements motorisés, à partir de l'origine et de la destination, s'effectue par le calcul de l'itinéraire le plus rapide, en fonction des vitesses sur les différents types de voies de circulation. Or, la modélisation des déplacements piétonniers sur le réseau de trottoirs accorde une vitesse constante et uniforme pour l'ensemble des usagers. En transport en commun, le temps consommé pour un déplacement est décomposé selon le temps d'accès (temps de marche entrée et sortie du réseau), le temps d'attente, le temps de parcours ainsi que le temps de correspondance. Ces temps consommés lors d'un déplacement ne sont pas perçus comme équivalents par les usagers. En effet, la pénibilité du temps d'attente à un coin de rue demeure mal ressentie par l'utilisateur comparativement au temps en véhicule. Afin de modéliser cette distinction dans la

perception du temps, chaque segment du déplacement est pondéré par une constante qui représente la valeur du temps. Ainsi, le coût généralisé pour un déplacement ($CGt_{\text{dépl.}}$) prend la forme:

$$CGt_{\text{dépl.}} = \sum CGt_x = a \cdot t_{\text{accès}} + b \cdot t_{\text{attente}} + c \cdot t_{\text{véhicule}} + d \cdot t_{\text{correspondance}}$$

où les t_x représentent les temps consommés pour chaque section du déplacement et a, b, c représentent les valeurs relatives du temps.

La ville intérieure agit comme interface modale et piétonnière pour la terminaison des déplacements au centre-ville. Or, l'estimation des temps de marche sur le réseau filaire renvoie directement au temps d'accès des déplacements. Puisque l'environnement côtoyé diffère du réseau de surface par la présence de mobiliers urbains pour se mouvoir verticalement, l'évaluation du temps d'accès peut s'amener à un niveau plus fin. En ce sens, Wardman (2001) effectue une revue de littérature sur les différentes valeurs du temps utilisées dans le contexte des transports. À ce titre, il relate une étude réalisée dans les stations de métro de Londres pour l'estimation de la valeur du temps (relative au temps en véhicule) pour différents aménagements et mobiliers d'une station de métro. À juste titre, le temps pour l'emprunt d'un escalier en montée (mobile ou fixe) est quatre fois plus onéreux comparativement à deux et demi pour en descente. Par ailleurs, le temps de marche dans une station est pondéré par un facteur de deux. Ces valeurs illustrent bien la pénibilité éprouvée par les usagers pour effectuer un déplacement selon une composante verticale. Ainsi, le coût généralisé pour le temps de marche ($CGt_{\text{accès}}$) peut s'établir sous la forme :

$$CGt_{\text{accès}} = a \cdot t_{\text{marche-horizontale}} + \omega \cdot t_{\text{montée}} + \rho \cdot t_{\text{descente}}$$

où les t_x représentent les temps consommés pour chaque section du déplacement d'accès et a, ω , ρ représentent les valeurs relatives du temps.

Ce type de généralisation du coût pour effectuer la portion à pied d'un déplacement peut s'appliquer au réseau de la ville intérieure et au réseau de trottoirs considérant la composante verticale.

4.5 Représentation en réalité virtuelle

L'apparition des nouvelles technologies informationnelles intégrant la troisième dimension permet la représentation de phénomènes urbains et de transport sous une nouvelle perspective (Zlatanova, 1999; Easa et al. 2002; Chapleau, 2004). Le VRML est l'une des technologies informationnelles qui permet la représentation de phénomènes dans un environnement tridimensionnel dans lequel il est possible de naviguer et interagir. Dans l'optique d'évaluer cette technologie, différents travaux font état d'expérimentations dans le domaine des systèmes d'information aux usagers de transport, pour le cas montréalais. À ce titre, McDonough (2002) exploite le VRML pour fin de visualisation tridimensionnelle de l'environnement à proximité des stations de métro. D'autre part, la modélisation en réalité virtuelle des stations de métro (Chapleau et al. 2003), toujours dans l'optique d'accompagner l'utilisateur-client dans son cheminement sur les réseaux de transports urbains, a permis d'analyser les potentialités de cette technologie pour l'élaboration d'un système d'information. C'est dans la poursuite de ces travaux que le réseau filamenteux de la ville intérieure a été modélisé en VRML.

4.5.1 VRML

Le « **Virtual Reality Modelling Language** » n'est pas un langage de programmation, mais bel et bien un langage pour décrire des scènes tridimensionnelles¹. Les principales propriétés de ce langage sont d'être : indépendant, extensible et mobile. En effet, il est autonome des différentes plates-formes (Unix, Windows, MAC OS, etc.), souple par sa facilité de disséminer l'information par Internet et permet de travailler avec une faible bande passante (modem 14.4 kbps).

¹ Spécifications du VRML : www.web3d.org et <http://www.web3d.org/x3d/specifications/vrml/>

Le VRML a vu le jour au printemps 1994 lors de la première conférence mondiale sur le World Wide Web². C'est essentiellement suite à des discussions et réflexions que la norme VRML 1.0 est disséminée pour la première fois en 1995. Cette version permettait seulement la description de monde statique. Le besoin d'intégrer de l'animation s'est vite fait ressentir et en août 1996, la version VRML 97 (ou plus couramment appelée VRML 2.0) voit le jour. En étant dynamique, celle-ci intègre de nouvelles avenues et fonctions, dont principalement : l'animation par interpolation, l'introduction de capteurs (touché, proximité, temporalité,...) permettant l'interaction avec l'utilisateur, l'intégration de javascript ainsi qu'une notion admettant la définition de nouveaux objets; les prototypes.

De format ASCII, le fichier VRML prend l'extension .wrl. Il peut être produit manuellement par l'entremise d'un éditeur de texte ou par l'intermédiaire d'un logiciel convertisseur qu'on surnomme ici, le **générateur**. Puisqu'il s'agit d'un langage de description, le fichier est interprété par un **navigateur** qui permet la visualisation et la navigation dans le monde 3D par différents modes. Dans le cas du navigateur Cortona, de ParallelGraphics (<http://www.parallelgraphics.com/products/cortona/>), les modes marche, vol et étude, permettent à chacun trois nouveaux types de déplacements en rotation et translation (Figure 4.20). Dans un souci d'uniformisation, les différents navigateurs sont des programmes externes ayant l'interface dans un programme hôte, communément appelé Plug-Ins. L'**usager** intervient par l'intermédiaire du clavier et de la souris et navigue à travers le monde en se positionnant dans la peau d'un être virtuel appelé **Avatar**.

² BLANCHET, Thierry : <http://apia.u-strasbg.fr/vrml/index.html>

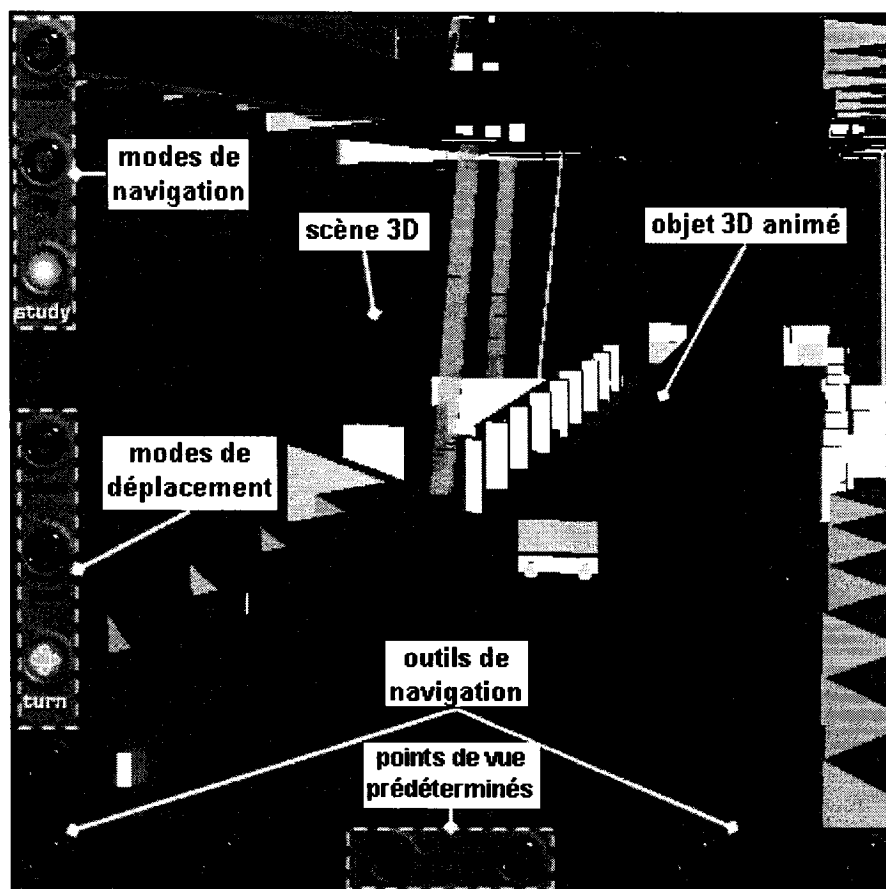


Figure 4.20 : Fenêtre de visualisation d'une scène 3D en VRML dans Cortona

4.5.2 Visualisation du réseau et animation de cheminements

La description tridimensionnelle du réseau piétonnier protégé en VRML s'inscrit dans une suite de procédures et technologies informationnelles, décrite à la Figure 4.21. Sommairement, à partir de l'étape de la géocodification 3D, où émergent les tables des noeuds et liens, le réseau est converti sous différents formats pour être enrichi et représenté en réalité virtuelle. Le passage des bases de données à des couches d'informations dans un SIG permet la visualisation et l'attribution de propriétés propres aux noeuds et aux liens. C'est par l'entremise d'un script dans Christine GIS³ que le fichier VRML est généré selon la géométrie (X, Y, Z) ainsi que par les propriétés sélectionnées sur les différentes couches (couleurs, formes).

³ Christine GIS : <http://www.christine-gis.com/>

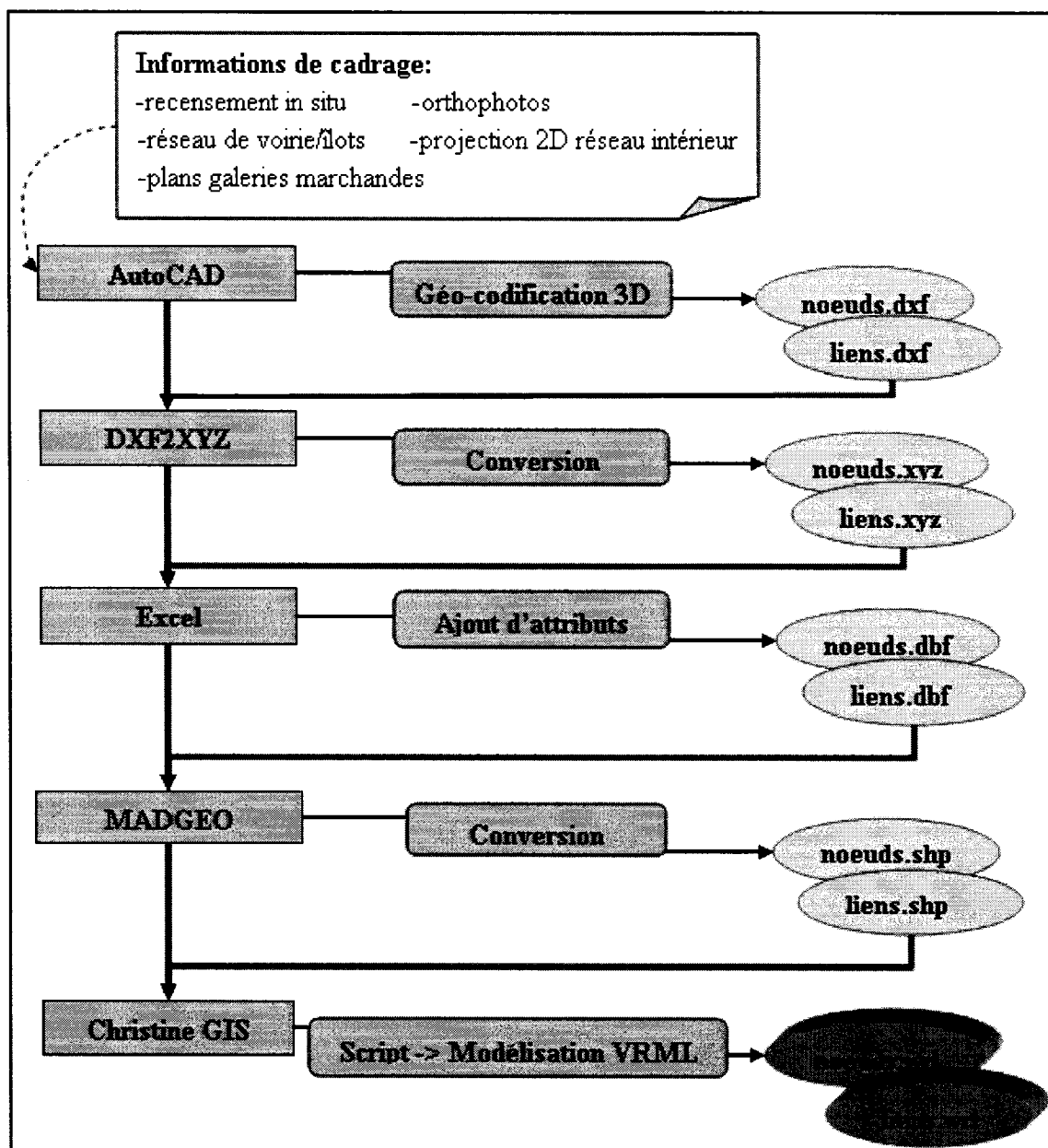


Figure 4.21: Suite de procédures informationnelles pour la visualisation en réalité virtuelle

Les Figure 4.22 et Figure 4.23 illustrent des exemples de visualisation en réalité virtuelle de certaines sections du réseau piétonnier protégé. Sur ces descriptions tridimensionnelles, les noeuds et liens sont respectivement représentés par des sphères et cylindres où une couleur correspond au mobilier urbain caractérisé.

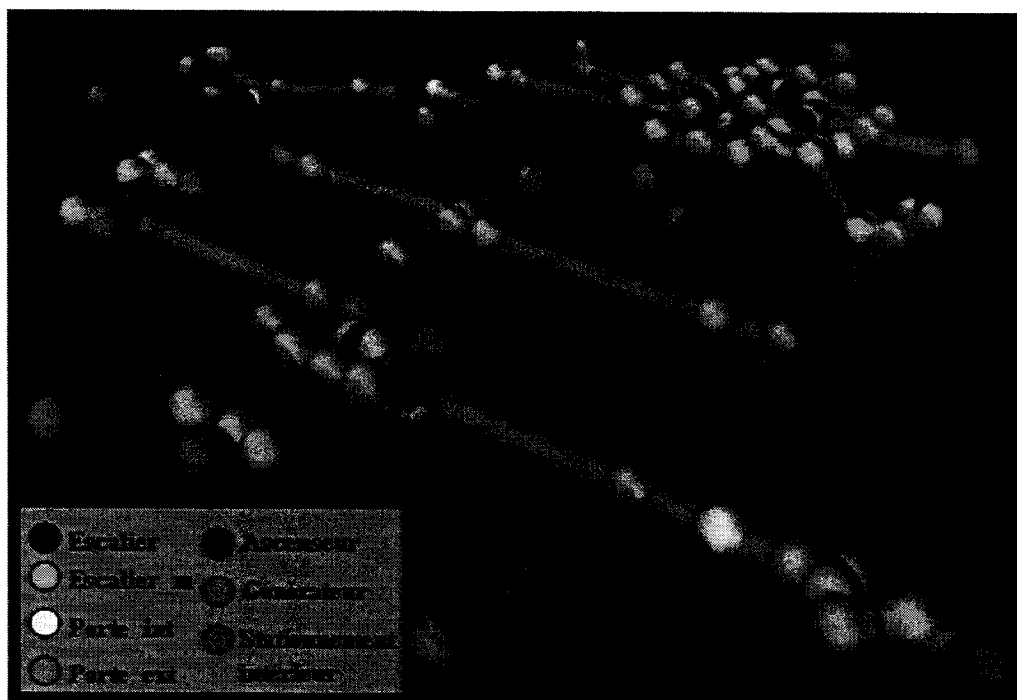


Figure 4.22: Description du réseau filamenteux en réalité virtuelle : Place Ville-Marie

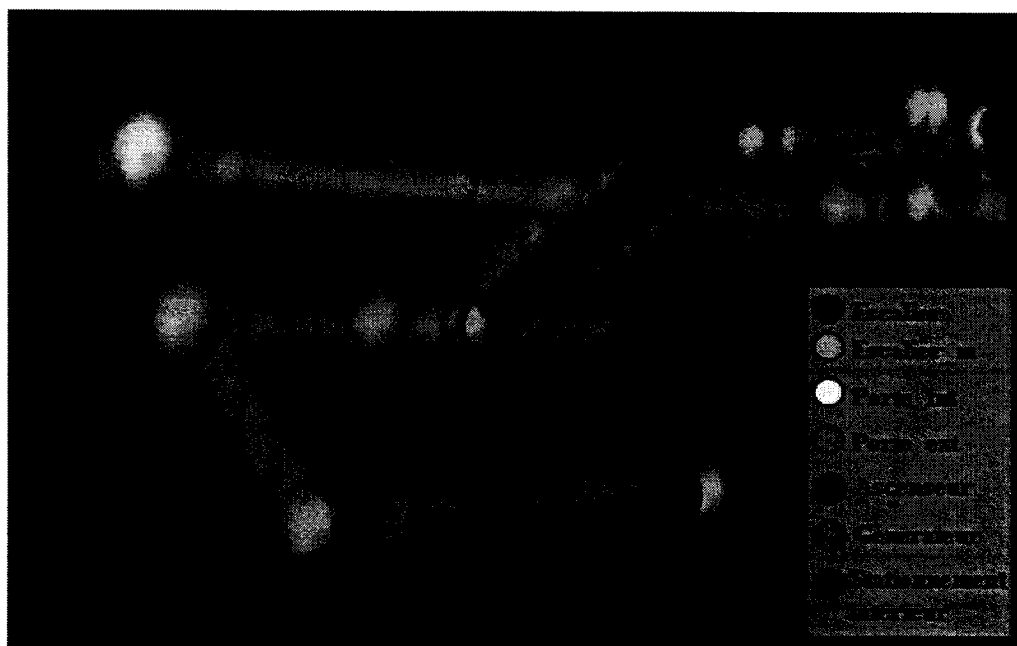


Figure 4.23: Description du réseau filamenteux en réalité virtuelle : vue de profil de la Place Bonaventure

L'intégration d'informations déclarées lors d'une enquête ménage, jumelées à un calculateur de chemins, permet la représentation d'itinéraires probables sur le réseau. Pour une heure d'arrivée estimée, une destination et un motif précis, les itinéraires animés peuvent être décrits dans un environnement VRML. La description structurée, en base de données (Tableau 4.3), de la suite séquentielle des noeuds empruntés, reliée au temps de passage cumulé, permet la construction de la trace statique ainsi que l'animation par interpolation du déplacement sur le réseau. La Figure 4.24 expose la simulation de trois déplacements pour des personnes en transit au Terminus du Centre-Ville (TCV) et qui se destinent à trois générateurs distincts (Place Ville-Marie, Centre Bell et Place Bonaventure). Par ce fait même, les temps de parcours peuvent être estimés selon une vitesse de marche variable selon le mobilier urbain rencontré (escalier fixe, escalier mobile ou ascenseur) et le sens emprunté sur ceux-ci.

Tableau 4.3: Extrait d'une conceptualisation de trajectoires en base de données

ID_TRACE	ORDRE	X	Y	Z	TEMPS
1	1	299612.3	5039819.6	20.5	0.0
1	2	299604.2	5039826.2	20.5	7.9
1	3	299591.0	5039834.6	12.8	25.8
1	4	299588.6	5039835.1	12.8	27.7
2	1	299612.3	5039819.6	20.5	0.0
2	2	299604.2	5039826.2	20.5	7.9
2	3	299591.0	5039834.6	12.8	25.8
2	4	299588.6	5039835.1	12.8	27.7
2	5	299578.6	5039826.6	12.8	37.5
2	6	299576.6	5039824.8	12.8	39.6
2	7	299568.1	5039834.2	12.8	49.1
2	8	299558.7	5039842.2	12.8	58.4
3	1	299612.3	5039819.6	20.5	0.0
3	2	299604.2	5039826.2	20.5	7.9
3	3	299591.0	5039834.6	12.8	21.0
3	4	299588.6	5039835.1	12.8	23.5

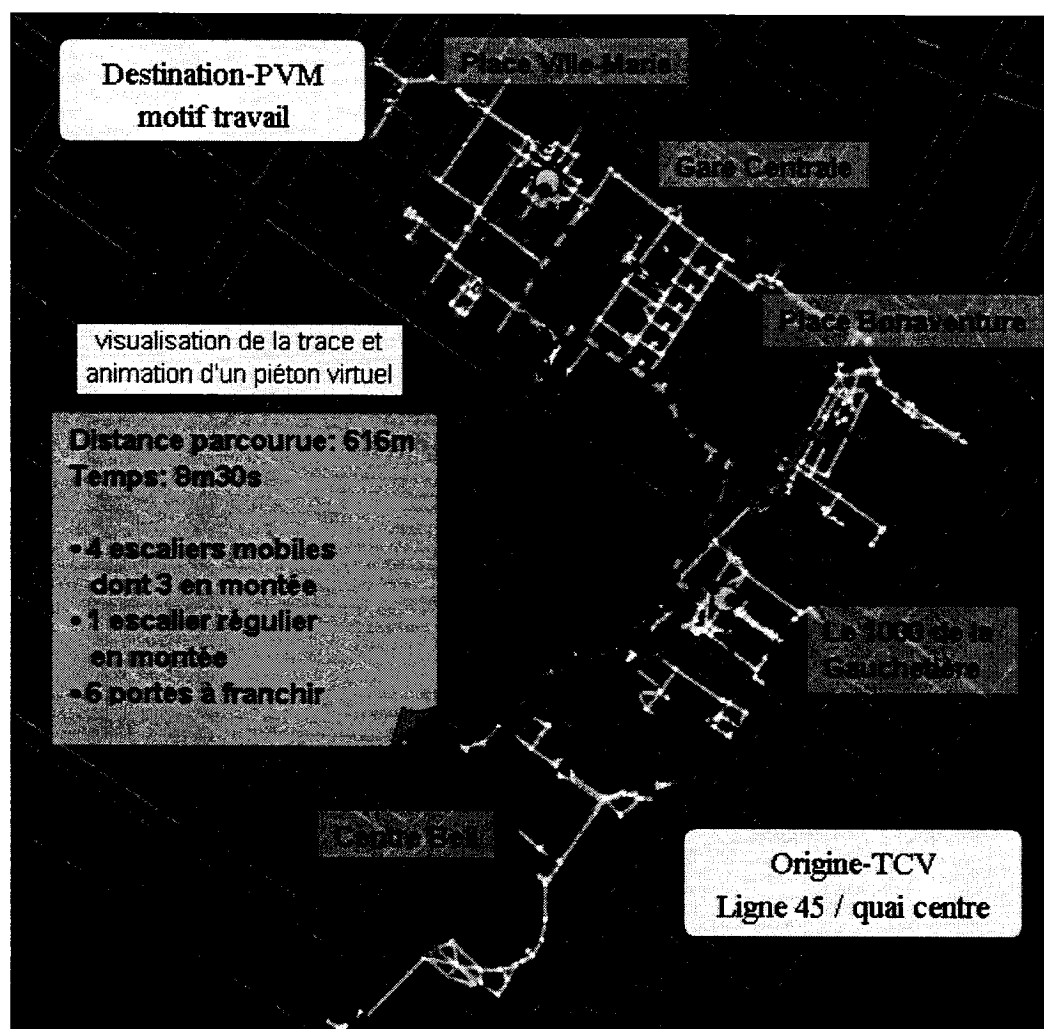


Figure 4.24: Visualisation en réalité virtuelle d'un itinéraire animé dans la ville intérieure

Chapitre 5 : Géocodage et générateurs du centre-ville

Si l'on se réfère à la définition d'un déplacement, ce dernier dispose de deux extrémités, soient une origine et une destination. Selon le traitement totalement désagrégé, celles-ci sont géolocalisées sur le territoire par une paire de coordonnées x-y. Ainsi, les générateurs de déplacements, lieux uniques d'attraction d'un grand nombre de personnes, se retrouvent à la base même de la notion de déplacement en transport. Pour analyser le caractère unique de chacun des générateurs, un niveau de détail très fin est nécessaire. Or, l'approche totalement désagrégée offre l'opportunité d'étudier le caractère véritable des générateurs de déplacements grâce au raffinement spatial soutenu par la géolocalisation x-y des extrémités de déplacement.

Le géocodage des extrémités de déplacements reste une étape délicate. Une erreur à ce niveau peut engendrer des biais dans l'analyse de mobilité et la reconstitution de l'itinéraire déclaré. Les conséquences restent plus importantes lorsqu'on s'intéresse aux déplacements piétonniers et d'accès à la destination. En effet, ces derniers se reportent à des parcours de courte distance où la distance maximale admise par les usagers pour accéder à un arrêt ou à une destination par la marche est de 400 mètres (O'Sullivan et Morrall, 1996). Dans le but d'étudier les grands générateurs de la ville intérieure, le présent chapitre expose l'analyse sommaire et la validation du positionnement actuel des extrémités de déplacements pour appuyer le niveau de résolution nécessaire à l'étude de la mobilité piétonne. Finalement, un outil d'analyse pour caractériser les générateurs de déplacements annexés à la ville intérieure est exposé.

5.1 La génération de déplacements

5.1.1 Approche agrégée

La modélisation agrégée, ne permet pas de prendre en considération la disparité des générateurs de déplacements puisqu'ils sont dissimulés sous une entité zonale. Comme mentionné au chapitre 2, l'étape de la génération de déplacement permet de prédire le nombre total de déplacements, générés et attirés pour chaque zone du territoire étudié, spatialisés aux centroïdes respectifs. Cette étape se base essentiellement sur des modèles de prédiction.

On retrouve deux types de modèles de génération de déplacement : la régression linéaire et l'analyse catégorielle. La première approche vise à estimer, par régression simple ou multiple, le nombre de déplacements générés en fonction de caractéristiques socio-économiques moyennes de la zone. Les facteurs utilisés dans les études de production de déplacements sont (Ortuzar et Willumsen 1994): le revenu, la possession automobile, la structure et la composition des ménages, la valeur foncière du terrain, la densité résidentielle et l'accessibilité. La seconde approche, l'analyse catégorielle, évite l'hypothèse de linéarité par la confrontation croisée de variables pour la prédiction du taux de déplacement de chaque groupe d'individus. Pour l'étude de la production, le taux de déplacements est souvent établi en fonction de la taille du ménage et de la possession automobile (tableau 5.1).

Tableau 5.1: Exemple d'analyse catégorielle - taux de production de déplacements (adapté de Meyer et Miller 1984)

Composition ménage	Possession automobile		
	0	1	2 et +
1	1.19	2.57	1.7
2	1.43	3.16	2.17
3	1.45	4.55	4.74
4 et +	2.02	4.4	5.05

Ce type d'analyse se transpose à l'estimation des déplacements attirés par une classification selon le type d'activité des établissements et la densité d'emplois associée.

Il existe différentes études de prédiction de déplacements permettant d'assister le planificateur à approximer le taux de déplacements engendré par une classe précise d'établissements ou par le type d'occupation du sol. Ces taux sont principalement dérivés d'enquêtes in situ. En ce sens, l'ITE (Institute of Transportation Engineering, 2003) publie un manuel qui établit des taux de génération pour différents types de générateurs selon des variables socio-économiques comme : le type d'activité, le nombre d'employés, le nombre d'étudiants, la superficie totale habitable, etc. Par ailleurs, il existe des études spécifiques pour la génération de déplacements piétonniers, comme illustré à la figure 5.1. Cependant, la disparité et la variation spatio-temporelle de la demande ainsi que l'offre en transport desservant le générateur sont souvent négligées dans ce type de document puisqu'une seule valeur moyenne existe pour une catégorie typique.

LAND USE TYPE	TRIP GENERATION RATES/PEDESTRIANS PER 1000 SQ. FT.									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	
RETAILING										
SPECIALTY RETAILING										
NEIGHBORHOOD SHP. CTR.										
COMMUNITY SHP. CTR.										
NORMAL RETAILING										
REGIONAL SHOPPING CENTER										
FAST FOOD CARRY OUT										
FAST FOOD WITH SERVICE										
FULL SERVICE										
OFFICES										
LOCAL USE BUILDINGS										
HEADQUARTERS BUILDINGS										
MIXED USE BUILDINGS										
ALL OFFICE USES										
RESIDENTIAL										
SINGLE FAMILY DWELLING										
APARTMENT DWELLINGS										
HOTELS AND MOTELS										
PARKING										
METERED CURB										
UNMETERED CURB										
PARKING LOT										
PARKING GARAGE										

Figure 5.1: Table de génération de déplacements piétonniers en fonction du type et de la taille du générateur (tirée de NJDOT, 2000; sources FHWA, 1979)

5.1.2 Approche totalement désagrégée

Pour sa part, le traitement totalement désagrégé des enquêtes ménages reconnaît les comportements distincts des générateurs de déplacements selon leur caractère spatial et unique. En effet, la destination n'est plus considérée comme un centroïde de zone ou un lieu aux propriétés moyennes de sa catégorie, mais un lieu spécifique et dépendant des caractéristiques avoisinantes. Avec une approche totalement désagrégée, l'unicité des générateurs est préservée contrairement à l'agrégation par catégorie de générateur. La variation temporelle et l'accessibilité aux infrastructures de transport demeurent des variables importantes dans la génération de déplacements. Ces dernières peuvent être analysées par l'entremise de cette modélisation fondée sur une enquête ménage où les dimensions spatiales et temporelles sont discrétisées. Par le traitement individuel et systémique des données d'enquêtes, l'objet générateur est dérivé de la localisation et de la dénomination du lieu de destination, comme l'illustre le schéma conceptuel orienté-objet à la Figure 5.2.

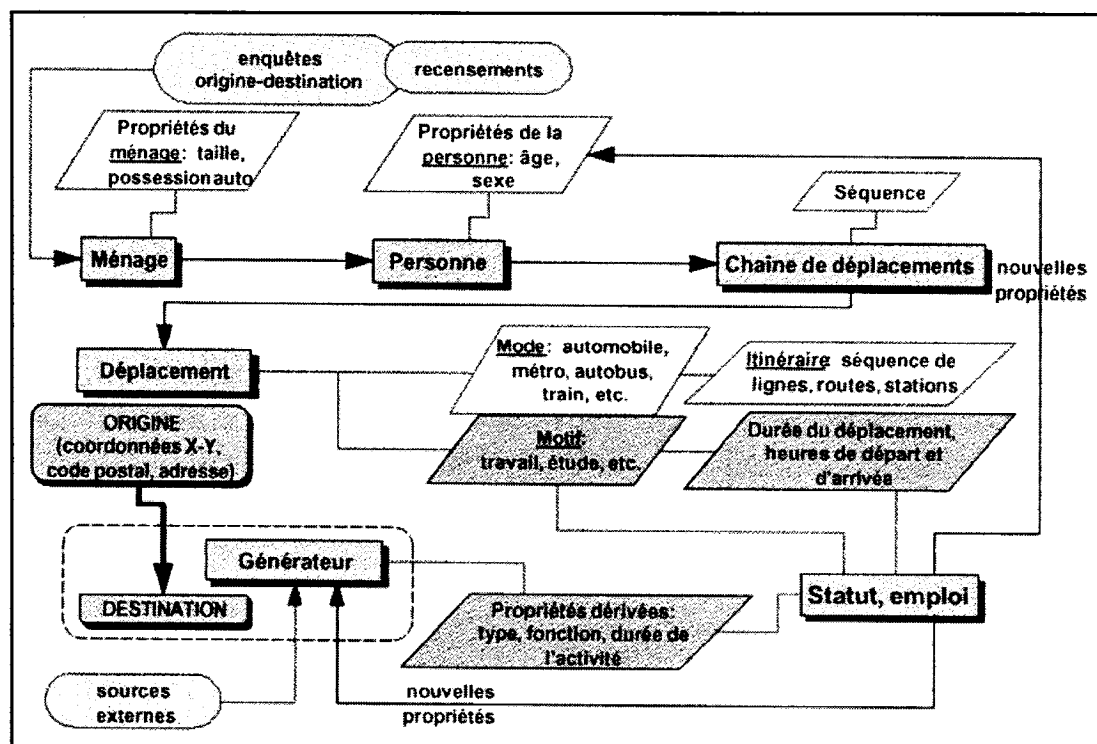


Figure 5.2: Positionnement du générateur de déplacement dans le traitement totalement désagrégé du fichier de déplacements (Chapleau, 1999)

La conservation de l'ensemble des variables associées aux itinéraires de déplacements ouvre la voie à l'analyse détaillée des générateurs de déplacements. Différentes études antérieures abordent des questionnements sur les générateurs de la Grande Région Métropolitaine de Montréal. Les premiers travaux méthodologiques d'analyse des extrémités de déplacements basés sur les enquêtes ménages ont été présentés par Chapleau (1993). Ce dernier, propose une carte d'utilisation du sol où le cadre bâti des générateurs subit une extrusion selon le nombre de destinations révélées lors de l'enquête. Ultérieurement, d'autres travaux ont portés sur des questionnements de caractérisation des usagers relatifs à des générateurs individuels ou pour différentes catégories selon les enquêtes ménages de 1989 et 1993 (Chapleau et Trépanier, 1994; Trépanier et Chapleau, 1996). Ce type d'analyse a entre autres permis la dérivation de modèles de génération. Tout dernièrement, avec la venue de l'approche orientée-objet en transport, jumelée à l'approche totalement désagrégée, l'analyse des générateurs s'amène à des niveaux de détails plus raffinés. Or, les vrais comportements de la clientèle associée aux générateurs, les infrastructures de transport empruntées et leur zone d'influence sont des exemples de nouveaux questionnements. En ce sens, l'intégration relationnelle de l'objet générateur au sein de la modélisation de la demande par la simulation des itinéraires permet d'étudier les impacts sur l'utilisation des infrastructures et l'influence comportementale sur les déplacements de la clientèle suite à la relocalisation de grands générateurs de déplacements en milieu urbain (Trépanier et al. 2002).

5.2 Géocodage des extrémités de déplacement

La géolocalisation fine des extrémités de déplacement a véritablement débuté en 1987 au niveau du code postal (environ 70 000 entités), assisté par le module de validation de MADITUC. Avant cette date, les enquêtes s'appuyaient sur un découpage territorial d'environ 1500 zones. Les enquêtes qui suivirent ont toutes profité du raffinement des systèmes d'information géographique transport pour procéder à une géocodification x-y de tout lieu spatial impliqué dans un déplacement, où les extrémités sont localisées selon

leur nature propre (générateur, adresse civique, intersection de rues). Ce géocodage a fait ses preuves pour l'analyse spatio-temporelle de la mobilité dans la Grande Région Métropolitaine.

Lors de l'enquête de 1998, le processus de géocodage se réalisait simultanément avec la saisie des déclarations des répondants par un logiciel d'enquête. Durant une entrevue typique, le répondant peut évoquer son origine et destination selon six types de déclarations: dénomination d'un générateur, adresse civique, intersection de rues, nom d'une rue, code postal et en dernier recours, par la dénomination d'une municipalité (quartier). Selon l'information saisie, le logiciel MADQUOI recherche, dans la base de données de référence associée, la géolocalisation x-y de l'extrémité de déplacement. Dans un environnement de saisie automatique et de validation interactive, si l'information avancée n'est pas reconnue, un message avertit l'interviewer et lui offre la possibilité d'effectuer une vérification auprès du répondant ou d'accepter l'entrée non reconnue. Si l'interviewer ne réussit pas à saisir une extrémité de déplacement existante dans les bases de données de références, la déclaration est transmise au comité de géocodification pour un post-traitement permettant la reconstruction logique du lieu spatial selon les informations saisies lors de l'entrevue.

Le tableau 5.2 illustre l'ampleur des dictionnaires de références pour l'étape de géocodification interactive et simultanée lors de l'enquête. Bien que ces données proviennent de sources différentes, il demeure que toutes ont été normalisées selon des standards fixes et préétablis par le Groupe MADITUC.

Tableau 5.2: Dictionnaires des géoréférences pour le géocodage des extrémités de déplacement – Enquête OD 1998 (Groupe MADITUC, 1999)

Base de données	Nb. enregistrements	Provenance
Générateurs	- 27 341 lieux uniques - 44 039 dénominations	- enquêtes précédentes - suite d'activités du Groupe MADITUC - informations colligées au centre de renseignement AUT-OBUS à la STM - listes, annuaires, cartes, sites Web
Adresses	- 112 238 tranches d'adresses - 33 797 sections de rues - 19 395 dénominations	- suite d'activités du Groupe MADITUC - fichier Postes Canada (nouveaux numéros civiques)
Intersections	- 52 799 carrefours - 189 560 dénominations	- topologie du fichier des adresses régionales
Code postal	- 89 130 codes	- dictionnaires de Postes Canada et du fichier de position des codes
Rues	- 33 797 sections de rues - 19 395 dénominations	- topologie du fichier des adresses régionales

Il est à noter que la déclaration d'une destination peut comporter plusieurs éléments d'information. Prenons l'exemple d'une personne mentionnant s'être rendue à la tour « IBM Marathon » : si l'interviewer ne retrouve pas le générateur à cause d'une erreur de saisie, alors le répondant peut préciser qu'il s'agit de l'édifice érigé au 1250 boulevard René-Lévesque Ouest; l'interviewer ajoute donc cet élément d'information. Ainsi le générateur peut être retrouvé et les deux informations, conservées. Cependant, une seule paire de coordonnées est attribuée. En somme, une extrémité de déplacement peut comporter jusqu'à six types d'informations différentes, dans la mesure où les coordonnées dépendent du degré de précision de la réponse de l'interlocuteur.

L'emplacement typique des géoréférences est la suivante (Figure 5.3):

Générateur : coordonnées généralement situées à l'intérieur du cadre bâti de l'édifice ou du lieu d'attraction;

Adresse civique : coordonnées attribuées selon l'interpolation linéaire entre les numéros civiques de début et de fin du segment de rue associé;

Intersection : coordonnées du noeud représentant la connexité des segments de rues et qui définissent l'intersection;

Code postal : coordonnées au milieu du côté d'îlot correspondant au code postal ou lieu d'une boîte postale;

Rue : coordonnées du centre linéaire de la rue;

Municipalité : coordonnées de l'hôtel de ville ou d'une géoréférence correspondant à un quartier, une île ou tout autre lieu définissant un territoire.

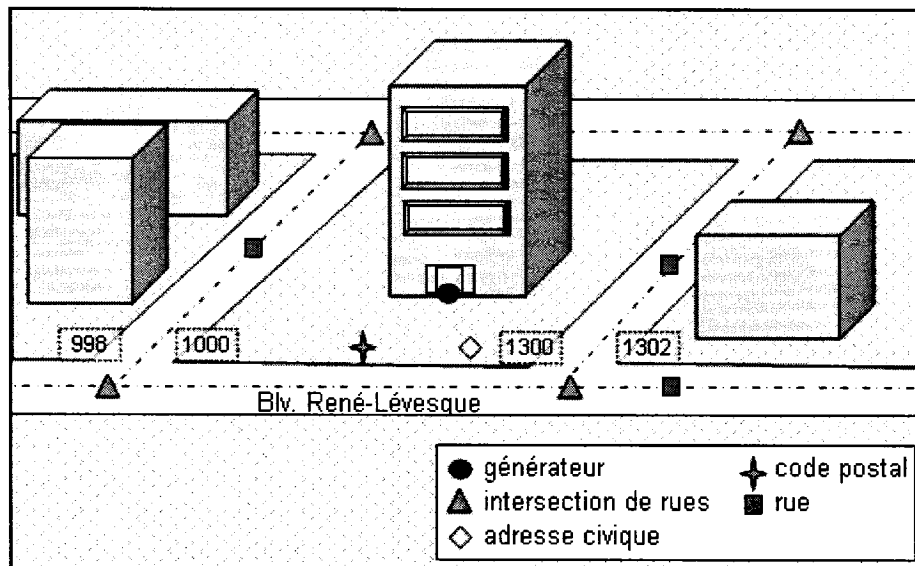


Figure 5.3: Ensemble des géolocalisations possibles pour le 1250 boulevard René-Lévesque

Puisque les déclarations comportent plusieurs informations, le tableau 5.2 expose la répartition et la combinaison des déclarations effectuées par les répondants lors de l'enquête de 1998 pour exprimer les extrémités de déplacements à l'intérieur du quadrilatère d'étude du centre-ville (18542 déclarations). De plus, pour chaque catégorie de déclarations est établi le nombre d'extrémités de déplacements géocodés selon l'information de ce champ. Ce tableau illustre bien la forte proportion de déclarations par dénomination d'un générateur ainsi que par intersection de rues. Bien que la

déclaration par générateur soit une priorité, plusieurs circonstances peuvent influencer le choix du type de déclaration effectué par le répondant : le désir de confidentialité, la difficulté du répondant de nommer avec précision la destination des autres membres du ménage, l'inaptitude de l'interviewer à relancer le répondant pour clarifier la déclaration, etc. Malgré tout, par l'utilisation d'une méthode de proximité spatiale, les déclarations par intersection de rue peuvent être jointes aux générateurs. Pour leur part, les déclarations par adresses civiques peuvent être directement associées aux générateurs correspondants lorsque l'information référentielle est présente dans le dictionnaire des générateurs.

Tableau 5.3: Répartition des types de déclarations et du géocodage associé - Enquête OD98

Type de déclaration	Combinaison de déclarations				Total par type	Type géocodage	%
	GEN	ADR	INT	RUE			
Générateur (GEN)	7408	268	504	47	8227	7559	40,8%
Adresse civique (ADR)	268	1564	2	0	1834	1823	9,8%
Intersection de rues (INT)	504	2	6819	0	7325	7219	38,9%
Rue	47	0	0	76	123	76	0,4%
Municipalité (seulement)	-	-	-	-	119	130	0,7%
Domicile	-	-	-	-	1734	1734	9,4%
Autres	-	-	-	-	1	1	0,0%
Total:						18542	

Les tableaux 5.4 et 5.5 recensent respectivement les générateurs et intersections de rues les plus importants en terme de nombre de déclarations lors de l'enquête de 1998 pour le quadrilatère à l'étude. Par ailleurs, la spatialisation des générateurs annexés à la ville intérieure est réalisée à la Figure 5.4.

Tableau 5.4: Les 15 générateurs de déplacements du centre-ville les plus déclarés - Enquête OD 98

	Générateur	Ville intérieure	Catégorie	déplacements pondérés
1-	Complexe Desjardins	X	Multifonctionnel	12357
2-	Université Concordia		Enseignement	11395
3-	Place Ville-Marie	X	Multifonctionnel	11038
4-	Centre Eaton	X	Centre commercial	9976
5-	Place Bonaventure	X	Multifonctionnel	5374
6-	Hôpital Royal-Victoria		Santé	4472
7-	Centre Bell	X	Loisir et culture	4341
8-	Tour de la Bourse	X	Édifice à bureaux	3850
9-	Hôpital St-Luc		Santé	3783
10-	UQAM (Arts)		Enseignement	3398
11-	Université McGill (Air, Space & Law)		Enseignement	3300
12-	La Baie	X	Centre commercial	3166
13-	Eaton Centre-Ville (Ailes de la Mode)	X	Centre commercial	2921
14-	Université McGill (Architecture)		Enseignement	2525
15-	Collège Lasalle		Enseignement	2504

Tableau 5.5: Les 10 intersections de rues du centre-ville les plus déclarées - Enquête OD 98

	Intersection			déplacements (pondérés)
A-	Peel	/	Ste. Catherine O.	7258
B-	University	/	René-Lévesque O.	5500
C-	McGill College	/	Ste. Catherine O.	5301
D-	Peel	/	René-Lévesque O.	5073
E-	Guy	/	Ste. Catherine O.	3603
F-	University	/	de la Gauchetière O.	3403
G-	Peel	/	Sherbrooke O.	3263
H-	University	/	Sherbrooke O.	3237
I-	University	/	Ste. Catherine O.	3190
J-	Bleury	/	Ste. Catherine O.	2974

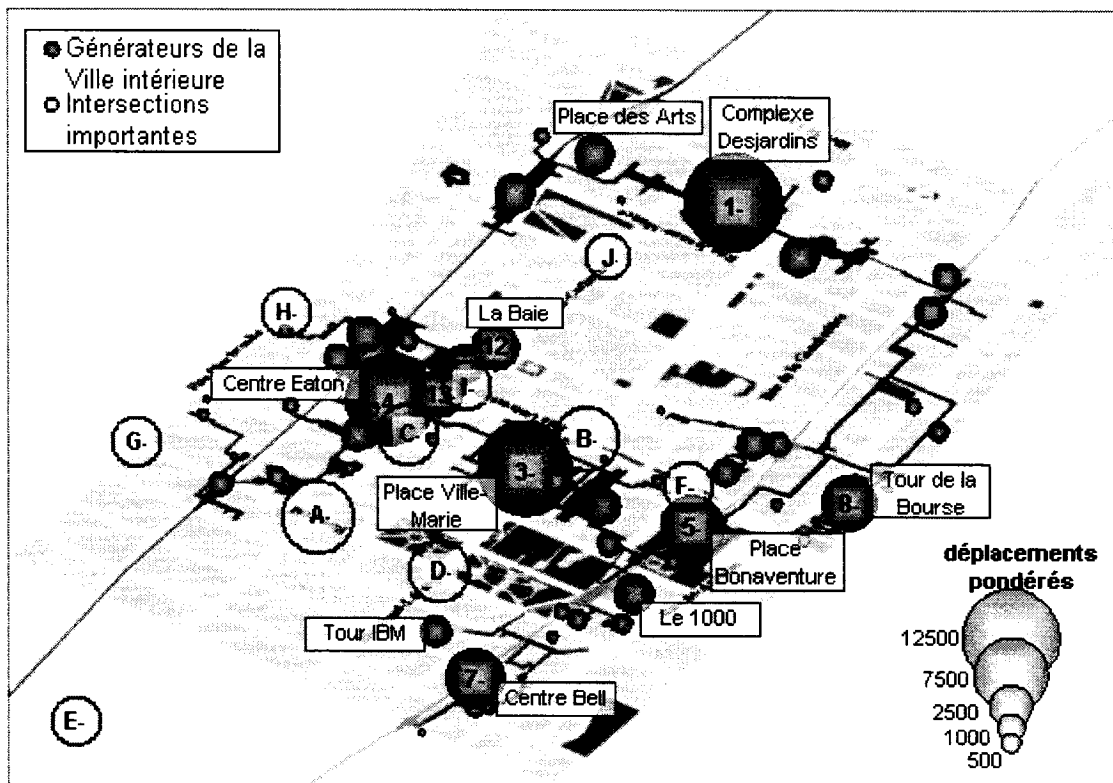


Figure 5.4: Générateurs de déplacements de la ville intérieure et intersections importantes

5.3 Validation des générateurs au centre-ville

Le géocodage des extrémités de déplacement demeure une étape cruciale. Bien que cette étape s'appuie sur une gestion objective des bases de données géoréférencées, normalisées et structurées, la mise à jour de celles-ci demeure ardue et comporte des risques pour l'intrusion d'erreurs. Ceci est particulièrement vraie pour la base de données des générateurs de déplacements, puisque celle-ci provient d'une panoplie de sources et nécessite une mise à jour plus rigoureuse face aux changements en continue des dénominations, des déménagements ainsi que des fermetures ou ouvertures de nouveaux lieux d'attraction. Afin de valider la géolocalisation des générateurs de déplacements du dictionnaire de référence, celle-ci peut se confronter à une source de données externe qui recense les établissements montréalais.

5.3.1 REEM

Le Répertoire des Établissements et des Emplois de Montréal est réalisé tous les quatre ans par la Ville de Montréal. Ce recensement sert essentiellement à répertorier les établissements du territoire montréalais tout en recueillant de l'information socio-économique (dénombrement des emplois ainsi que catégorisation de la nature des activités). De plus, toutes les entreprises sont géoréférencées par une paire de coordonnées x-y, dans le système de référence MTM NAD 83, dérivée de leur numéro de matricule d'évaluation foncière. Le secteur économique est exprimé par un code numérique SCIAN (Secteur industriel en Amérique du Nord). Ce dernier comporte deux types d'information qui permettent de classer l'entreprise selon la nature de ses activités économiques : les deux premières valeurs numériques indiquent le secteur économique tandis que les derniers représentent la classe d'activité de l'entreprise. Par exemple, le code 722110 indique une entreprise oeuvrant dans le secteur de l'hébergement et de la restauration « 72 »; spécialisée dans la restauration à service complet « 2110 ».

Tableau 5.6: Extrait et documentation de la base de données du REEM 2000

<i>Champs</i>	<i>Exemple 1</i>	<i>Exemple 2</i>	<i>Description</i>
ID	27774	27451	Identificateur unique de l'établissement
RAISON_SOC	SAMSON BELAIR DELOITTE ET TOUCHE	ROTISSERIE COQ'N ROK INC.	Dénomination de l'établissement
ADRESSE	1 PLA VILLE- MARIE 3000	1250 Boulevard RenÚ-LÚvesque O 307	Adresse civique
ORIENT		O	Orientation de l'odonyme
CODE_SCIAN	541212	722210	Code du Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN) 1997
EMPLOI	600	4	Nombre d'emplois
NO_CIVIQUE	1	1250	Numéro civique
CODE_RIRE	2237	1863	Code du Répertoire Informatisé des Rues et Établissements de la Ville de Montréal
COMPTE_LOC	15471100	15446642	Numéro du compte locatif
COMPTE_FON	14184350	14191052	Numéro du compte foncier
CODE_POSTA	H3B4T9	H3B4W8	Code postal
XCOORD	299419	299312	Coordonnée en X (MTM)
YCOORD	5040198	5039715	Coordonnée en Y (MTM)

L'information qui découle de cette base de données peut s'avérer utile dans le cadre d'analyse de génération de déplacements connaissant le nombre d'emplois et le type d'activité économique. Cependant, le jumelage des deux bases de données ne peut se réaliser à l'aveugle sans l'assurance d'une adéquation des données. Malheureusement, la base de données produite par la Ville de Montréal n'a pas la même finalité que les bases de données de références pour la géolocalisation des extrémités de déplacement. En ce sens, les dénominations des établissements et les adresses civiques ne suivent pas une normalisation stricte, en particulier pour la déclaration des noms de rue. En effet, on y retrouve des dénominations différentes ainsi que des suffixes non uniformes pour une même rue. La normalisation de ce fichier demeure complexe par la présence d'appellations hétérogènes et la combinaison du numéro civique, de l'odonyme et du générique dans un seul champ. Malgré tout, une normalisation suivant les standards du groupe MADITUC a été réalisée sur la dénomination des adresses civiques de la base de données du REEM de l'arrondissement Ville-Marie. Cette normalisation permet la création d'une relation entre le REEM ainsi que les bases de données de références, par une dénomination standardisée des numéros civiques, odonymes, génériques et orientations des rues.

5.3.2 Validation tripartite (REEM - Générateurs - Adresses civiques)

Dans l'optique de valider le positionnement des générateurs de déplacements, une comparaison tripartite a été accomplie. Pour 80 différents générateurs du centre-ville de Montréal, dont les 65 connectés à la ville intérieure, une association relationnelle et comparative a été réalisée entre trois bases de données de référence : générateurs de déplacements, adresses civiques ainsi que les établissements du REEM de 2000 regroupés par adresses civiques. De cette manière, le rapprochement des paires de coordonnées, qui représentent a priori le même lieu, permet d'apprécier les erreurs de codification à l'intérieur de ces géobases. La visualisation se réalise par l'entremise d'une modélisation dans un système d'information géographique. La représentation de ces paires de coordonnées appariées forme un polygone triangulaire pour chaque lieu

unique (Figure 5.5). Cette représentation permet de visualiser les «excentricités relatives» causées par une géoréférence erronée (Figure 5.6).

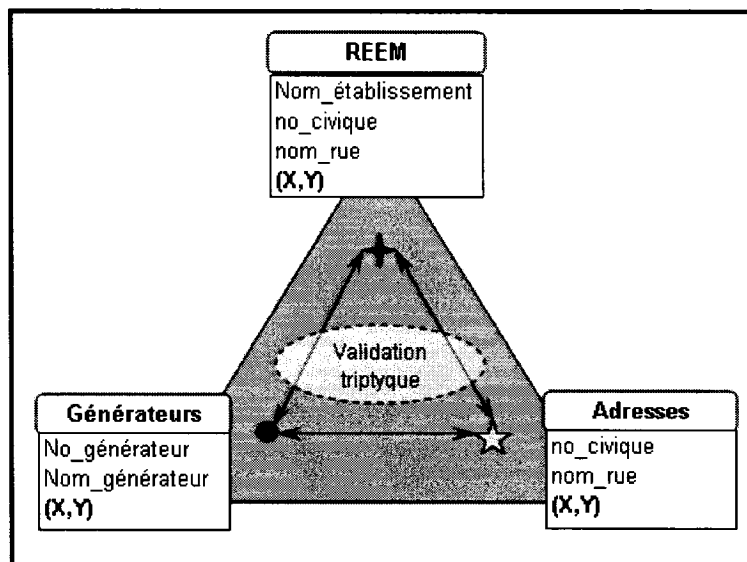


Figure 5.5: Validation tripartite des géolocalisations

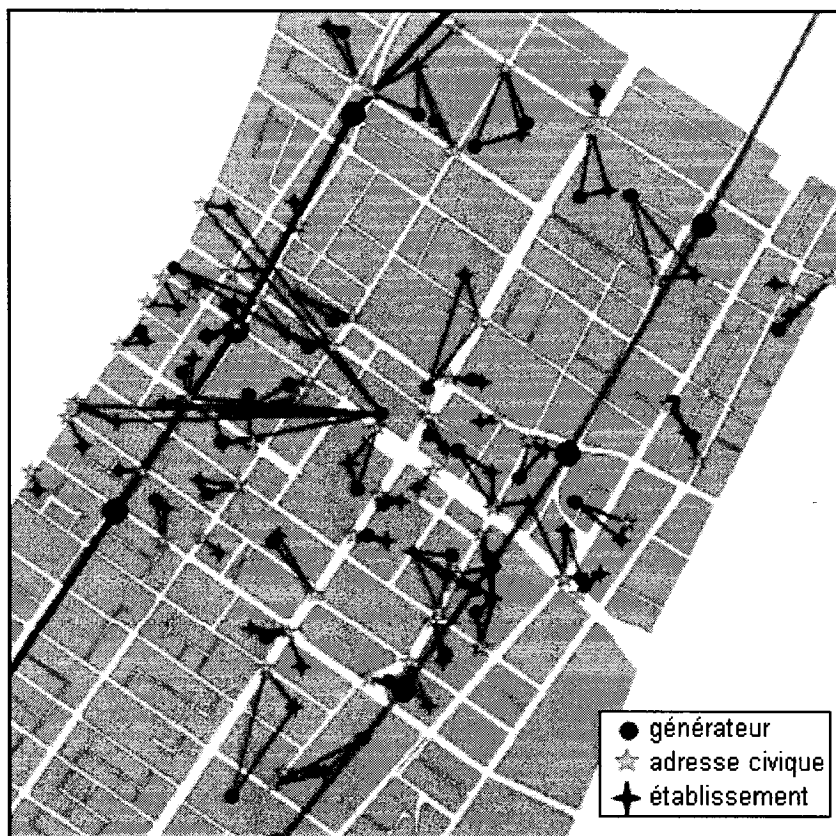


Figure 5.6: Visualisation des polygones triangulaires

À partir de cette visualisation, il est possible de reconnaître une géolocalisation valide lorsque le positionnement de l'établissement, du générateur et de l'adresse civique se retrouvent sur l'îlot approprié (Figure 5.7-a). D'ailleurs, trois types d'erreur émergent de cette visualisation :

- En b) est illustré le cas de la géolocalisation erronée (delta de 215 mètres) d'un générateur de déplacement (Tour IBM - 1250 René-Lévesque Ouest);
- En c) est représenté un décalage des plages d'adresses civiles pour un segment de rue;
- En d) est illustré une agglomération de générateurs en un point unique.

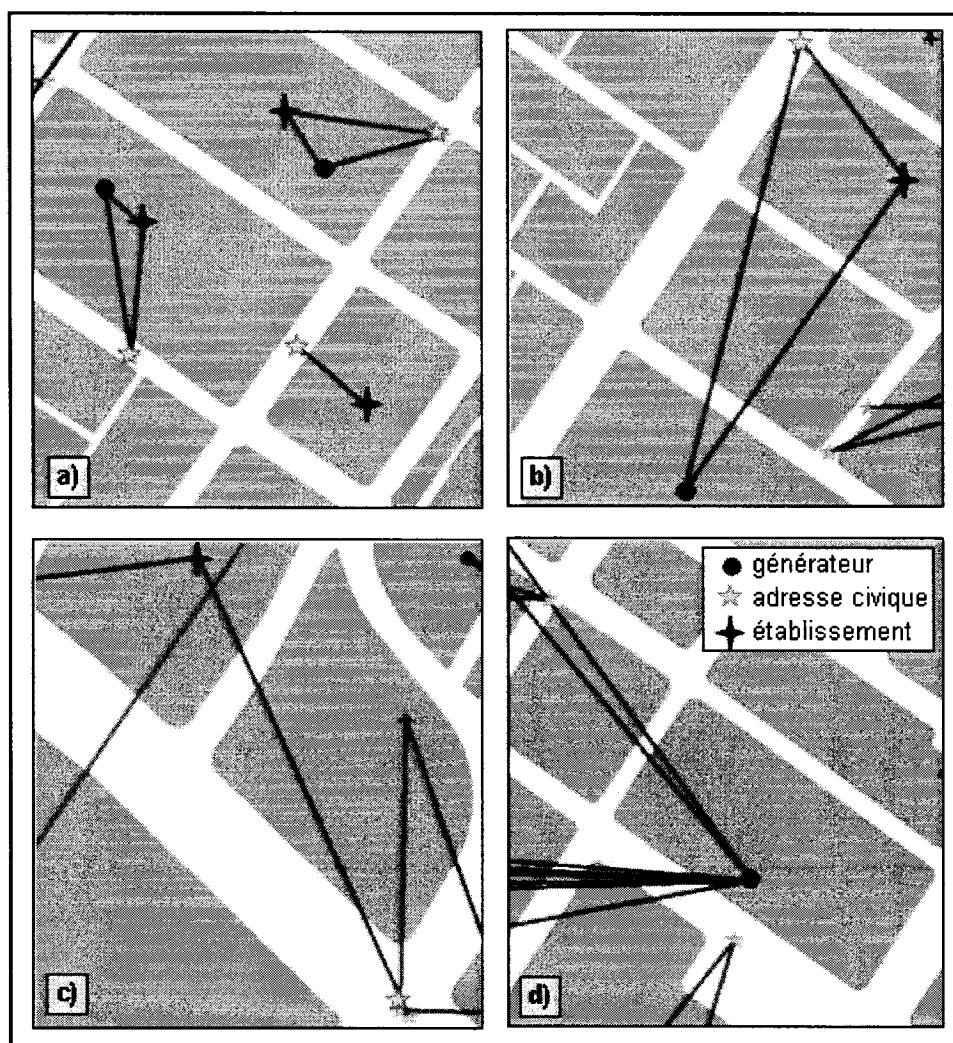


Figure 5.7: Exemples de validation par visualisation des polygones triangulaires

L'étude comparative des distances relatives entre les différentes bases de données permet la reconnaissance de géoréférences erronées ou à valider. Ainsi, pour l'exemple illustré à la Figure 5.8, on retrouve quatre zones distinctes:

- Zone I : géolocalisation fiable;
- Zone II : tranche d'adresses décalée et à vérifier;
- Zone III : géolocalisation du générateur et tranche d'adresses à vérifier;
- Zone IV : géolocalisation erronée du générateur de déplacement.

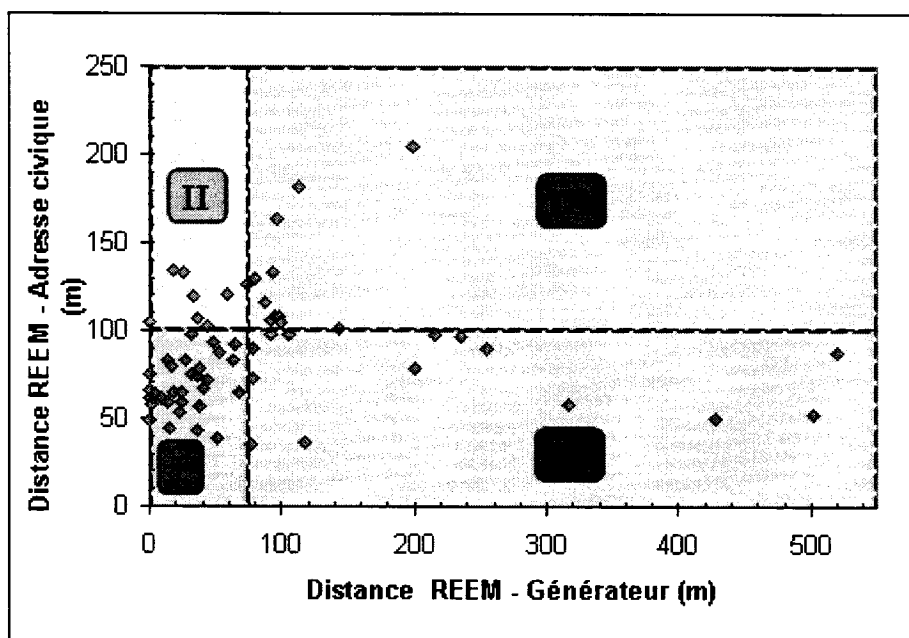


Figure 5.8: Excentricités relatives des géolocalisations appariées pour 80 lieux uniques

Les deux types de représentations précédentes dévoilent des localisations inexactes et appuient un processus de relocalisation pour certains générateurs du centre-ville. De cette façon, onze générateurs sur quatre-vingt ont été repositionnés suite à cette analyse comparative et tripartite. Sommairement, ce post-traitement affecte 19512 extrémités de déplacements par une relocalisation des générateurs sur une distance euclidienne variant entre 64 et 520 mètres, pour une distance moyenne pondérée de 124 mètres. Il est à noter que les générateurs les plus éloignés de leur localisation réelle comporte moins de déclarations.

5.3.3 Comparaison matricielle

La confrontation de l'enquête Origine-Destination à une source de données exogène permet d'éprouver la représentativité de l'échantillonnage (5% des ménages) et ce malgré la dissimilitude de la finalité première des deux sources de données. En ce sens, Chapleau (1999) compare, sur la base d'un découpage territoriale en 65 secteurs, le nombre de travailleurs mobiles selon l'enquête ménage de 1993 aux travailleurs déclarés dans le recensement canadien de 1991. Ce type de rapprochement accorde une corrélation notable ($R^2=0.99$) et ouvre la voie à l'étude du taux d'absentéisme et du phénomène du travail à domicile.

L'enquête Origine-Destination qui se veut a priori un outil d'analyse de la mobilité urbaine et basée sur un échantillon important de la Grande Région Métropolitaine, permet l'estimation et la spatialisation des emplois par une reconnaissance des extrémités de déplacements pour le motif travail. Ainsi, un rapprochement entre le REEM (données représentatives du nombre réel d'emplois) et l'enquête Origine-Destination peut s'effectuer. Une comparaison, pour un quadrilatère précis du centre-ville, se réalise par le dénombrement des emplois et des déplacements motif travail pour des aires égales, formant ainsi une matrice. Globalement, pour un quadrilatère comparable, 214 471 emplois sont déclarés dans le REEM de 2000, comparativement à 209 331 déplacements motif travail selon l'enquête de 1998, soit un écart de 2,4%. La Figure 5.9 établit une comparaison matricielle de la distribution spatiale des emplois et déplacements motif travail. Ces derniers sont cumulés selon différents découpages matriciels (100, 200, 400, 600 et 800 mètres). Les matrices ont toutes le même point d'origine, positionné de manière à assurer la présence, au sein de la même cellule, des géolocalisations (REEM et Enquête OD) définissant les deux plus grands générateurs du centre-ville (Complexe Desjardins et Place Ville-Marie). La mise en relation des matrices, sous forme de régression linéaire, démontre un effet d'échelle marquant. En effet, le coefficient de corrélation varie en fonction du niveau d'agrégation, passant de 0,35 à 0,99 pour les cellules aux dimensions respectives de 100 à 800 mètres.

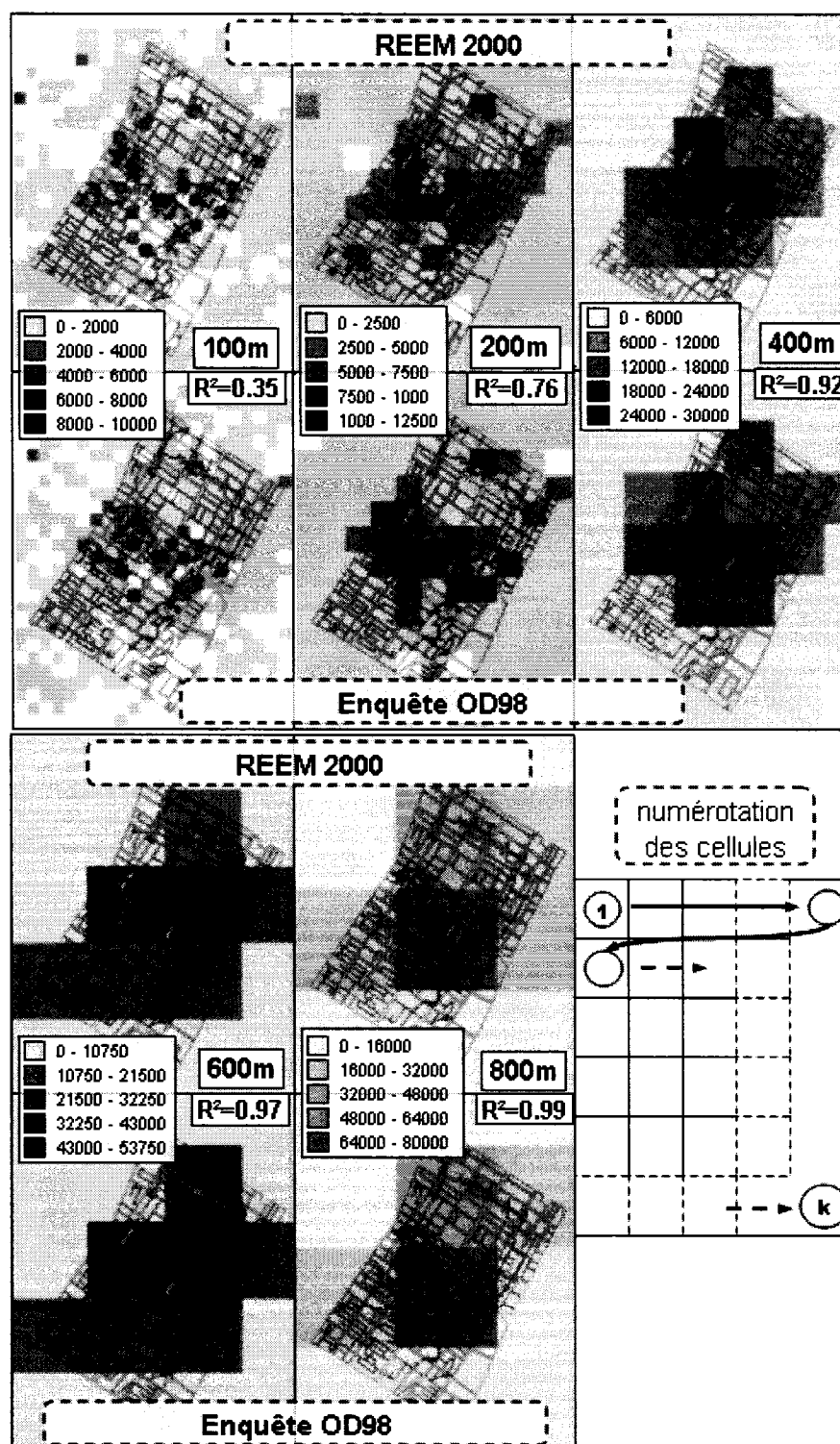


Figure 5.9: Comparaison matricielle des emplois et déplacements motif travail pour différents découpages

La Figure 5.10 illustre les régressions linéaires pour les découpages en cellules de 400 et 600 mètres. Ces courbes de tendances démontrent l'existence d'une corrélation spatiale et quantitative entre la distribution des emplois réels et celle dérivée de l'enquête Origine-Destination. L'ajout de la numérotation des cellules aux différents permet l'étude des résidus. En effet, on constate la présence de cellules voisines qui s'éloignent à l'opposée de la droite de symétrie attendue. Ceci s'explique par les géolocalisations non identiques d'un même lieu, mais principalement par le choix du niveau de résolution et de l'emplacement de la matrice.

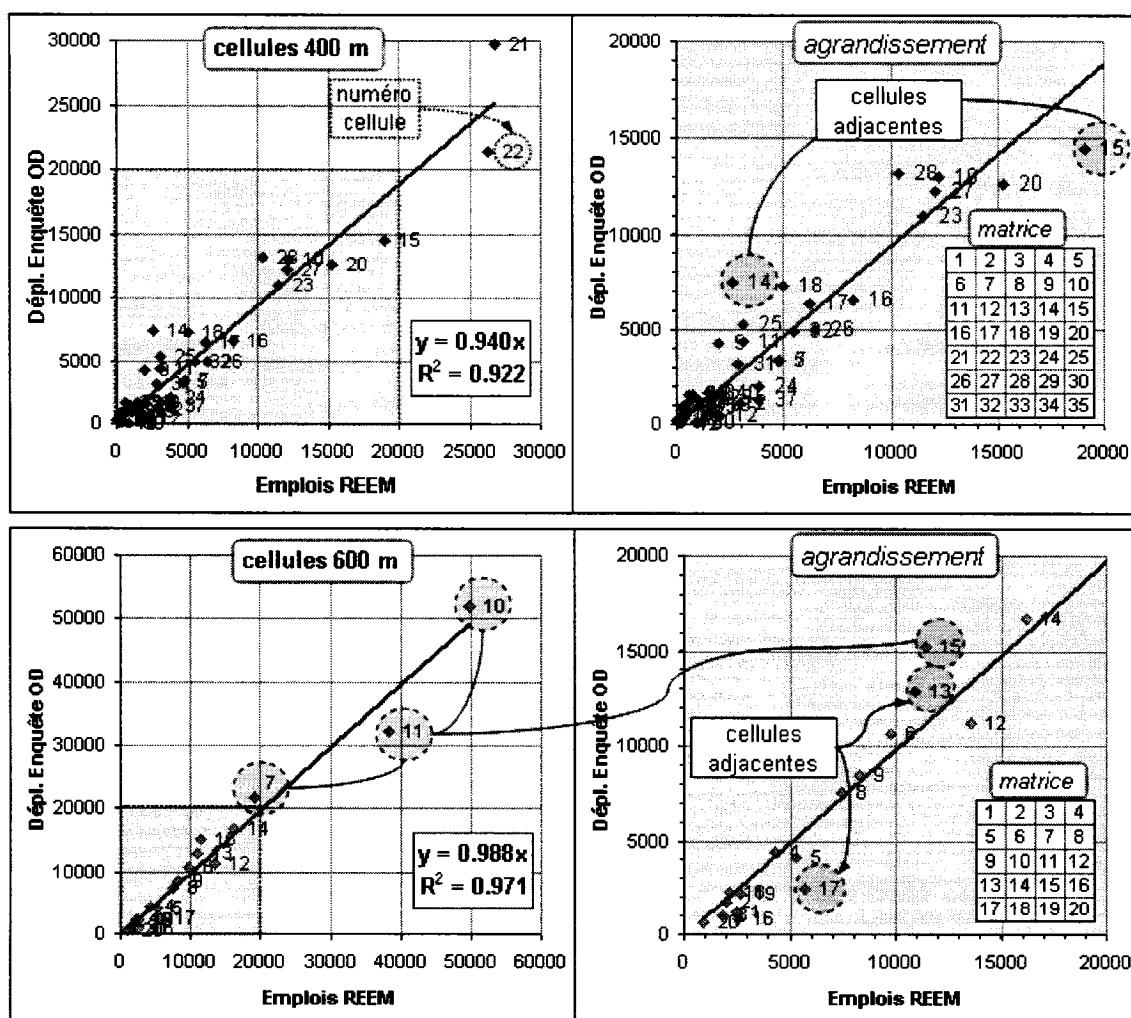


Figure 5.10: Régressions linéaires entre les emplois du REEM 2000 et les déplacements motif travail de l'enquête OD 1998

Il est à noter certaines limitations des données et de la méthode:

- La précision des données du REEM : la présence de valeurs arrondies à la dizaine ou à la centaine pour les grandes entreprises suggère une approximation du nombre d'emplois;
- Le double comptage des déplacements : l'utilisation unique de la variable motif travail implique le dénombrement de certains emplois en double. En effet, selon la méthode retenue, une personne qui se déplace à l'extérieur de son milieu de travail pour effectuer une autre activité importante (magasinage, rendez-vous d'affaire, etc.) et ensuite retourner au travail, engendre deux emplois au lieu d'un seul. Il faut noter que ces déplacements sont rares d'autant plus que les déplacements courts pour l'heure du midi sont moins recensés dans l'enquête ménage de 1998. Ce choix de variable est justifié pour considérer le plus d'emplois possibles dont les postes à temps partiel, dénombrés dans le REEM;
- L'évolution spatio-temporelle de l'économie : entre 1998 et 2000 différentes fermetures, ouvertures et déménagements d'établissements ont eu lieu engendrant un biais (par exemple : la fermeture du magasin Eaton du centre-ville);
- Découpage arbitraire du territoire: la position et la taille des cellules de la matrice influencent la sensibilité de l'analyse. En effet, le décalage vertical ou horizontal de la matrice affecte les modèles linéaires. Une rotation de la matrice, visant une correspondance à la morphologie urbaine, assurerait un découpage et une relation plus représentatifs. Une procédure itérative permettant de déplacer la matrice en maximisant le coefficient de corrélation, reste une solution envisageable afin d'obtenir un modèle pour l'étude du taux d'absentéisme des travailleurs pour une journée moyenne de semaine.

En résumé, la confrontation de l'enquête ménage de 1998 au REEM de 2000 démontre une relation notable entre la distribution spatiale des emplois décrits à celle dérivée d'un échantillon de 5%.

5.4 Instrument de visualisation des générateurs de la ville intérieure

Différents outils génériques et interactifs, sous forme de tableur, permettent l'exploration des données de déplacements. Pour ce projet, un visualisateur sur les données de l'enquête Origine-Destination de 1998 a été créé dans la finalité d'analyser les générateurs de la ville intérieure de Montréal sous différentes perspectives. Essentiellement, ce système informationnel s'organise sous six fenêtres interactives arborant les thèmes suivants:

- **Générateur de la ville intérieure** (Figure 5.11): informations générales sur le générateur de déplacement sélectionné – géolocalisation du générateur, répartition des emplois selon le secteur d'activité respectif (données du REEM 2000), statistiques générales sur l'échantillonnage des données de l'enquête ménage (nombre de déclarations, nombre de déplacements pondérés, etc.);
- **Caractérisation des ménages** (Figure 5.12): caractérisation des ménages pour lesquels au moins une personne se destine au générateur étudié – composition, motorisation, langue, distribution spatiale des ménages et analyse spatiale (centre moyen et ellipse de dispersion);
- **Caractérisation de la clientèle** (Figure 5.13): analyse socio-démographique des personnes effectuant une activité au générateur – pyramide d'âge segmentée selon différentes variables au choix (dernier mode emprunté, statut de la personne, motif du déplacement), regroupements par classe d'âge;
- **Déplacements** (Figure 5.14, Figure 5.15 et Figure 5.16): analyse spatio-temporelle et modale des déplacements à destination du générateur – arbre de la répartition modale selon le dernier mode emprunté par les usagers pour se rendre au générateur, noeuds d'accès en transport collectif empruntés (achalandage et spatialisation), répartition du type de stationnement utilisé par les automobilistes (intérieur/extérieur, payant/gratuit), distribution temporelle des déplacements (profil d'occupation journalière), étude des temps d'activités, distribution des distances de parcours (origine vers générateur).

Cet outil, établi à même la base de données de l'enquête ménage, admet la caractérisation fine de la clientèle associée aux générateurs annexés à la ville intérieure. À partir de ce système informationnel, une analyse comparative des générateurs de déplacement est illustrée au chapitre suivant. Cette dernière met en relief la richesse des données recueillies pour l'étude de la mobilité dans la ville intérieure.

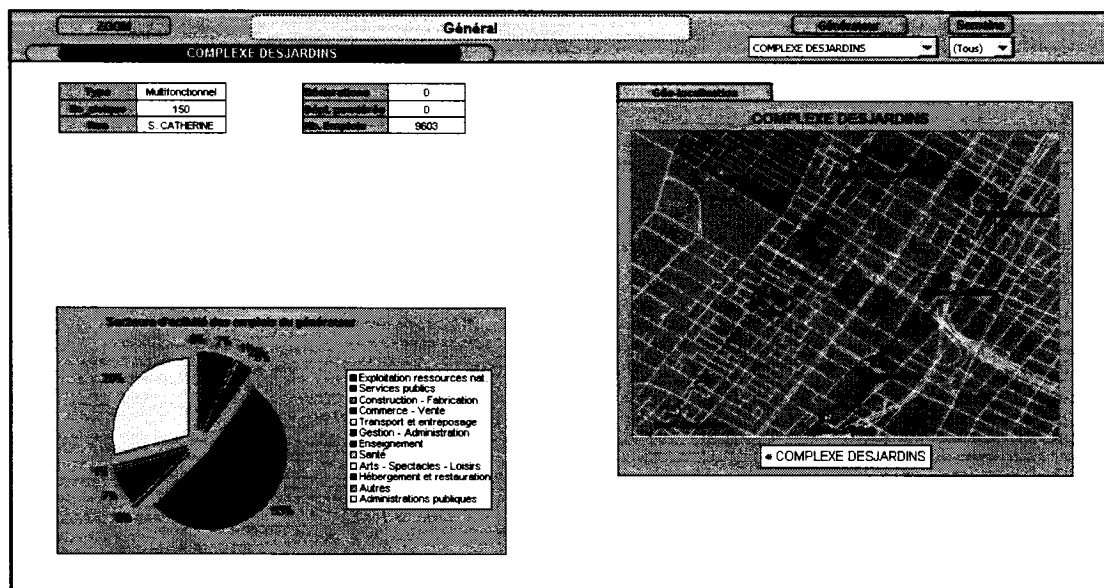


Figure 5.11: Informations générales sur le générateur

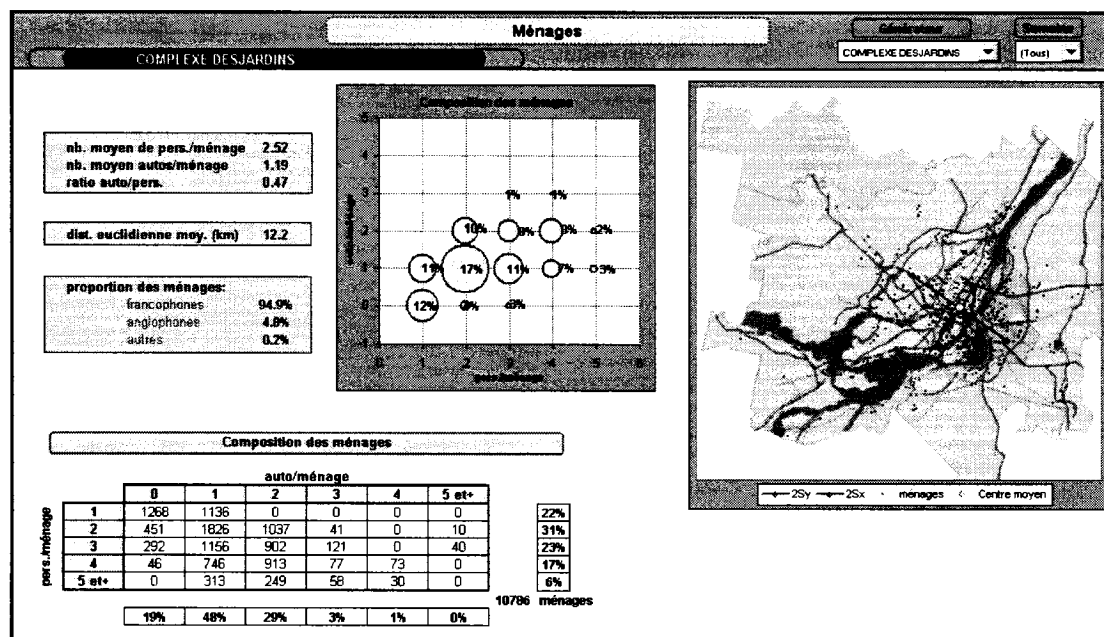


Figure 5.12: Fenêtre sur les ménages

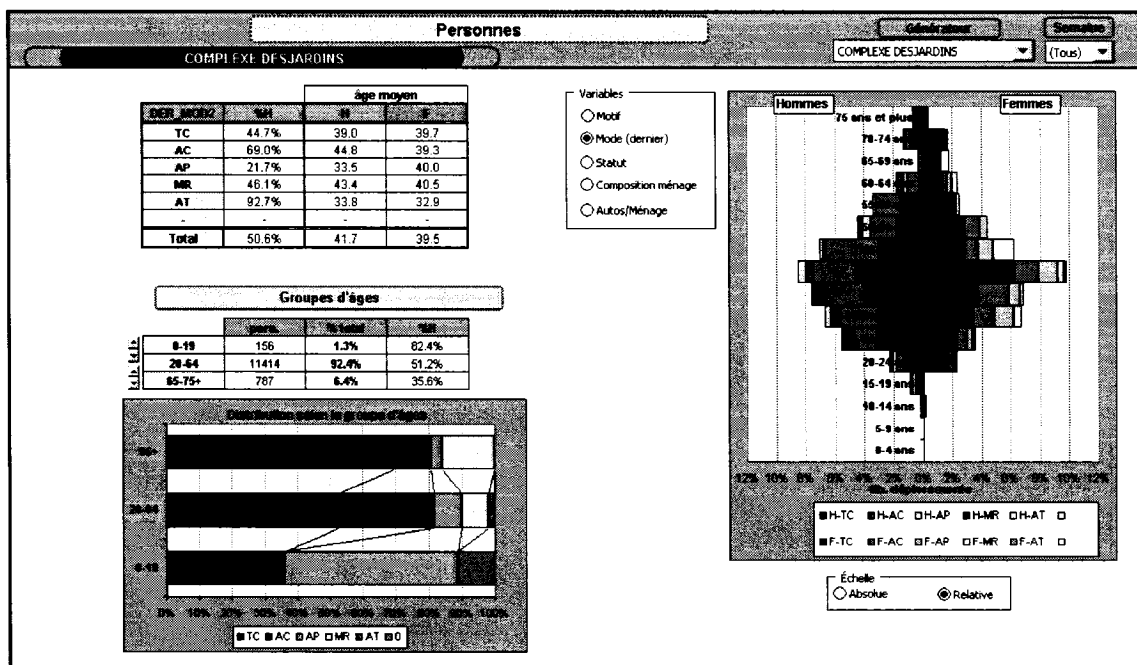


Figure 5.13: Socio-démographie des personnes à destination du générateur

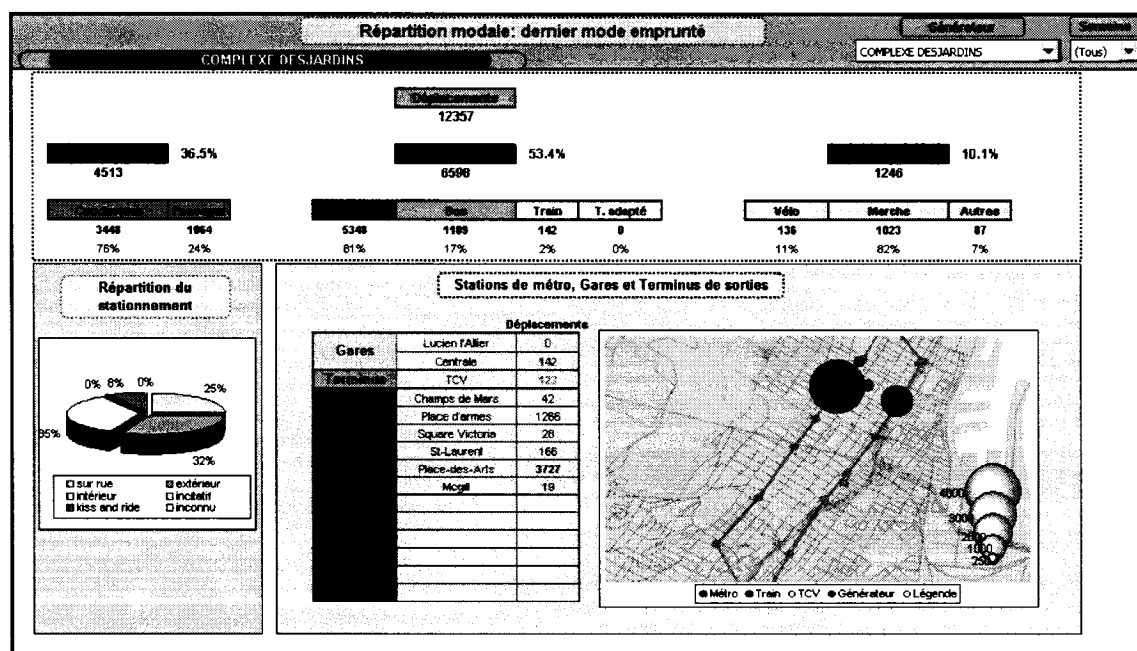


Figure 5.14: Répartition modale et noeuds d'entrée dans la ville intérieure

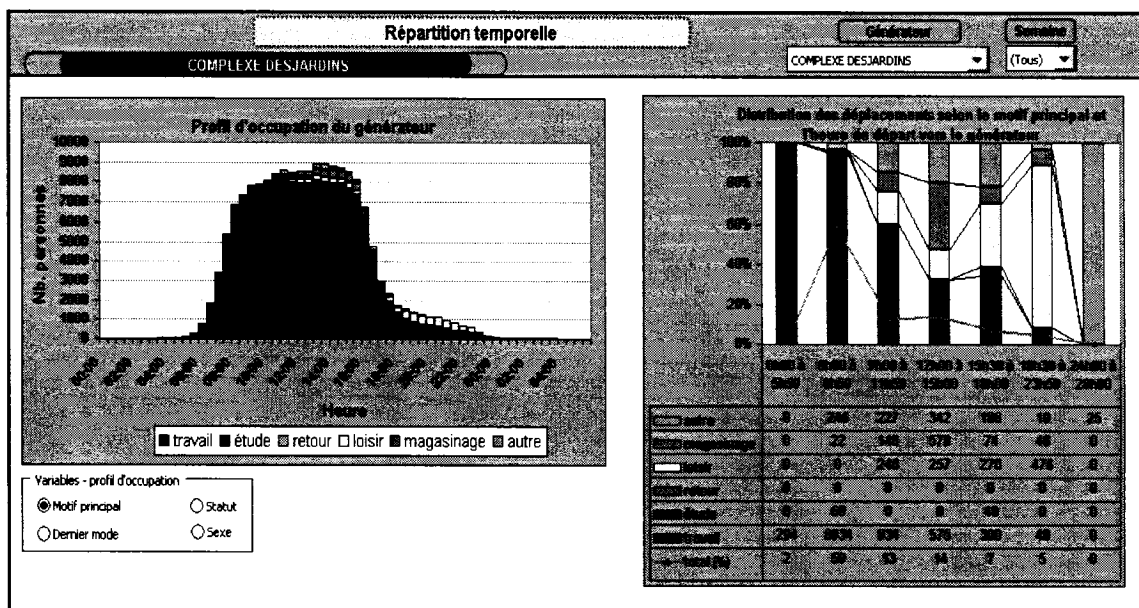


Figure 5.15: Temporalité des déplacements et profil d'occupation

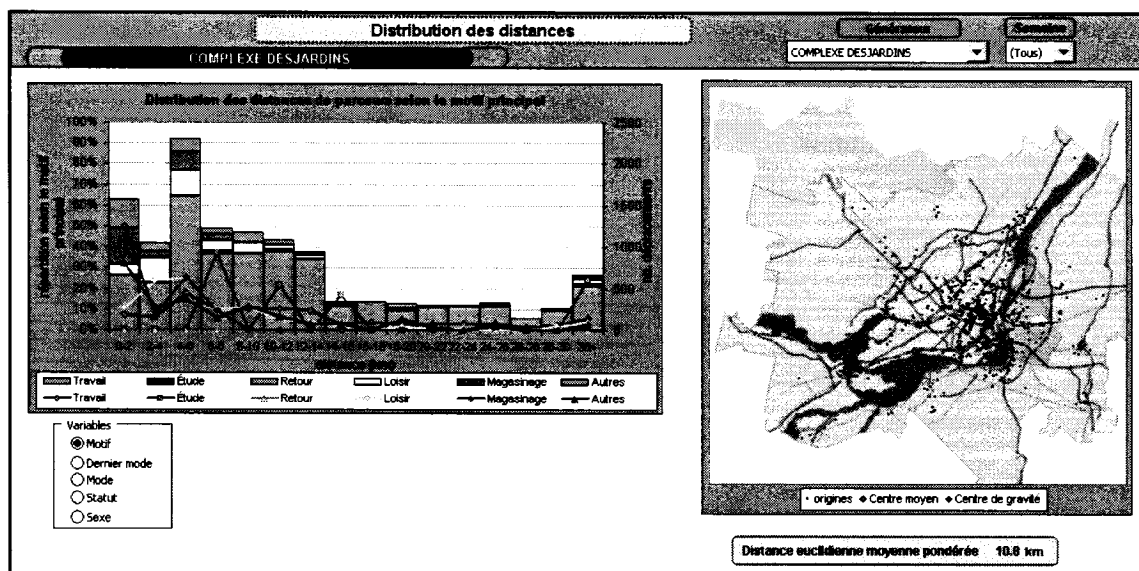


Figure 5.16: Distribution des distances de parcours (origine – générateur)

Chapitre 6 : Analyse totalement désagrégée de la mobilité au centre-ville

Le présent chapitre vise à présenter un ensemble d'analyses exploratoires selon le traitement totalement désagrégé des données de l'enquête Origine-Destination de 1998. La finalité première est de « visualiser » le potentiel de ces données fines pour une analyse de la mobilité dans la ville intérieure de Montréal. Cet outil informationnel, qui permet l'étude de la mobilité pour la Grande Région Métropolitaine de Montréal, n'a jamais été mis à contribution pour la ville intérieure. Les analyses subséquentes se basent sur un fragment de l'enquête où tous les déplacements à destination d'un quadrilatère du centre-ville sont extraits. Ce quadrilatère admet la considération de tous les usagers qui empruntent l'une des infrastructures de transport collectif de la ville intérieure. L'extrait résultant comporte 18 542 déclarations, soit 409 344 déplacements pondérés.

6.1 Analyse spatio-temporelle de la dynamique au centre-ville

Le quartier centre d'une ville, lieu d'attraction important, se caractérise par une effervescence de mouvements. Cette demande en déplacements vers le centre-ville s'explique par un système d'activités développé et dense, mais aussi par le niveau d'accessibilité qu'offre le système de transport adjacent. Cette relation d'équilibre, entre l'occupation du sol et le système de transport, reste l'une des relations fondamentales dans l'étude et la planification des transports urbains (Meyer et Miller, 1984). Ce processus d'équilibre subit une constante évolution, due notamment à la modification du système d'activités (étalement urbain, économie, etc.) et à l'adaptation du système de transport à la demande. Pour étudier l'état de ce processus d'équilibre à un instant donné (journée moyenne de 1998), l'analyse de la distribution spatiale des extrémités de déplacements déclarés peut s'avérer judicieuse : celle-ci peut permettre de mieux comprendre la relation intrinsèque entre ces deux systèmes (Figure 6.1). Le fait de connaître la localisation de la destination (lieu d'activité), l'heure de départ des

déplacements (durée d'activité) ainsi que le motif (type d'activité) permet d'observer la dérivation spatio-temporelle de l'occupation du sol. Par ailleurs, d'autres attributs sur les personnes (âges, genre) et les déplacements (mode) à destination de ces lieux d'activité peuvent enrichir la caractérisation de l'occupation du sol.

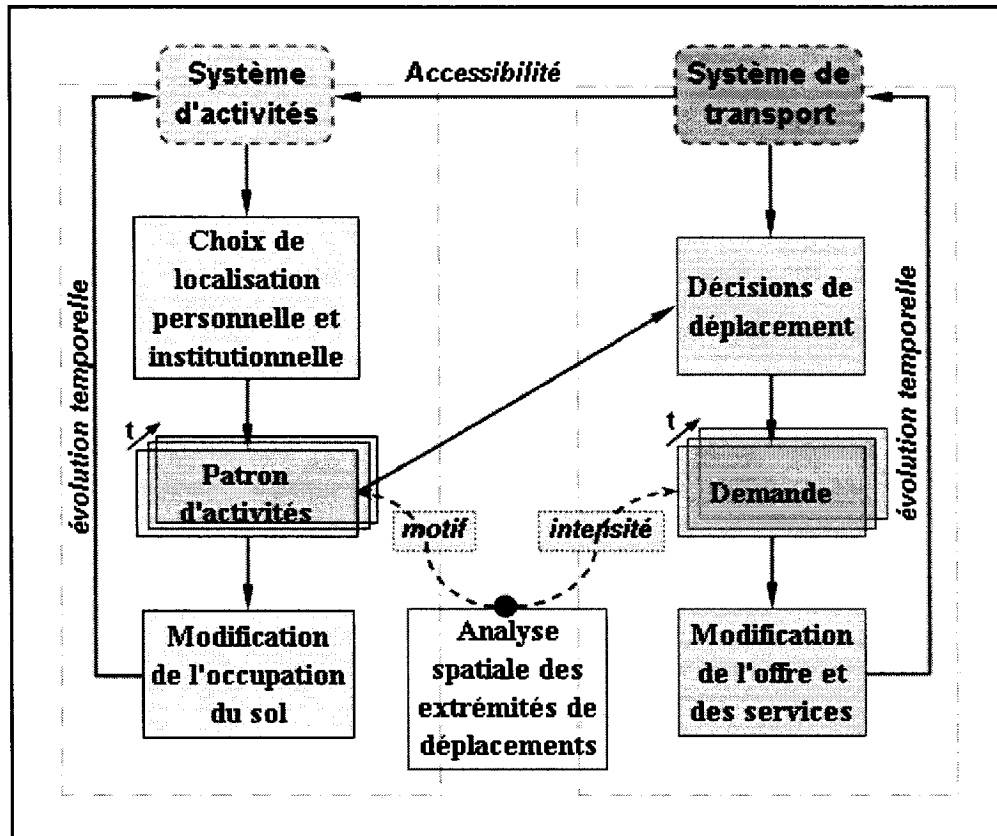


Figure 6.1: Extrémités de déplacements : analyse de l'équilibre entre le système d'activités et le système de transport (inspirée de Meyer et Miller, 1984)

La représentation spatiale de ces extrémités de déplacements dévoile un nuage de points géoréférencés (générateur, intersection de rue, adresse civique, code postal) tel qu'illustré à la Figure 6.2. Ce nuage dévoile, a priori, peu d'information sur le mouvement urbain, mais son traitement avec des outils d'analyse spatiale et des systèmes d'information géographiques permet l'extraction de comportements et de tendances.

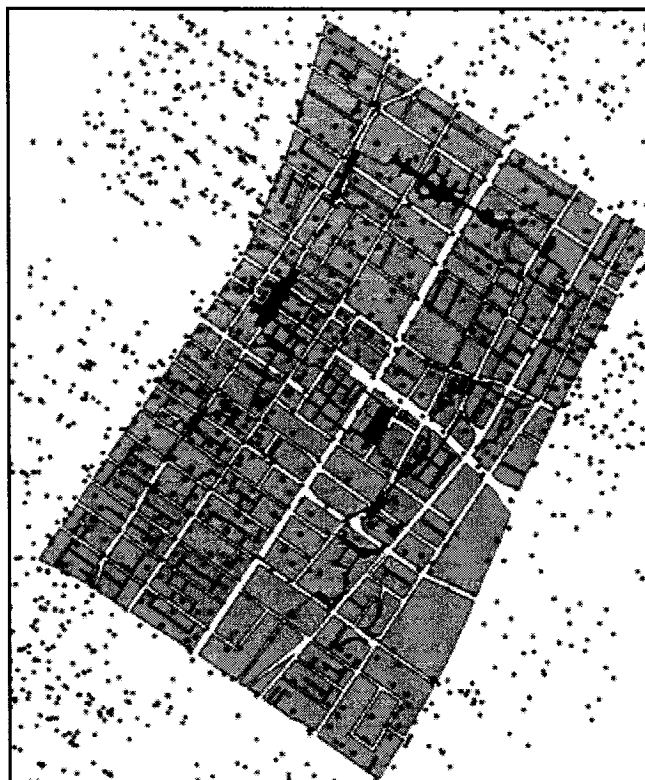


Figure 6.2: Spatialisation des extrémités de déplacements

« D'abord perçus comme des fatras (amas confus, hétéroclite, de choses sans valeur, sans intérêt) de données, pêle-mêle, ces nuages de points deviennent des révélateurs de comportements et tendances lorsque disciplinés selon des méthodes statistiques et géostatistiques appropriées. L'identification et l'application de ces méthodes ainsi que le choix et la structuration des données requises résument quelques uns des défis méthodologiques d'une approche informationnelle. » (Morency et Chapleau, 2004)

En ce sens, Morency et Chapleau (2004) et Morency (2004) exposent différentes avenues d'exploration spatiale de cette prolifération de points qui émergent des grands ensembles de données géoréférencées de la Grande Région Métropolitaine.

L'agrégation d'évènements ponctuels, comme des extrémités de déplacements, offre l'opportunité de dévoiler de nouvelles perspectives aux données. Une façon simple

d'explorer cette distribution spatiale reste le dénombrement d'évènements pour des aires égales qui découpent le territoire à l'étude. Cette méthode permet rapidement d'analyser la variation de la densité sur le territoire à l'étude. Dans le même ordre d'idée, cette approche peut s'étendre à la méthode des noyaux qui permet l'interpolation des évènements, dans un rayon prédéterminé, et qui les pondère selon leur éloignement. La méthode des noyaux a été utilisée dans différents travaux, notamment en épidémiologie (Gatrell et al. 1996), criminologie (Levine, 2000) et analyse de la demande en transport (Kwan, 2003; Banos, 2001).

6.1.1 Méthode des noyaux

Formellement, la méthode d'estimation des noyaux peut s'exprimer comme suit selon Gatrell et al. (1996). Pour tout point de référence s , sur une région d'étude R comprenant n évènements ponctuels s_i spatialisés, l'intensité $\lambda(s)$ au point de référence s peut être estimée selon :

$$\lambda(s) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau^2} k\left(\frac{s - s_i}{\tau}\right)$$

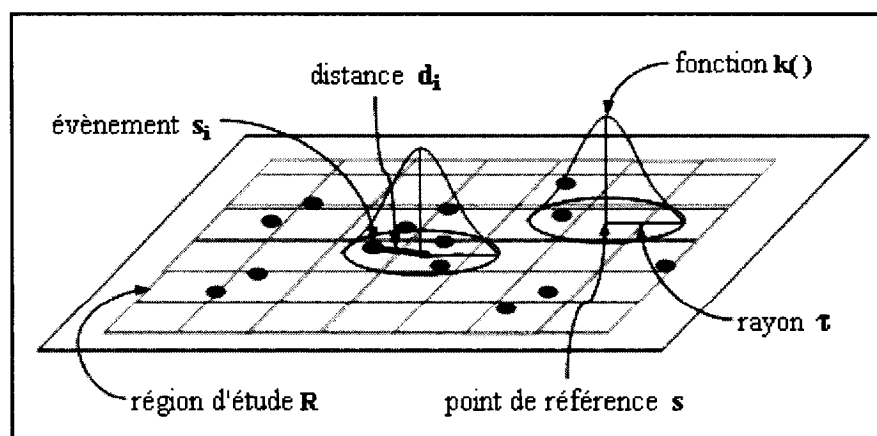


Figure 6.3: Conceptualisation de la méthode des noyaux (adaptée de Bailey et Gatrell, 1995)

Ainsi, une fonction tridimensionnelle mobile $k()$ pondère les événements situés à l'intérieur d'un rayon τ selon leur distance d_i à partir du point de référence (centre de la fonction). La fonction tridimensionnelle se veut une fonction symétrique et décroissante radialement, qui distribue l'intensité totale de l'évènement sur l'ensemble de la région d'influence. Elle peut prendre plusieurs formes dont une configuration quadratique telle qu'employée pour les analyses subséquentes. Cette forme quadratique a l'avantage d'assurer une valeur nulle à la limite du rayon d'influence, comparativement à une fonction normative. Bref, l'équation de l'intensité s'exprime :

$$\lambda(s) = \sum_{d_i \leq \tau} \frac{3}{\pi \tau^2} \left(1 - \frac{d_i^2}{\tau^2} \right)^2$$

Le choix du rayon influence directement l'étalement de l'intensité. En effet, un rayon faible engendre une variation plus significative de l'intensité, comparativement à un rayon plus grand qui étale les intensités ponctuelles. Le choix du rayon demeure arbitraire puisque aucune règle précise n'existe.

Les expérimentations de cette méthode ont toutes été réalisées par l'intermédiaire du logiciel *CrimeStat* (Levine, 2000) qui offre une multitude d'analyses statistiques et spatiales sur des semis de points, dont la méthode des noyaux « kernel density ». Les données résultantes se présentent sous forme matricielle et sont visualisables dans des systèmes d'information géographiques.

6.1.2 Animation du centre-ville

L'application de cette méthode d'agrégation aux semis de points des extrémités de déplacements produit une surface d'intensité tridimensionnelle. La Figure 6.4 illustre deux surfaces obtenues par l'entremise d'une fenêtre mobile de 200 mètres de rayon qui se déplace sur la région d'étude découpée en cellules de 100x100 mètres. Ces deux

surfaces représentent l'intensité cumulative pour une journée moyenne de semaine et pour deux motifs distincts. Il est à noter que l'échelle en élévation est comparable tandis que le dégradé de couleur vient seulement faciliter la perception de la troisième dimension.

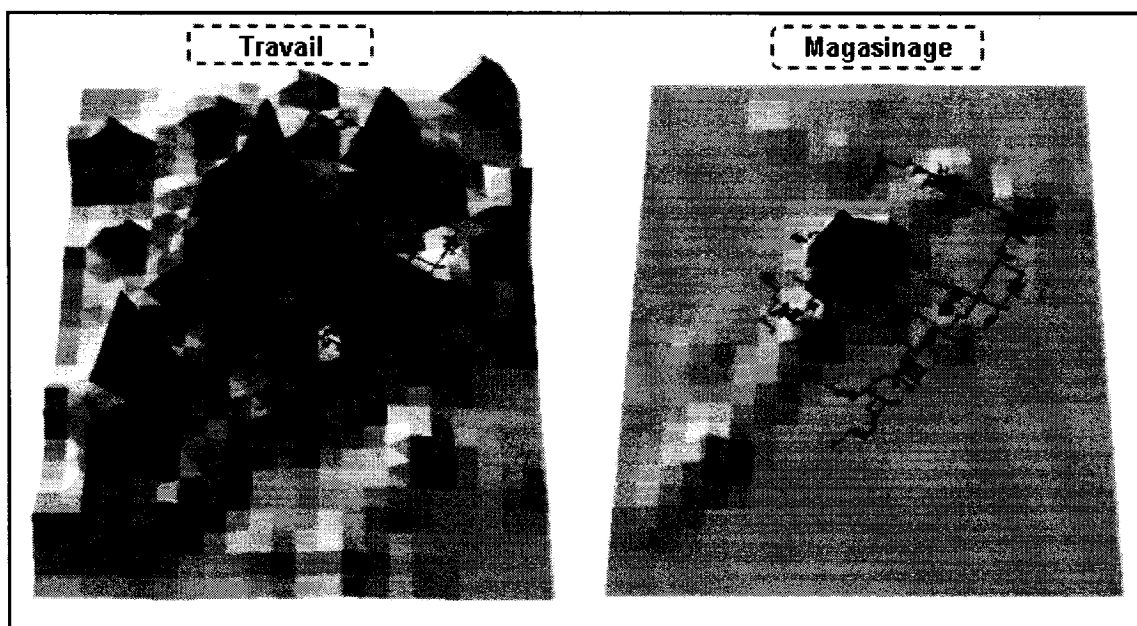


Figure 6.4: Surfaces d'intensité des extrémités de déplacements pour une journée moyenne de semaine

La segmentation des extrémités de déplacement par motif principal permet la différenciation des activités. Connaissant l'heure de départ du déplacement à destination du centre-ville et l'heure de départ du déplacement suivant, une durée d'activité peut être dérivée. Ainsi, il est possible d'évaluer l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol par le cumul des personnes présentes au centre-ville pour un motif précis et dans un intervalle temporel donné. La Figure 6.7 illustre sous forme de matrices 2D (pour établir une meilleure comparaison entre les différents motifs de déplacement) l'intensité du nombre de personnes pondérées, estimée par la méthode des noyaux pour différentes périodes de la journée. Il est à noter que l'échelle de l'intensité est la même pour toutes les matrices pour fin de comparaison. De ce fait, à cause de la forte proportion relative de déplacements pour le motif travail, l'échelle permet

seulement l'extraction « visuelle » des lieux d'activités importants pour chaque motif. En ce sens, la multitude de commerces sur rue au centre-ville n'est pas représentée à cause de cette échelle comparative, mais permet de voir la forte intensité de déplacements pour le motif magasinage vers le Centre Eaton et ses environs.

Le phénomène spatio-temporel illustré est d'autant plus intéressant lorsque la séquence des matrices est animée, mais le médium papier ne permet pas ce type de représentation. La visualisation animée illustre bien l'intensité de mouvements au centre-ville, le caractère temporel de la demande ainsi que l'emplacement stratégique de la ville intérieure face à cette animation urbaine.

Pour compléter cette animation spatio-temporelle de l'occupation du sol à proximité de la ville intérieure, le profil d'occupation du territoire à l'étude et la répartition temporelle des déplacements sont représentés respectivement aux Figures 6.5 et 6.6. Ces représentations graphiques illustrent les ordres de grandeur d'occupation au centre-ville selon le motif principal.

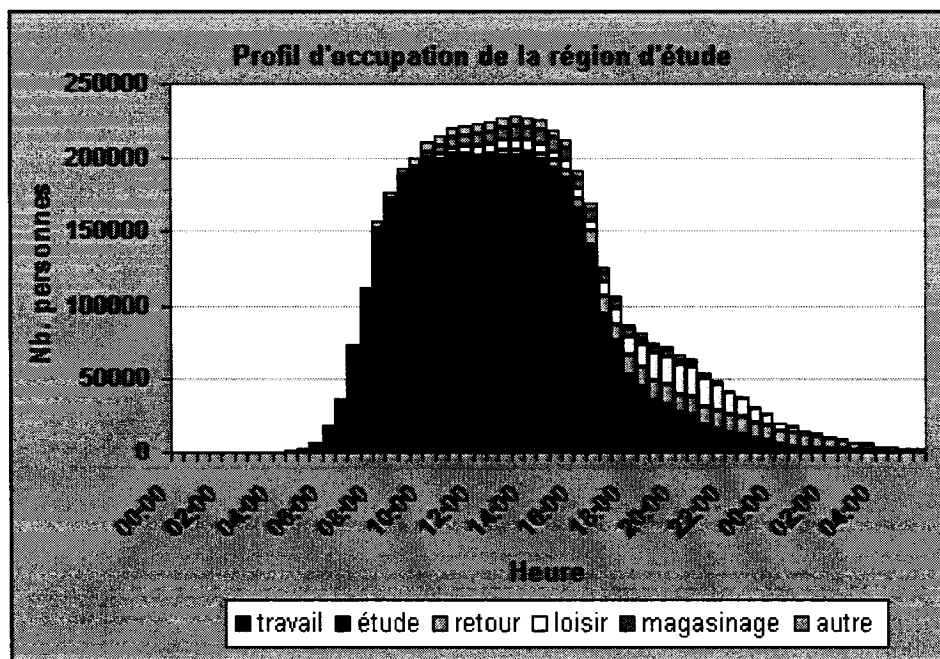


Figure 6.5: Profil d'occupation du centre-ville

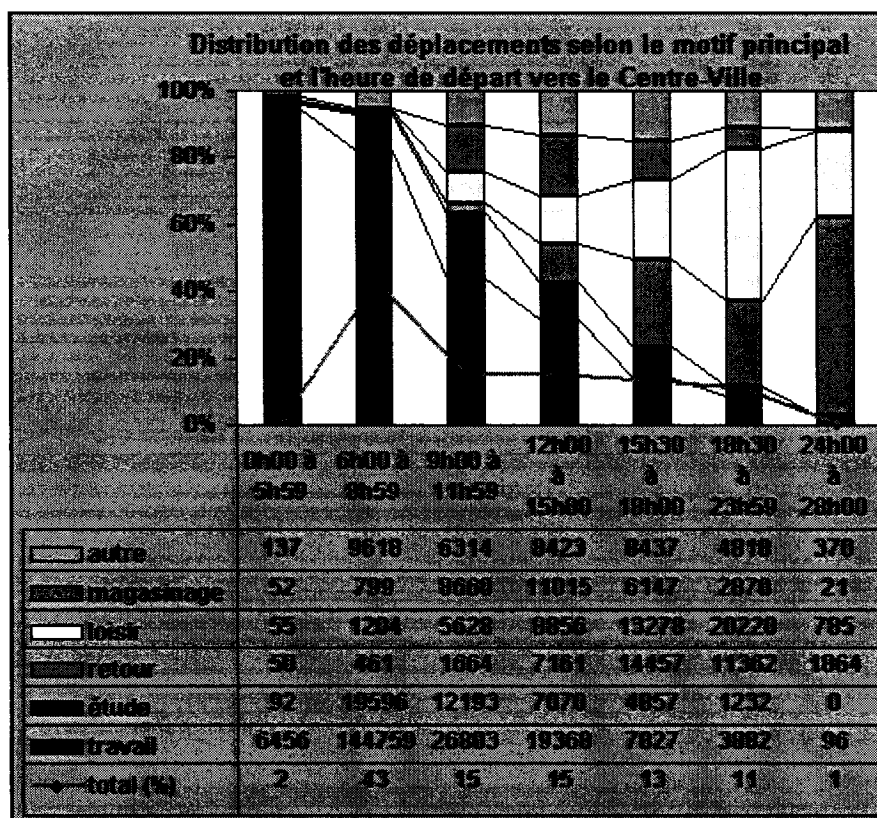


Figure 6.6: Répartition temporelle des déplacements vers le centre-ville selon le motif déclaré.

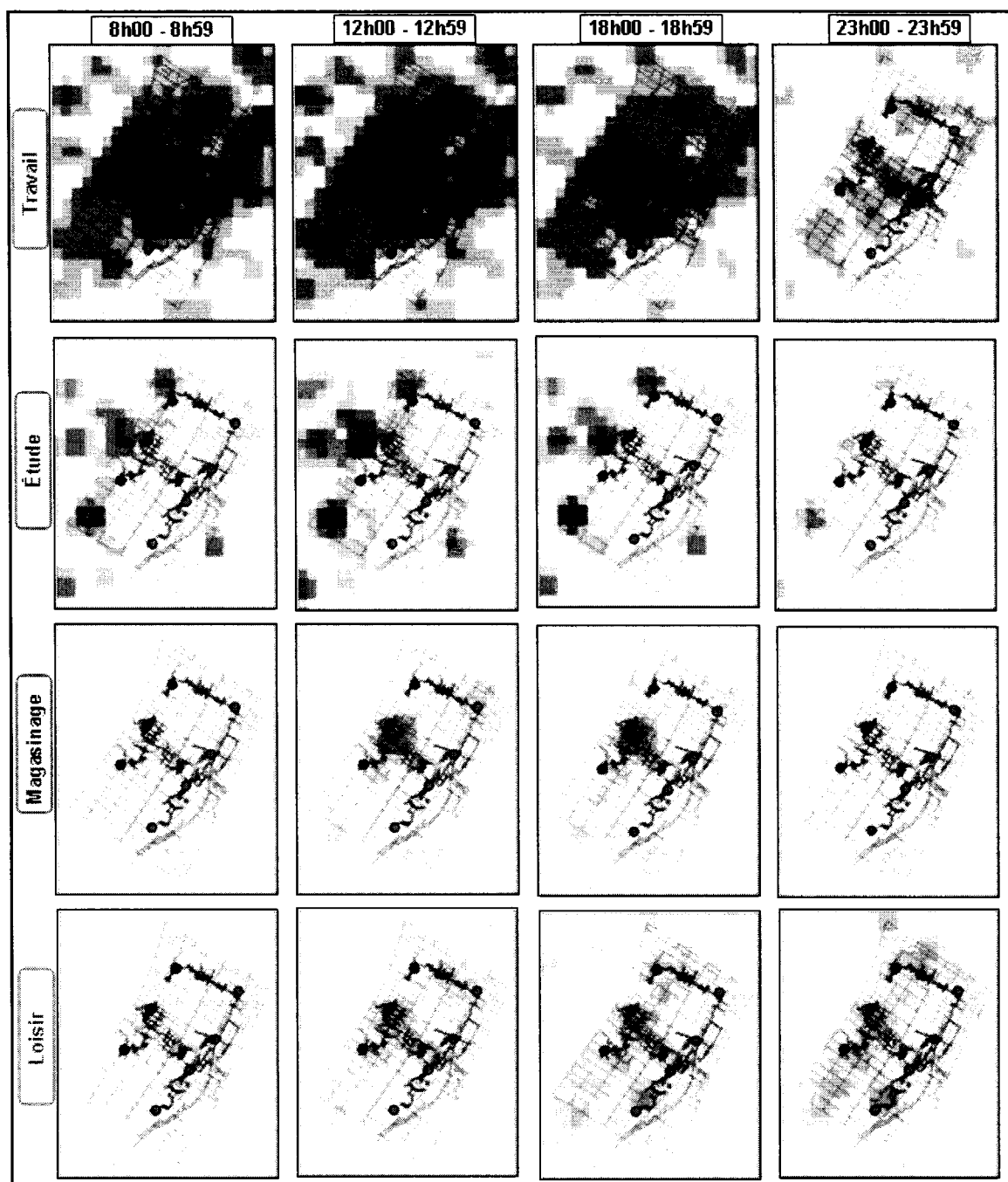


Figure 6.7: Dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol au centre-ville

6.2 Accès à la ville intérieure

La ville intérieure montréalaise est devenue, au cours de son développement, une interface de mobilité de choix facilitant l'accès aux stations de métro et de ce fait même, aux générateurs de déplacements du centre-ville. Les noeuds de transport collectif, au centre-ville, sont de considérables sources de déplacements par la marche pour la terminaison d'un déplacement jusqu'à la destination. Par les sept stations de métro partagées sur deux lignes distinctes, les deux gares de train et le TCV (Terminus du Centre-Ville), la ville intérieure est alimentée et accessible à même le sous-sol urbain. Tout usager qui emprunte l'une de ces infrastructures se retrouve piégé dans la toile filamentaire du centre-ville. À ceux-ci s'offre la possibilité de poursuivre leur cheminement vers leur destination ultime par un autre moyen de transport (métro, autobus de la STM, taxi, vélo, autres) ou tout simplement par la marche. À ces noeuds de transport collectif d'entrée au centre-ville, s'ajoutent les stationnements intérieurs pour véhicules privés.

Dans l'optique d'analyser ces flots de déplacements piétonniers, la Figure 6.9 présente les lignes de désir des usagers en transit aux noeuds de transport collectif de la ville intérieure. Ces lignes représentent les segments terminaux à vol d'oiseau à partir du noeud d'accès jusqu'à la destination ultime. Pour chaque ligne de désir est cumulé le nombre de déplacements pondérés. De plus, la spatialisation des origines de provenance des usagers permet la reconnaissance des « bassins drainant » selon les caractéristiques propres et les juridictions de chaque mode de transport. Ce type de représentation illustre bien l'accessibilité offerte par les différents noeuds de transport en commun ainsi que l'intensité en déplacements piétonniers générés à ces noeuds d'entrée au centre-ville. Par ailleurs, on observe un étalement plus prononcé des distances restantes à parcourir pour ceux qui accèdent au centre-ville par les gares et le TCV. Les distances de marche au centre-ville dépendent directement du mode et lieu d'accès, ainsi que de la distance que les usagers acceptent de parcourir pour atteindre leur destination (Seneviratne, 1985). Dans cet ordre d'idées, la Figure 6.8 vient, en complémentarité, présenter la distribution

des distances euclidiennes à parcourir pour chaque usager en transit selon le dernier mode collectif emprunté.

Bien que l'enquête ne dévoile pas si les usagers ont uniquement emprunté le réseau de la ville intérieure ou en combinaison avec le réseau de surface, la représentation des lignes de désir illustre bien l'intensité en déplacements piétonniers entre les infrastructures de transport intérieures et les générateurs connectés au réseau piétonnier protégé. Ainsi on constate que le Complexe Desjardins est en grande partie desservi par la station Place-des-Arts avec 69,4% des usagers qui y accèdent en métro; comparativement, 23,5% des usagers proviennent de la station Place-d'Armes.

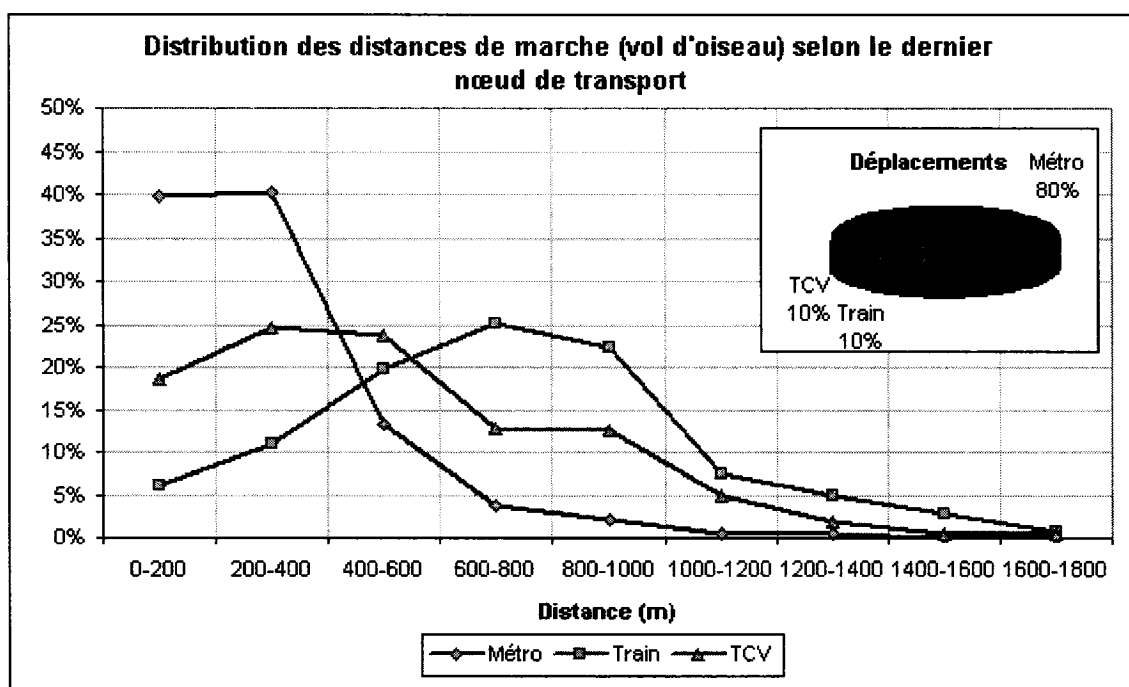


Figure 6.8: Répartition des distances de marche selon le dernier mode TC emprunté

Ce type d'analyse ouvre une perspective intéressante sur le choix effectué par les usagers pour leur progression une fois dans un nœud transitoire. Sommairement, une analyse plus détaillée fait ressortir des comportements particuliers, selon le nœud d'entrée au centre-ville et le choix pour la poursuite de leur déplacement vers leur

destination ultime (Tableau 6.1). En effet, les usagers en transit à une gare ou au TCV, poursuivent leur cheminement à pied, dans une forte proportion, pour une distance moyenne d'environ 500 mètres (à vol d'oiseau). En revanche, ceux qui se retrouvent à environ un kilomètre de leur destination vont préférer emprunter le métro pour se rapprocher de leur lieu d'activité. En ce qui concerne les usagers qui accèdent directement au centre-ville par le métro, ils bénéficient d'un service plus étendu, qui se reflète par une distance euclidienne moyenne de marche d'environ 300 mètres. Cette distance correspond sensiblement à la moitié de la distance moyenne qui sépare les deux lignes de métro. Bref, une compétition du marché existe entre ces deux lignes.

Tableau 6.1: Décomposition des usagers selon le noeud de transport collectif d'entrée et le choix du mode pour accéder à la destination.

Gare	À pied		Métro		Autres		Total	%
Centrale	9178	(89.8%)	623	(6.1%)	422	(4.1%)	10223	77.1%
Lucien-l'Allier	2688	(88.7%)	245	(8.1%)	97	(3.2%)	3030	22.9%
Total	11866	(89.5%)	868	(6.5%)	519	(3.9%)	13253	
dist. moy. de marche (m)	492		1054		1064		550	
TCV	À pied		Métro		Autres		Total	%
RTL	7994	(81.6%)	1582	(16.2%)	214	(2.2%)	9790	73.2%
CIT	3192	(88.9%)	352	(9.8%)	45	(1.3%)	3589	26.8%
Total	11186	(83.6%)	1935	(14.5%)	259	(1.9%)	13379	
dist. moy. de marche (m)	508		1024		1057		594	
Station de Métro*	À pied		Métro		Autres		Total	%
Place-d'Armes	10275	(99.0%)	-		102	(1.0%)	10377	10.9%
Square Victoria	11311	(99.8%)	-		23	(0.2%)	11334	11.9%
Bonaventure	9588	(100.0%)	-		0	(0.0%)	9588	10.0%
Lucien l'Allier	1537	(100.0%)	-		0	(0.0%)	1537	1.6%
Place-des-Arts	12055	(94.4%)	-		710	(5.6%)	12764	13.4%
McGill	34623	(99.8%)	-		58	(0.2%)	34681	36.3%
Peel	15049	(98.5%)	-		236	(1.5%)	15285	16.0%
Total	94437	(98.8%)	-		1129	(1.2%)	95566	
dist. moy. de marche (m)	279		-		675		284	

*Comporte les déplacements en métro des usagers en provenance du TCV et des Gares

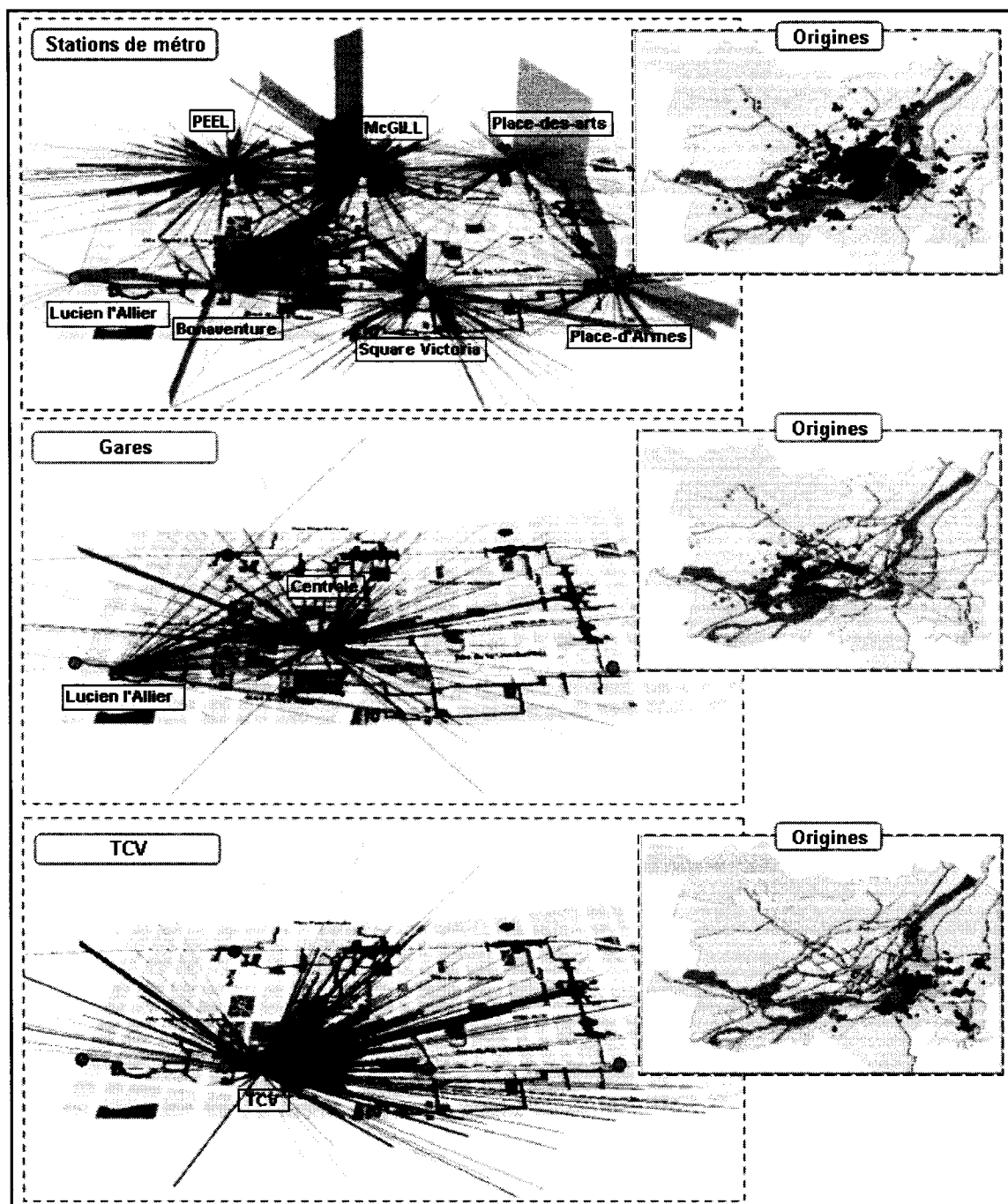


Figure 6.9: Spatialisation des lignes de désir et origines des usagers à pied aux noeuds de transport de la ville intérieure

6.3 Étude comparative des générateurs de déplacements

Connaissant maintenant les points d'entrée des piétons, portons un intérêt particulier à l'étude de la clientèle des générateurs de déplacements annexés à la ville intérieure. Comme présenté au chapitre 5, l'analyse des générateurs de déplacements a suscité beaucoup d'intérêt pour différents travaux.

À titre d'analyse comparative, quatre grands générateurs de la ville intérieure ont été sélectionnés : le Complexe Desjardins (complexe multifonctionnel), la Place Ville-Marie (complexe multifonctionnel), le Centre Eaton (galerie marchande) ainsi que le Centre Bell (amphithéâtre sportif et de spectacles). Ce choix considère deux générateurs de même catégorie (Place Ville-Marie et Complexe Desjardins) afin d'illustrer la spécificité de chacun, malgré leurs propriétés similaires. Par ailleurs, l'étude de générateurs aux fonctionnalités diversifiées permet de faire ressortir les caractéristiques propres aux différentes classes de générateurs.

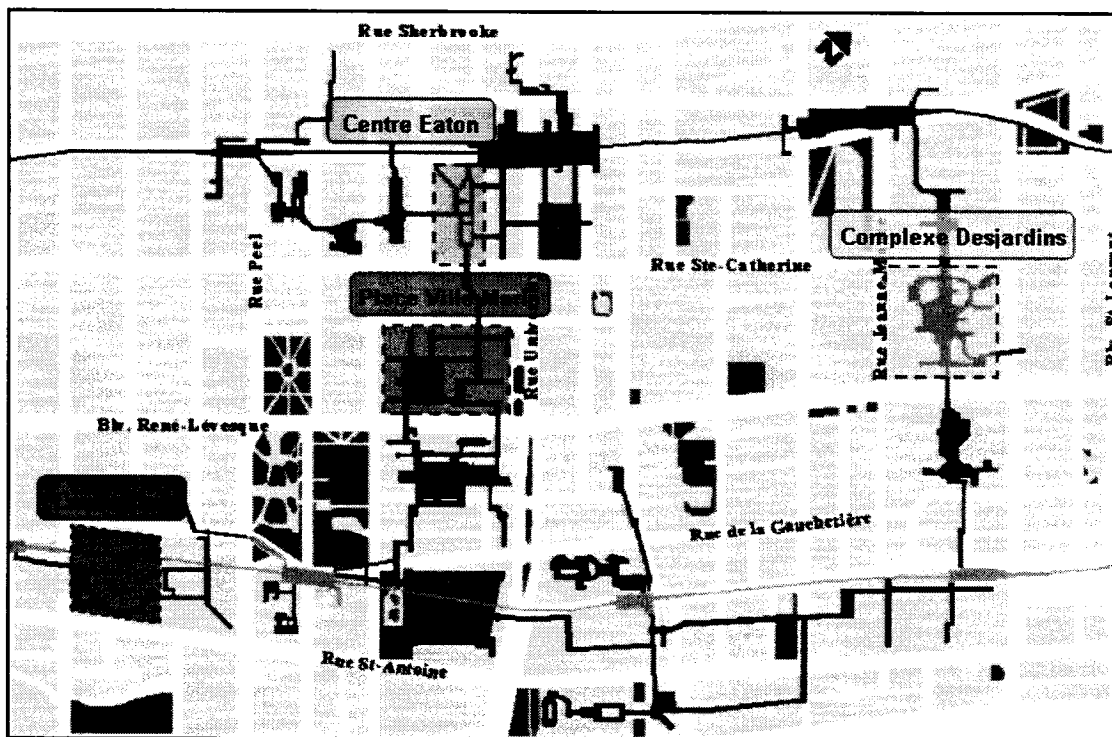


Figure 6.10: Localisation des générateurs de déplacements comparés

6.3.1 Socio démographie de la clientèle

Chaque générateur attire une clientèle qui lui est propre. Lorsqu'on analyse la répartition sociodémographique des usagers qui se destinent aux générateurs, une structure propre, comparable à une empreinte digitale du lieu d'activité, est formée (Figure 6.11). La représentation des pyramides d'âges, pour la clientèle associée aux générateurs, expose différents phénomènes notables :

- Une similarité structurelle entre la démographie des clientèles de la Place Ville-Marie et du Complexe Desjardins explicable par la ressemblance des activités et occupations des usagers.
- Une répartition étalée des cohortes d'âges pour la clientèle du Centre Eaton. Cette clientèle y accède majoritairement (57%) par le transport collectif. Par ailleurs, la marche est le second mode d'accès (18%). Cela indique la proximité du générateur avec les résidents du centre-ville et qu'il s'agit d'un lieu de deuxième activité pour les personnes présentes dans les environs.
- Le Centre-Bell se distingue par sa clientèle masculine où l'automobile demeure le moyen d'accès privilégié.
- Dans une perspective globale, les femmes qui accèdent aux générateurs par automobile sont, en plus forte proportion, passagères.

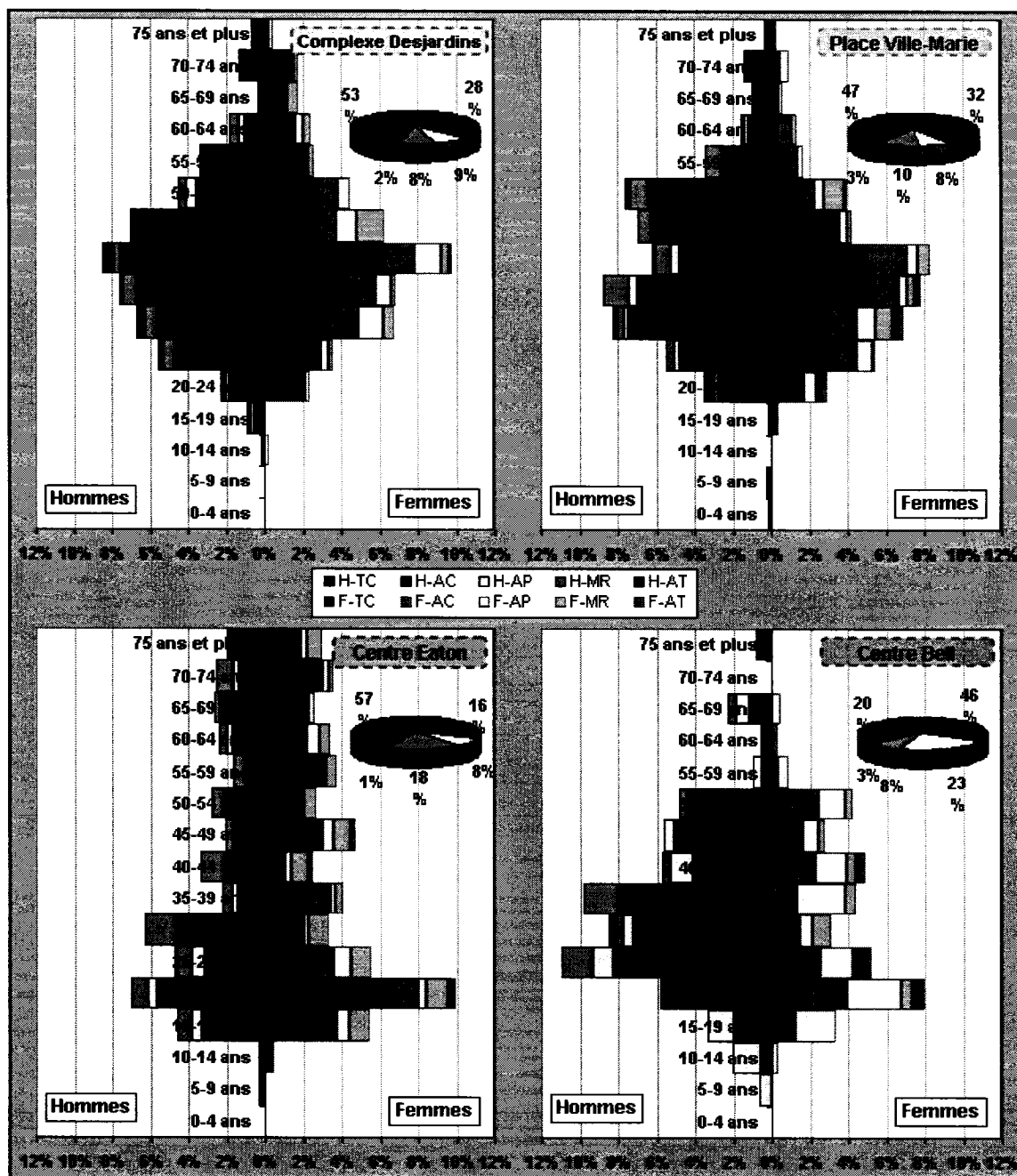


Figure 6.11: Pyramides d'âges des générateurs selon le dernier mode de transport emprunté (TC- Transport en commun, AC- Auto conducteur, AP- Auto passager, MR- Marche, AT- Autres)

6.3.2 Spatialisation de la clientèle

Chaque générateur s'imprègne dans le tissu urbain et influence les habitudes de sa clientèle. La Figure 6.12 examine cette zone d'influence par la spatialisation des ménages, pour lesquels au moins un usager se destine au générateur lors d'un jour moyen de semaine. La composition, la possession automobile ainsi que l'éloignement moyen sont les statistiques retenues pour caractériser les ménages. La perspective spatiale illustre pour sa part l'étalement étendu ou rapproché selon les types d'activités que le générateur engendre. Cette dispersion est représentée par les axes principaux des ellipses de dispersion, ainsi que le centre moyen pondéré, calculés selon la localisation (x-y) des ménages. Ces mesures descriptives sont brièvement exposées ci-dessous.

Le centre moyen est un point spatial établi à partir de la moyenne cartésienne en x et y pour l'échantillon de N points. Le centre moyen CM pondéré pour un semis de points prend la forme générale suivante:

$$CM_{(x,y)} = \left(\frac{\sum_{i=1}^N W_i X_i}{\sum_{i=1}^N W_i}, \frac{\sum_{i=1}^N W_i Y_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \right)$$

où W_i est le poids de chaque évènement ponctuel i , X_i est la coordonnée x et Y_i est la coordonnée y.

En ce qui a trait à l'étude de l'étendue spatiale d'un semis de points, l'étude de l'écart type reste une analyse descriptive couramment utilisée. Cette mesure de dispersion peut s'amener à un autre niveau par l'ellipse de déviation. Les axes de cette dernière représentent l'écart type en x et y où une rotation θ des axes minimise la somme au carrée des distances entre les points et les axes. De cette façon, en plus de visualiser les écarts types, le vecteur directionnel de la dispersion est représenté.

L'angle de rotation des axes par rapport au centre moyen se mesure par :

$$\theta = \frac{\text{ARCTAN} \left\{ \left(\sum (X_i - \bar{X})^2 - \sum (Y_i - \bar{Y})^2 \right) + \left[\left(\sum (X_i - \bar{X})^2 - \sum (Y_i - \bar{Y})^2 \right)^2 + 4 \left(\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \right)^2 \right]^{1/2} \right\}}{2 \sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}$$

De cette rotation, les écarts types selon les nouveaux axes x et y prennent la forme :

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

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

La longueur des axes x et y de l'ellipse de déviation est respectivement le double de S_x et S_y .

Bref, de cette analyse spatiale et socio-économique des ménages (Figure 6.12) certaines caractéristiques ressortent. Entre autres :

- Les activités des centres multifonctionnels attirent sensiblement des ménages aux propriétés moyennes semblables. Cependant, la clientèle du Complexe Desjardins réside en plus grande proportion dans l'est. Or, malgré les fonctionnalités similaires des deux générateurs et la faible distance qui les sépare, la clientèle est distribuée de façon asymétrique sur le territoire.
- Le Centre Eaton accueille principalement des usagers dans un rayon moyen de 7,8 km, donc des quartiers à proximité. Ce phénomène peut s'expliquer par la présence plus usuelle du type d'activités offert par ce générateur sur l'ensemble du territoire.

- À l'opposé, le Centre Bell, par ses activités uniques (spectacles, compétitions d'hockey) dans la Grande Région Métropolitaine, attire une clientèle beaucoup plus motorisée (1,7 autos par ménage) et dispersée sur le territoire avec un éloignement moyen de 15,5 km.

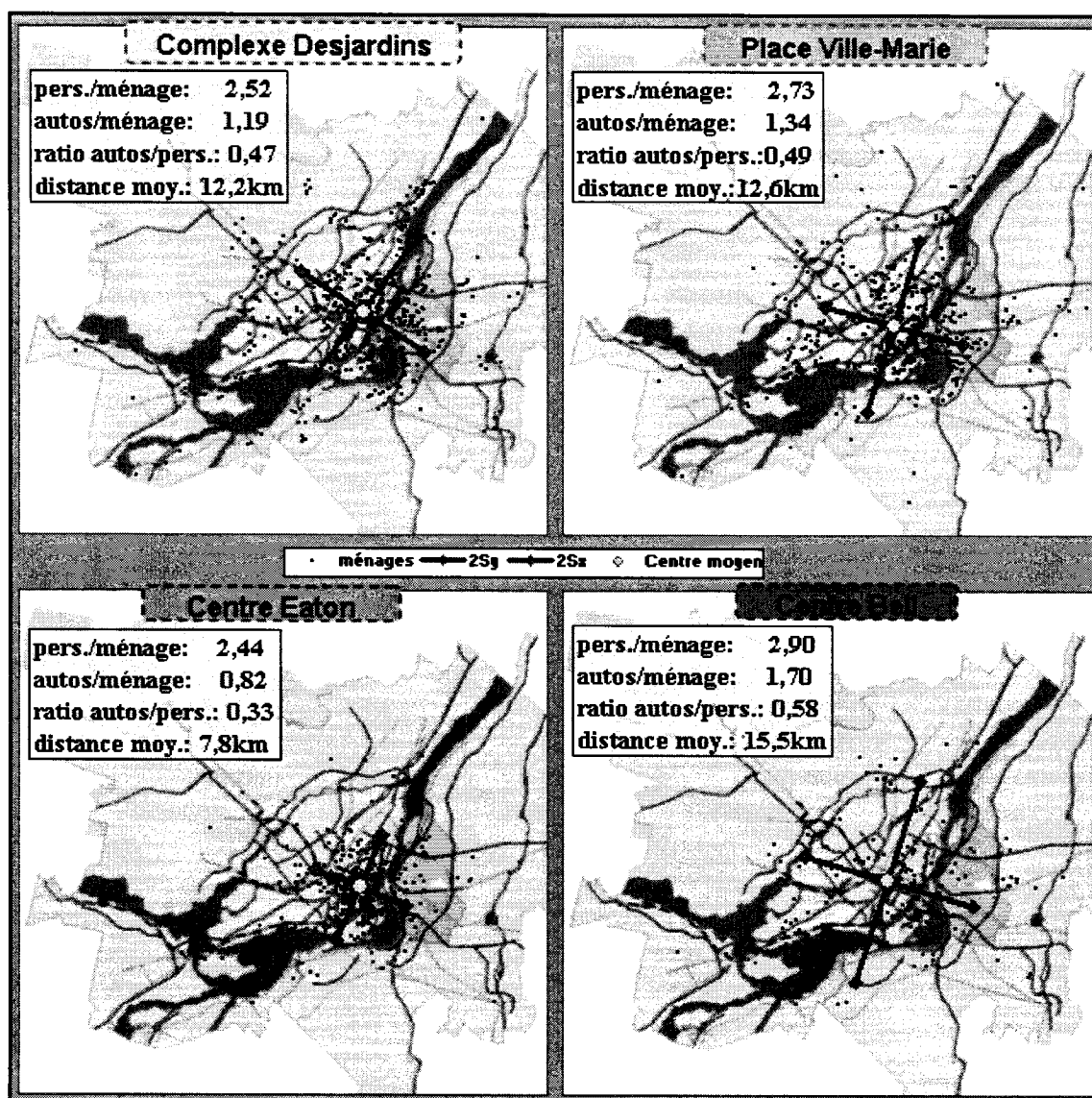


Figure 6.12: Répartition spatiale et caractérisation des ménages

6.3.3 Distribution temporelle

Dans le même ordre d'idée que l'étude de la dynamique spatio-temporelle du centre-ville, l'analyse et le traitement des chaînes de déplacements des personnes autorisent la dérivation de l'occupation des générateurs (Figure 6.13). De cette façon, le patron temporel des activités en semaine du générateur surgit.

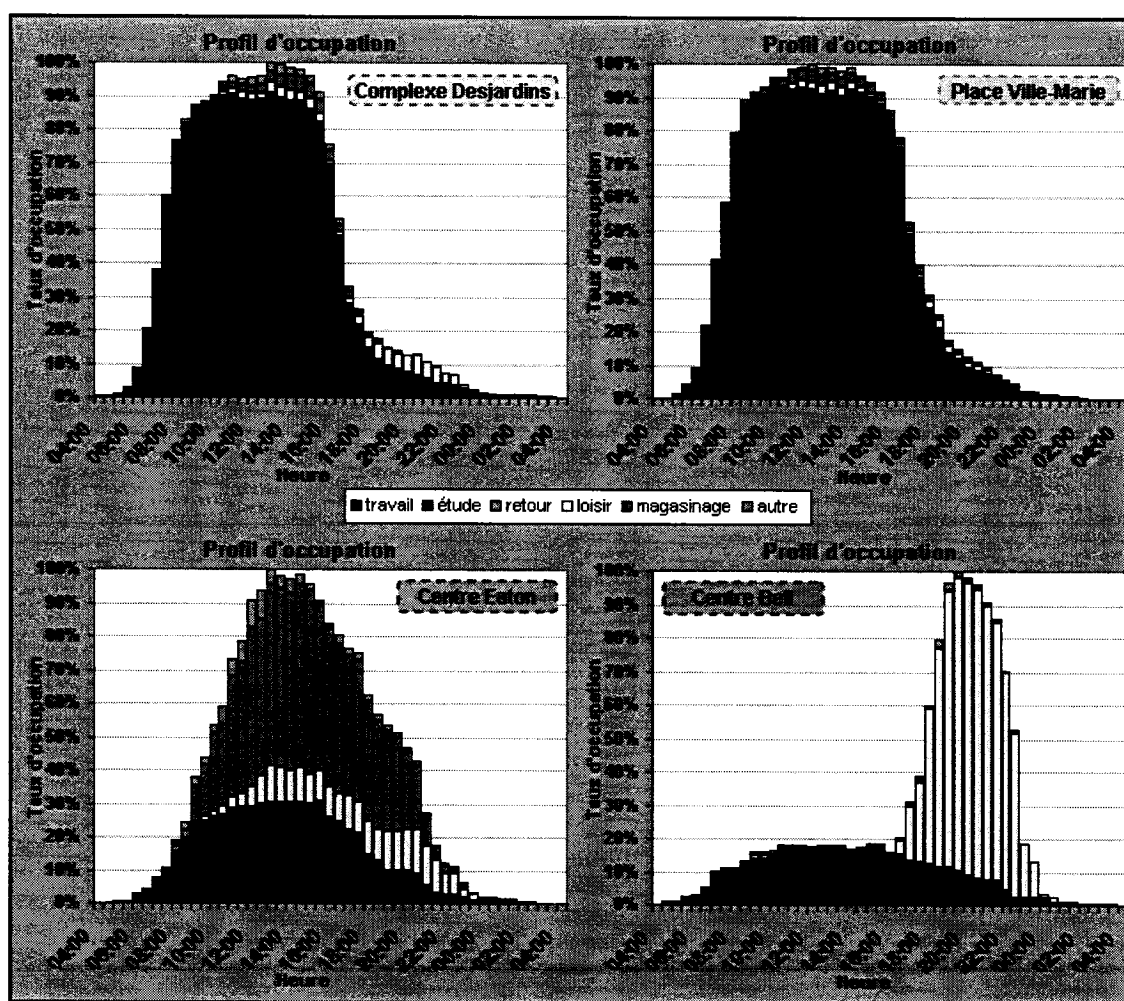


Figure 6.13: Profil d'occupation des générateurs de déplacements segmenté par le motif principal

Chapitre 7 : Conclusion

7.1 Abrégé des thématiques et contributions

S'inscrivant dans le paradigme méthodologique de la Grande Région de Montréal, le projet visait à conceptualiser le chaînon manquant dans la modélisation des déplacements de personnes: le réseau piétonnier de la ville intérieure. Avant de procéder, une revue des fondements actuels en terme de modélisation des transports urbains a permis de positionner cette recherche (chapitre 2). Par son découpage zonal et l'utilisation de modèles algébriques, l'approche agrégée se veut une méthodologie analytique dépassée par l'avancement technologique et la disponibilité de données riches sur la mobilité urbaine. Réciproquement, les différentes études sur les déplacements piétonniers par l'entremise de comptages et l'adjonction de modèles linéaires permettent la prédiction d'une demande strictement anonyme. À l'opposé, le traitement totalement désagrégé des itinéraires de déplacements caractérise finement les déplacements individuels.

L'approfondissement de l'approche totalement désagrégée a été réalisé par la description des composantes tripartites du système de transport (réseau, demande et territoire) ainsi que des procédures associées (chapitre 3). Par la participation active et de longue date à la cueillette, au traitement et à la dissémination des données sur la mobilité, différents systèmes informationnels ont émergé, assurant un raffinement continu des référentiels spatiaux et opérationnels, ainsi que des connaissances collectives sur les phénomènes de transport. L'évolution et la description de ces outils informationnels ont été exposées.

Caractérisant le sous-sol urbain du centre-ville, la ville intérieure intervient comme une interface de mobilité entre infrastructures souterraines de transport et générateurs de déplacements. Malgré les complexités intrinsèques liées à ce réseau particulier, une conceptualisation en bases de données relationnelles a été élaborée afin de modéliser les

déplacements piétonniers (chapitre 4). La tridimensionnalité inhérente, l'absence de toponymie des voies de circulation, la juridiction privée et multiple, la configuration spécifique ainsi que l'absence de données architecturales sont tous des facteurs considérés lors de l'étape de codification du réseau. Ainsi, une schématisation mathématique sous forme de noeuds et liens, géoréférencés dans l'espace tridimensionnel, a été possible par l'entremise d'une méthodologie qui repose sur un recensement in situ. Ce dernier a permis la localisation et le dénombrement du mobilier urbain spécifique à ce réseau souterrain.

Les déplacements piétonniers impliquent de courtes distances de parcours. L'étude de ces déplacements nécessite donc un niveau de résolution très fin pour assurer une analyse juste des comportements. Ce niveau s'obtient par une géolocalisation fiable des extrémités de déplacements à la paire de coordonnées x-y (chapitre 5). La confrontation des bases de données de géoréférences (générateurs et adresses civiques) au répertoire des établissements et emplois de Montréal a permis de déceler quelques géolocalisations erronées de générateurs de déplacements. Malgré tout, ce même rapprochement a permis d'illustrer la forte représentativité des données de l'enquête qui sonde un échantillon de 5% des ménages, face à une base de données externe représentant la totalité des emplois.

Finalement, la dernière partie de ce document a exploré les données de l'enquête Origine-Destination sous un contexte totalement désagrégé, cernant les déplacements à destination du centre-ville (chapitre 6). Différentes méthodes d'analyse spatiales (dénombrement matriciel, méthode des noyaux, centre moyen, ellipse de déviation standard) et systèmes d'information géographique ont permis la visualisation de comportements et tendances en terme de mobilité, préalablement invisibles sans le traitement systématique et l'utilisation d'outils informationnels. Ainsi, la dynamique urbaine et temporelle des activités au centre-ville a été réalisée. De plus, une esquisse d'évaluation des flots de déplacements dans la ville intérieure par les usagers transitant dans les noeuds de transport collectif a été illustrée. En dernier lieu, l'étude comparative

de générateurs de déplacements importants de la ville intérieure a confirmé le potentiel des données d'enquête pour effectuer une étude de marché des lieux d'attraction importants. Ainsi, chaque générateur est caractérisable par une analyse sociodémographique, une distribution spatiale de la clientèle captive ainsi que des comportements des usagers pour y accéder.

7.2 Réflexions et perspectives

Certains questionnements et réflexions émergent de ce projet, ouvrant de nouvelles perspectives de recherche. Voici quelques éléments notables :

- Le niveau de préoccupation poursuivi par les enquêtes Origine-Destination à grande échelle nécessite l'expression de bémols pour l'utilisation des données à une résolution autre que celle établie par la méthodologie d'enquête. En ce sens, ces enquêtes recueillent de l'information sur la mobilité des résidents du territoire de la Grande Région Métropolitaine, négligeant ainsi les touristes. Une réflexion s'impose sur la pertinence d'inclure ces usagers «externes» dans l'analyse des déplacements piétonniers. Sans nécessairement y répondre, des questionnements peuvent initier cette réflexion : quelle est la finalité première de ce réseau souterrain et à qui la planification du réseau est-elle principalement destinée. Par ailleurs, la méthodologie d'enquête ne considère pas totalement les déplacements courts du midi : déplacements importants et notables à cette période de la journée, spécifiquement pour les travailleurs qui descendent des tours à bureaux pour se rendre aux services de restauration des galeries souterraines. Un comptage in situ peut s'avérer une méthode complémentaire dans l'évaluation temporelle de l'achalandage. De plus, le concept de «journée moyenne de semaine» ne permet pas l'étude des déplacements le week-end ou des activités sporadiques en semaine. Malgré ces éléments, une analyse totalement désagrégée des itinéraires de déplacements déclarés dans les enquêtes ménages a permis de démontrer l'intérêt et le potentiel des données pour une

caractérisation des mouvements urbains au centre-ville. Comme il a été illustré, ces concepts d'enquête ne nuisent pas à la reconnaissance des patrons spatio-temporels des activités du centre-ville et des générateurs de déplacements.

- Bien que la déclaration d'une destination par dénomination d'un lieu reconnu soit priorisée dans les enquêtes ménages, la confrontation informationnelle ou l'introduction de bases de données externes soutiendraient la mise à jour et l'enrichissement du dictionnaire des générateurs de déplacements.
- Avec une caractérisation fine des clientèles et des infrastructures de transport empruntées pour accéder aux générateurs de déplacements, il est envisageable d'étudier les impacts suite à une modification du réseau piétonnier (prolongement ou fermeture temporaire d'un couloir). Pour ce faire, la procédure d'affectation des déplacements nécessite un raffinement de la fonction d'impédance. En ce sens, le choix d'un itinéraire piétonnier est grandement influencé par le type d'infrastructure urbaine accessible (escalier, escalier mobile, plan incliné ou horizontal) et le sens emprunté (montée ou descente). Par ailleurs, la présence de réseaux piétonniers, parallèles et en compétition, requiert une modélisation adéquate et uniforme de ces derniers. C'est donc dire que la modélisation actuelle du réseau de trottoirs requiert une adaptation tridimensionnelle afin de considérer les dénivellations à la surface.

7.3 Conclusion générale

Somme toute, la modélisation des déplacements piétonniers dans la ville intérieure nécessite un raffinement des techniques actuelles par la considération de la composante verticale des déplacements piétonniers. L'accès aux multiples technologies informationnelles, aux systèmes d'information géographique 3D et aux données géoréférencées, admet ce type de conceptualisation ainsi que l'analyse systématique de

la mobilité des usagers. De plus, la modélisation tridimensionnelle du réseau de la ville intérieure, combinée à une représentation en réalité virtuelle, ouvre la voie à de plus amples expérimentations sur la conception d'un système d'information aux usagers ou d'un système d'aide à la gestion des situations de crise (acte terroriste, incendie, intervention ambulancière, évacuation des usagers).

Références

ATKINS, S. T. (1986). Transportation planning models – what papers say. Traffic Engineering and Control, Volume de Septembre, p. 460-467.

BAILEY, T., GATRELL, A. (1995) Interactive Spatial Data Analysis. Longman Scientific and Technical : London, 413 pages.

BANOS Arnaud, (2001) Localizing people during surveys: a versatile strategy, Proceedings of the 6th International Conference on Geocomputation, Brisbane.

BEHNAM, J., PATEL, B.G. (1977). A Method for Estimating Pedestrian Volume in a Central Business District, Pedestrian Controls, Bicycle Facilities, Driver Research, and System Safety, Transportation Research Record 629, Transportation Research Board, Washington, D.C.

BESNER, J. (1997). Genèse de la ville intérieure de Montréal. 7e conférence de l'Association des Centres de recherche sur l'Utilisation Urbaine du Sous-sol, Espace souterrain, villes intérieures de demain, Montréal, novembre, 11 pages.

BIERLAIRE, M. (1997). Discrete choice models. [En ligne]. Intelligent Transportation Systems Program, Massachusetts Institute of Technology.
<http://roso.epfl.ch/mbi/papers/discretechoice/paper.html> (page consultée le 15 mai 2004)

BOISVERT, M. (2005). Modeling pedestrian flows in the Montréal's Indoor City, Xth Congress of the Association of research Centers on the Use of Underground Space in Urban Areas, Moscou, janvier, p. 24-28.

BONNEL, P., LE NIR, M. (1995) Téléphone ou face à face : évaluation comparative de deux méthodes d'enquête, 8e Entretiens du Centre Jacques-Cartier, Lyon.

BORGERS, A., TIMMERMANS, H. (1986). A Model of Pedestrian Route Choice and Demand for Retail Facilities within Inner-City Shopping Areas. Geographical Analysis, Vol. 18, p. 115-128.

BPR (Bureau of Public Roads) (1964). Traffic assignment manual, Urban Planning Division, U.S. Department of Commerce, Washington, D.C.

BRÖG, W., ERL, E. (2001). Walking – a neglected mode in transport surveys, Australia: Walking the 21st century, Perth, p.69-80.

BUECHEL, D., GILLIERON, P.-Y. (2004). Navigation pédestre à l'intérieur des bâtiments, Géomatique Suisse, Novembre 2004, p.664-668.

CHAPLEAU, R. (1974). Réseau de transport en commun : structure informatique et affectation. Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, 199 pages.

CHAPLEAU, R. (1990). La Planification et l'Analyse des Systèmes de Transport Urbain: un bilan des méthodes et modèles disponibles avec l'approche désagrégée, 25e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Montréal, p. 200-225.

CHAPLEAU, R. (1991). La Planification et l'Analyse des Systèmes de Transport Urbain: un bilan des méthodes et modèles disponibles avec l'approche désagrégée, Les Cahiers Scientifiques du Transport, Éditions Paradigme, no. 24, p. 27-51.

CHAPLEAU, R. (1992a). La modélisation de la demande de transport urbain avec une approche totalement désagrégée, Selected Proceedings of The World Conference on Transportation Research, WCTR Society, Lyon, volume II, p. 937-948.

CHAPLEAU, R. (1992b). Constitution d'un système informationnel de référence pour fins d'analyse et de planification des transports urbains: cas de Marrakech, 27e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Sherbrooke, p. 349-365.

CHAPLEAU, R. (1993). Une carte d'utilisation du sol dérivée d'une enquête origine-destination, 28e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Sainte-Adèle, p. 53-73.

CHAPLEAU, R. (1994). Les pieds, les pauvres et le métro, Routes et Transports, Montréal, vol. XXIV, no. 1, p. 35-46.

CHAPLEAU, R. (1995). Symphonie d'usages des grandes enquêtes Origine-Destination, en totalement désagrégé majeur, opus Montréal 87 et 93, 8e Entretiens du Centre Jacques-Cartier, Lyon.

CHAPLEAU, R. (1999). Analyse totalement désagrégée de la mobilité des travailleurs Montréalais, Routes et transports, Montréal, vol. 28, no. 2, p. 9-20.

CHAPLEAU, R. (2002). Mobilité des personnes âgées à Montréal en 1993: Analyse désagrégée, Livre Démographie et transport: Villes du Nord et Villes du Sud, Yves Bussières et Jean-Loup Madre, France, p.129-145.

CHAPLEAU, R. (2003). Measuring the internal quality of a CATI travel household survey, in Stopher, Peter, Jones, Peter (2003). Transport Survey Quality and Innovation, Kruger, South Africa, Pergamon, p. 69-87.

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., ALLARD, B., LEBEAU, L. (1986). Embryon d'un Système Expert pour le transport collectif urbain, 21e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Québec, p. 171-197.

CHAPLEAU, R., ALLARD, B., TRÉPANIÉ, M. (1997). Transit Path Calculation Supported by a Special GIS-Transit Information System, Transportation Research Record, Washington, no. 1521, p. 98-111.

CHAPLEAU, R., ALLARD, B., TRÉPANIÉ, M., MORENCY, C. (2000). Les sites Web transport dans la Grande Région de Montréal : problématique et orientations informationnelles, 35e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Québec, CD-ROM, 26 pages.

CHAPLEAU, R., ALLARD, B., TRÉPANIÉ, M., MORENCY, C. (2001). Les logiciels d'enquête transport comme instruments incontournables de planification analytique, Recherche, Transport, Sécurité, Paris, no 70, Janvier-Mars 2001, p. 59-77.

CHAPLEAU, R., ALLARD, B., TRÉPANIÉ, M., MORENCY, C. (2002). TRAIN : Théorie de la Relativité Analysée Interactivement... à Nouveau, 37e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, avril 2002, Québec, 23 pages.

CHAPLEAU, R., LAVIGUEUR, P., BAASS, K. G. (1987). A Posteriori Impact Analysis of a Subway Extension in Montréal, Transportation Research Record, Washington, no. 1152, p. 25-30.

CHAPLEAU, R., LAVIGUEUR, P. (1994). L'usager du mode piétonnier: caractérisation légère des montréalais, Routes et Transports, Montréal, vol. XXIV, no. 1.

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., MORENCY, C. (2004). Effets redistributifs des infrastructures de transport routier et en commun du Grand Montréal, 1987-1998, Dix-septièmes entretiens du Centre Jacques Cartier, Montréal, 14 pages.

CHAPLEAU, R., PICHE, D., CHAPLEAU, M.-A. (2003). Les stations de métro en réalité virtuelle: une autre technologie d'information pour l'usager du transport en commun, 38e Congrès Annuel de l'Association québécoise du transport et des routes, Sherbrooke.

CHAPLEAU, R., TRÉPANIÉ, M. (1994). Méthodologie d'analyse multimodale des grands générateurs de déplacements: cas des hôpitaux de Montréal, 29e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Valleyfield, tome 1, p. 368-386.

CHAPLEAU, R., TRÉPANIÉ, M., ALLARD, B. (1998). Practical implementations of object-oriented GIS-T, World Conference on Transportation Research, Anvers, Belgique, 15 pages.

CHEUNG, C. Y., LAM, W. H. K. (1998). Pedestrian route choices between escalator and stairway in MTR stations. Journal of Transportation Engineering, ASCE, vol. 124, no.3, p. 277-285.

DAAMEN, W. (2004). Modelling passenger flows in public transport facilities. PhD thesis. Delft University Press, 377 pages.

DAAMEN, W., HOOGENDOORN, SP. (2004). Level difference impacts in passenger route choice modelling. In TRAIL conference proceedings 2004, A world of transport, infrastructure and logistics, p. 103-127.

DALY, P. N., MCGRATH, F., ANNESLEY, T. J. (1991). Pedestrian speed/flow relationships for underground stations. Traffic Engineering and Control, London, vol. 32, no.2, p. 75-78.

DESYLLAS, J., DUXBURY, E., WARD, J., SMITH, A. (2003). Pedestrian Demand Modelling of Large Cities: An Applied Example from London. Centre for Advanced Spatial Analysis Working Paper 62, University College London, 15 pages.

DIJKSTRA, E. W. (1959). A Note on Two Problems in Connection with Graphs. Numerische Mathematik, Vol.1, p. 269-271.

DOMENCHIC, T.A., MCFADDEN, D. (1975). Urban travel demand: a behavioral analysis: a Charles River Associates research study. American Elsevier, New York, 215 pages.

DUEKER, K.J., TON, T. (2000). Geographic Information System for Transport. Chapter 15 in Handbook of Transport Modelling, David A. Hensher and Kenneth J. Button, Pergamon.

EASA, S.M., STRAUSS, T.R., HASSAN, Y., Soulerette, R.R. (2002). Three-Dimensional Transportation Analysis: Planning and Design. Journal of Transportation

Engineering, American Society of Civil Engineering, ASCE, Vol. 128(3), Mai/Juin, p.250-258.

ERCOLANO, J. M., OLSON, J. S., SPRING, D. M. (1997). Sketch-Plan Method for Estimating Pedestrian Traffic for Central Business Districts and Suburban Growth Corridors, Transportation Research Record 1578, Washington, DC.

FHWA, KAGAN, L.S., (1979) A Pedestrian Planning Procedures Manual, Vol. II, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, Publication no. FHWA-RD-79-46, Washington, DC.

FHWA, SCHWARTZ, W.L. et al. (1999), Guidebook on Methods to Estimate NonMotorized Travel: Overview of Methods. Turner-Fairbank Highway Research Center, Publication no. FHWA-RD-98-165.

FRUIN, J. (1971). Pedestrian Planning and Design, Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, New York, 206 pages.

GATRELL, A.C., BAILEY, T.C., DIGGLE, P.J., ROWLINGSTON, B.S. (1996). Spatial point pattern analysis and its application in geographical epidemiology. Trans Institute of British Geographers, NS 21:256-274.

GOODCHILD, M.F. (1998). Geographic information systems and disaggregate transportation modeling. Geographical Systems, Vol. 5 (1-2), p.19-44.

GROUPE MADITUC (1999). État du post-géocodage des localisations de l'enquête origine-destination 1998. Rapport interne, École Polytechnique de Montréal, 18 pages.

HACKLAY, M., O'SULLIVAN, D., THURSTAIN-GOODWIN, M., SCHELHORN, T. (2001). So go downtown: simulating pedestrian movement in town centres. Environment and Planning B: Planning and Design, vol. 28, p. 343-359.

HAN, K., MINTY, S., CLAYTON, A. (2003). Developing geographic information systems platforms for multijurisdictional transportation analyses: framework and techniques for spatial data sharing. Canadian Journal of Civil Engineering, Wilson Applied Science & Technology Abstracts Vol. 30(5), p. 807-818.

HARRIS, NG. (1991). Modelling walk link congestion and prioritisation of congestion relief. Traffic Engineering Control, Vol. 32, p.78–80.

HELBING, D., MOLNAR, P., FARKAS, I., BOLAY, K. (2001) Self-organizing pedestrian movement. Environment and Planning B, no.28, p. 361-383.

HILLIER, B. (1996). Space is the Machine. Cambridge University Press, 463 pages.

HILLIER, B., HANSON, J. (1984). The Social Logic of Space. Bath, The Pitman Press.

HILLIER, B., CHIARADIA, A. (2003). Configuration spatiale et mixité sociale urbaine, XXXIXème Colloque de l'ASRDLF: Concentration et ségrégation dynamiques et inscriptions territoriales, Lyon, Septembre 2003.

HOOGENDOORN, SP., BOVY, PHL. (2004). Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. Transportation Research Part B – methodological, vol. 38 no.2, p. 169-190.

KWAN, M.-P. (2003). Geovisualisation of Activity-Travel Patterns Using 3D Geographical Information Systems, 10th International Conference on Travel Behaviour Research, Lucerne, Août 2003.

KWAN, M.-P., LEE, J. (2005). Emergency Response After 9/11: The Potential of Real-Time 3D GIS for Quick Emergency Response in Micro-Spatial Environments. Computers, Environment and Urban Systems, vol.29, no.2.

LAM, W. H. K., MORRALL, J. F., HO, H. (1995). Pedestrian flow characteristics in Hong Kong. Transportation Research Record 1487, Transportation Research Board, Washington, D.C., p.56-62.

LAM, W. H. K., CHEUNG, C.-Y. (2000). Pedestrian speed/flow relationships for walking facilities in Hong Kong. Journal of Transportation Engineering, vol. 126, no. 4, p.343-349.

LAVIGUEUR, P., CHAPLEAU, R. (1990). Instruments d'analyse et de publication de données d'enquêtes origine-destination, Routes et Transports, Montréal, vol. XX no. 1, p. 26-35.

LEE, J. (2001). 3D Data Model for Representing Topological Relations of Urban Features, Proceedings of 21st Annual ESRI International User Conference, San Diego, CA.

LEE, J. (2004). 3D GIS for Geo-Coding Human Activity in Micro-Scale Urban Environments, M. Egenhofer, C. Freksa and H. Miller, eds., Geographic Information Science: Springer's Lecture Notes in Computer Science Computers, New York: Springer p.162-178.

LEVINE, N. (2000). CrimeStat: A Spatial Statistics Program for the Analysis of Crime Incident Locations. Ned Levine and Associates and the National Institute of Justice, Washington, DC.

MASSON, S. (1998). Interrelations entre système de transport et système de localisation: De l'héritage des modèles traditionnels à l'apport des modèles interactifs de transport et d'occupation des sols », Les Cahiers Scientifiques du Transport, no. 33/98, 29 pages.

MATLICK, J. M. (1996). If We Build It, Will They Come? (Forecasting Pedestrian Use and Flows). Pro Bike Pro Walk 96: Forecasting the Future. Bicycle Federation of America/Pedestrian Federation of America, Sept. 1996, p. 315–319.

MAY, A.D. (1990), Traffic Flow Fundamentals, Prentice Hall, New Jersey, 464 pages.

MC DONOUGH, K. (2002). La réalité virtuelle appliquée aux systèmes d'information de transport urbain collectif, Mémoire M.Sc.A., École Polytechnique, Génie civil, section Transports, 142 pages.

MEYER, M.D., MILLER, E.J. (1984). Urban Transportation Planning: a Decision-Oriented Approach, McGraw Hill, 524 pages.

MILLER, H., SHAW, S.-L. (2001). GIS-T Data Models. Chapitre 3 de Geographic Information Systems for Transportation. Principles and Applications. New York: Oxford University Press, 458 pages.

MORENCY, C. (2004). Contributions à la modélisation totalement désagrégée des interactions entre mobilité urbaine et dynamiques spatiales, Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, Montréal, pages 530.

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, Québec.

MORRALL, J.F., RANAYAKA, L.L., SENIVIRANTE, P.N. (1991). Comparison of Central Business District Pedestrian Characteristics in Canada and Sri-Lanka, Transportation Research Record 1294, Transportation Research Board, Washington, D.C., p. 57-61.

NAVIN, P.D., WHEELER, R.J., (1969). Pedestrian flow characteristics. Traffic Engineering, p. 30–36.

NJDOT (2000). Pedestrian Compatible Planning and Design Guidelines. [En ligne]. New Jersey Department of Transport. (page consultée le 30 mai 2005)
<http://www.state.nj.us/transportation/publicat/pdf/PedComp/pedintro.pdf>

NESS, M.P., MORRALL, J.F., HUTCHINSON, B.G. (1969). An Analysis of Central Business District Pedestrian Circulation Patterns. Highway Research Record, no. 283.

NOËL, M., CHAPLEAU, R. (1987). Modification d'un Réseau de Transport Collectif et Répartition Modale, 22e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Hull, p. 231-235.

NYERGES, T. L. (1990). Locational referencing and highway segmentation in a geographic information systems. Institute of Transportation Engineers Journal, Vol. 60(3), p. 27-31.

OLDER, S.J. (1968). Movement of pedestrians on footways in shopping streets. Traffic Engineering and Control, vol. 10, p. 160-163.

ORTUZAR, J., WILLUMSEN, L. (1994). Modelling Transport, John Wiley, New York, 1994, 438 pages.

O'SULLIVAN, S., MORRALL, J. (1996). Walking Distances to and from Light-Rail Transit Stations. Transportation Research Board, Transportation Research Record 1538, Washington, D.C., p. 19-26.

PORTER, C., SUHRBIER, J., SCHWARTZ, WL. (1999) Forecasting bicycle and pedestrian travel: State of the practice and research needs. Transportation Research Record 1674, Transportation Research Board, Washington, D.C., p. 94-101.

PUSHKAREZ, B., ZUPAN, J.M., (1975). Capacity of walkways. Transportation Research Record 538, Transportation Research Board, Washington, D.C., p. 1-15.

RAFORD, N. (2004) Pedestrian volume modelling methods: an international state of the practice review, U.C. Berkeley Traffic Safety Center. Paper UCB-TSC-RR-2003-15. <http://repositories.cdlib.org/its/tsc/UCB-TSC-RR-2003-15> (page consultée le 15 janvier 2005)

RAFORD, N., RAGLAND, D. (2003) Space Syntax: An Innovative Pedestrian Volume Modeling Tool for Pedestrian Safety. U.C. Berkeley Traffic Safety Center. Paper UCB-TSC-RR-2003-11. <http://repositories.cdlib.org/its/tsc/UCB-TSC-RR-2003-11> (page consultée le 15 janvier 2005)

RAUX C., LHOMET E., MASSON S. (1996). Un modèle stratégique de simulation des déplacements urbains - Conception et aspects méthodologique. Recherche Transports Sécurité, no.52, Juillet-Septembre, 13 pages.

RODRIGUE, J-P ET AL. (2004). Transport Geography on the Web. [En ligne]. Hofstra University, Department of Economics & Geography, <http://people.hofstra.edu/geotrans> (page consultée le 2 mai 2005).

RUTHERFORD, G.S. (1979). Use of the gravity model for pedestrian travel distribution, Transportation Research Record 728, Transportation Research Board, Washington, D.C.

SENEVIRATNE, P. (1985). Acceptable walking distances in central areas. Journal of Transportation Engineering, Vol. 111, no. 4, p. 365-376.

SENEVIRATNE, P., FRASER, P. (1991). Issues related to planning for pedestrian needs in central business districts. Transportation Research Record 1141, Transportation Research Board, Washington, D.C., p. 7-14.

SHRIVER, K. (1997). Influence of Environmental Design on Pedestrian Travel Behavior in Four Austin Neighborhoods. Transportation Research Record 1578, Transportation Research Board, Washington, D.C., p. 64-75.

SUTTON, J. (1997). Data attribution and network representation issues in GIS and transportation, Transportation Planning and Technology, Vol. 21, p. 25-44.

THÉRIAULT, M. (1996). Systèmes d'Information Géographique, Concepts Fondamentaux. [En ligne] Extraits des Notes de cours, Numéro 12, 2e édition LATIG, Département de géographie, Université Laval, Québec, 165 pages.
<http://www.ggr.ulaval.ca/Cours/IFT/lecon11/SIG5.HTM> (page consultée le 16 juin 2005)

THILL, J. C. (2000). Geographic information systems for transportation in perspective. Transportation Research: Part C (Emerging Technologies), no. 8, p. 3-12.

TRÉPANIÉ, M. (1999). Modélisation totalement désagrégée et orientée-objet appliquée aux transports urbains. Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, Montréal, 250 pages.

TRÉPANIÉ, M., CHAPLEAU, R. (1996). Un modèle d'analyse désagrégée des générateurs de déplacements: vers une connaissance détaillée de l'utilisation des lieux urbains, 31e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Québec, recueil, tome 1, p. 41-60.

TRÉPANIÉ, M., CHAPLEAU, R. (2001a). Linking Transit Operational Data to Road Network with a Transportation Object-Oriented GIS, Urban and Regional Information Systems Association Journal, Park Ridge, IL, vol. 13, no.2, p. 23-27.

TRÉPANIÉ, M., CHAPLEAU, R. (2001b). Analyse orientée-objet et totalement désagrégée des données d'enquêtes ménages origine-destination, Revue canadienne de génie civil, Ottawa, vol. 28, no 1, p. 48-58.

TRÉPANIÉ, M., CHAPLEAU, R., ALLARD, B., MORENCY, C. (2002). Méthodologie d'analyse des impacts de relocalisation des générateurs de déplacements. 37e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Québec.

TRÉPANIÉ, M., CHAPLEAU, R., ALLARD, B. (2003). Les systèmes d'information à l'usager de transport collectif: des outils d'aide à la planification. 38e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Sherbrooke.

TRÉPANIÉ, M., CHAPLEAU, R., ALLARD, B. (2005). Can trip planner log files analysis help in transit service planning?, Journal of Public Transportation, Miami, Vol. 8, no 2, p. 79-103.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2000). « Chapter 18: Pedestrian Methodology ». Highway Capacity Manual. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC.

TSENG-CHYAN, D.Y., LAI, P.C. (2004). Route Guiding with Vertical Consideration for Visitors on Foot. Proceedings XXth ISPRS Congress, Commission II, Working Group II/6, Istanbul, Turkey, Juillet 2004, p.12-23.

VAN ROTHEM, C. (2004). Collecte de données et qualité: une confrontation entre théorie et pragmatisme basée sur l'étude du cas de Montréal. Mémoire M.Sc.A., École Polytechnique, Génie civil, section Transports, Montréal, 177 pages.

VIRKLER, M., ELAYADATH, S. (1994). Pedestrian Speed-Flow-Density Relationships. Transportation Research Record 1438, Transportation Research Board, Washington, D.C.

WARDMAN, M. (2001). Public Transport Values of Time. Institute for Transport Studies Working Paper, no. 564, 49 pages.

WIGAN, M. (1995). Treatment of walking as a mode of transportation. Transportation Research Record, Transportation Research Board, Washington, D.C., no. 1487, p. 7-13.

ZACHARIAS, J. (2000). Modelling pedestrian dynamics in Montreal's underground city. Journal of Transportation Engineering, vol. 126, no. 5, p. 405-412.

ZLATANOVA, S. (1999). VRML for 3D GIS. Proceedings of the 15th Spring Conference on Computer Graphics, Budmerice, Slovakia, p. 74-82.