

Titre: Expérimentation à propos des effets redistributifs de l'usage d'un
Title: réseau routier urbain

Auteur: M. Dalil Essakali
Author:

Date: 1999

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Dalil Essakali, M. (1999). Expérimentation à propos des effets redistributifs de
l'usage d'un réseau routier urbain [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de
Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/8687/>
Citation:

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/8687/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Robert Chapleau
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**EXPÉRIMENTATION À PROPOS DES EFFETS REDISTRIBUTIFS
DE L'USAGE D'UN RÉSEAU ROUTIER URBAIN**

MOHAMMED DALIL ESSAKALI

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)**

OCTOBRE 1999



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services
395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques
395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

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

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

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

0-612-48847-0

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

**EXPÉRIMENTATION À PROPOS DES EFFETS REDISTRIBUTIFS
DE L'USAGE D'UN RÉSEAU ROUTIER URBAIN**

présenté par : DALIL ESSAKALI Mohammed

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

M. BAASS Karsten, Ph.D., président

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

M. BERGERON Daniel, M.Sc.A., membre

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie tout particulièrement son directeur de recherche le professeur Robert Chapleau d'avoir dirigé ce travail et encadré cette recherche. L'auteur tient à lui exprimer sa profonde gratitude de l'avoir fait bénéficier de ses vastes connaissances et de sa riche expérience. Sa grande disponibilité, ses conseils judicieux et son soutien méthodologique ont été pour l'auteur une source constante de motivation.

L'auteur remercie également M^{me} Catherine Morency et MM. Bruno Allard et Martin Trépanier du groupe MADITUC de l'École Polytechnique de Montréal de leur disponibilité et leur collaboration technique.

L'auteur souhaite remercier l'École nationale des ponts et chaussées de Paris pour les possibilités qu'elle lui a offertes.

Enfin, l'auteur tient à remercier profondément sa famille qui, par ses encouragements, son soutien et sa présence, a su lui donner le courage de mener à terme ses projets de formation.

RÉSUMÉ

Il est couramment admis que le système de transport doit satisfaire le principe d'efficacité en veillant à ce que tout changement systémique maximise le bien-être social collectif. Pourtant, un système de transport efficace peut ne pas bénéficier à tous les acteurs de la même façon; ainsi, des groupes de la communauté peuvent même bénéficier du système aux dépens d'autres. Autrement dit, le système de transport peut être efficace sans pour autant être juste et équitable. Cette contradiction entre efficacité et équité redistributive est due à l'hypothèse fondamentale de l'approche utilitariste d'efficacité à savoir: l'agrégation des utilités individuelles en une utilité collective. Par ailleurs, la plupart des efforts méthodologiques qui ont été déployés pendant les années 1960 et 1970 s'intéressent à l'efficacité du système. Ils analysent la capacité des réseaux de transport en s'appuyant sur des modélisations collectives et agrégées. Dès que la question de redistribution est soulevée, les méthodes agrégées d'analyse montrent leurs limites. L'analyse des effets redistributifs doit en effet identifier la répartition des bénéfices et des coûts du système de transport entre les différents acteurs impliqués. Cette analyse doit donc connaître l'utilisation individuelle du système pour distinguer les gagnants des perdants, même si le système est efficace. Le principal objectif de cette recherche est d'expérimenter une méthodologie valide pour l'évaluation de l'équité d'un système de transport, et plus particulièrement un réseau routier urbain. Il s'agit de mesurer les effets redistributifs, sur les plans territorial et social, associés à l'usage de ce réseau à l'aide d'une approche informationnelle totalement désagrégée.

Le présent projet de recherche commence par mettre en place le cadre conceptuel d'une analyse systémique des transports; il introduit ainsi les notions de système et d'interactions en adoptant le modèle micro-économique traditionnel. Ensuite, ce projet met en contexte la problématique de redistribution. Il présente les théories de la justice sur lesquelles repose le principe d'équité et explique en particulier la théorie de Rawls.

Par la suite, il définit l'équité territoriale et l'équité sociale du système de transport et donne un aperçu sur des mécanismes de redistribution des coûts et des bénéfices. Sur le plan méthodologique, le projet de recherche examine le modèle de planification des transports urbains basé sur la procédure séquentielle classique et explique pourquoi un tel modèle ne peut pas servir à mener une analyse des effets redistributifs. En cherchant d'autres méthodologies, ce projet explore l'approche informationnelle totalement désagrégée développée dans le contexte montréalais. Il explique les fondements de cette approche pour montrer sa parfaite adaptation pour l'évaluation des effets redistributifs. Le projet explore ensuite une méthode d'analyse dite multi-perspective et propose son application aux transports en se servant d'un modèle ontologique. Enfin, ce projet réalise une expérimentation sous forme d'analyse multi-perspective des effets redistributifs de l'usage d'un réseau routier urbain. Pour ce faire, des données sur la mobilité, issues de l'enquête origine-destination à grande échelle réalisée en 1993 dans la Grande région de Montréal, ont été analysées à l'aide d'un modèle informationnel totalement désagrégé.

Cette recherche a conclu qu'il est parfaitement possible d'analyser la redistribution des bénéfices et des coûts associés à l'usage d'un réseau routier urbain à l'aide d'un système informationnel totalement désagrégé dédié au transport. L'analyse de cette redistribution permet de connaître, d'une manière transparente, l'usage individuel du réseau et d'en déduire le niveau d'équité sociale. Cette même analyse permet d'évaluer les problèmes de débordement entre les territoires et les juridictions géopolitiques, et de mesurer le degré d'équité territoriale et les phénomènes d'évasion fiscale.

ABSTRACT

It is generally accepted that any changes in the transportation system must maximize the social welfare, and hence meet the efficiency principle. Nonetheless, an efficient transportation system may not benefit in the same way to all actors involved; thus, some groups of individuals may even benefit from the system at others' expense. In other words, the transportation system can be efficient without being fair and equitable. This contradiction between efficiency and redistributive justice is due to the main hypothesis which supports the utilitarian efficiency approach that is aggregating individual utilities to derive a collective one. In addition, most of the methodological efforts that had been deployed during the 1960s and 1970s deal with the system's efficiency. They analyze the transportation networks' capacity and use collective aggregate modeling methods. When the issue of redistribution is raised, the limitations of these aggregate analysis methods become evident. The analysis of redistributive impacts must actually identify the distribution of benefits and costs among the various actors involved. To carry out this analysis, the individual use of the system is required in such a way that winners can be distinguished from losers, even in the case of an efficient transportation system. The main objective of this research is to try out a valid methodology to evaluate the equity of a transportation system, and specifically an urban road network. It is about measuring the territorial and social redistributive impacts associated with the use of this network utilizing a totally disaggregate information approach.

This research project begins with an overview of the conceptual framework of a transportation system analysis: it introduces the concepts of system and interactions by adopting the traditional micro-economic model. Then, this project explains the problem of redistribution in a transportation context. It presents the theories of justice upon which the principle of equity is based, and it particularly explains Rawls' theory. Then, it defines territorial equity and social equity and gives an overview of some cost and benefit

redistribution mechanisms. On the methodological side, this research project examines the urban transportation planning approach based on the traditional four-step model; it further explains why such an approach cannot be used to carry out an analysis of redistributive impacts. This project then looks for other planning methods and particularly explores the totally disaggregate urban transportation modeling approach developed in the Montreal case. It explains the basis of this method and shows its perfect adaptation to evaluate redistributive impacts. Then, the project explores an analysis method known as multi-perspective analysis and examines its application to transportation problems using an ontological model. Finally, this project carries out a multi-perspective analysis of the redistributive impacts associated with the use of an urban road network. For this purpose, it used a totally disaggregate information model and analyzed mobility data from the 1993-Greater-Montreal-Area large-scale origin-destination survey.

This research concluded that it is perfectly possible to analyze the redistribution of benefits and costs associated with the use of an urban road network using a totally disaggregate transportation information system. The analysis of this redistribution makes it possible to calculate, in a transparent way, the individual use of the network, and to deduce the social equity level. The same analysis makes it possible to evaluate the transportation system's economic and financial flows between territories and geopolitical jurisdictions, and to measure the degree of territorial equity and tax avoidance phenomena.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX	XIII
LISTE DES FIGURES	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	XVII
INTRODUCTION.....	1
Objectifs de la recherche	3
Démarche méthodologique	5
Contenu du mémoire	6
CHAPITRE 1 : L'ANALYSE SYSTÉMIQUE DES TRANSPORTS.....	8
1.1 Introduction de l'approche systémique en transport.....	8
1.1.1 Le système de transport.....	9
1.1.2 Les défis du système de transport.....	10
1.1.3 Les modèles	11
1.1.4 Les particularités du sous-système de transport urbain des personnes.....	14
1.2 Les interactions entre le système de transport et le système d'activité.....	15
1.2.1 La théorie de la demande.....	15
1.2.2 L'offre de transport.....	17
1.2.3 L'équilibre entre l'offre et la demande.....	22
1.3 Conclusion	24

CHAPITRE 2 : EFFETS REDISTRIBUTIFS ET ENJEUX SOCIO-ÉCONOMIQUES DU SYSTÈME DE TRANSPORT.....	25
2.1 Les effets redistributifs du système de transport.....	26
2.1.1 Le principe d'équité.....	27
2.1.2 Efficacité et efficience.....	27
2.1.3 Les théories de la justice – la théorie de Rawls.....	28
2.1.4 Les scénarios des effets redistributifs.....	30
2.1.5 Équité et efficacité.....	32
2.1.6 Les effets redistributifs du système de transport.....	33
2.1.7 Les principes de tarification des transports	34
2.1.8 Effets redistributifs d'un réseau routier	37
2.2 Effets redistributifs et transport durable.....	40
2.3 Conclusion	42
CHAPITRE 3 : LIMITES DES MODÈLES SÉQUENTIELS CLASSIQUES.....	43
3.1 La procédure séquentielle classique	44
3.1.1 Génération des déplacements	45
3.1.2 Distribution des déplacements	46
3.1.3 Le choix modal	47
3.1.4 L'affectation des déplacements.....	48
3.2 Étude de l'affectation dans les modèles séquentiels.....	48
3.2.1 L'affectation du chemin le plus court : Tout-Ou-Rien.....	48
3.2.2 L'affectation d'équilibre	49
3.2.3 L'affectation probabiliste.....	61
3.3 Les modèles séquentiels classiques et l'analyse des effets redistributifs	62
3.3.1 Agrégation, affectation d'équilibre et perte d'informations.....	63
3.3.2 Problèmes fondamentaux liés à la modélisation synthétique.....	63
3.4 Conclusion	65
CHAPITRE 4 : LA MODÉLISATION TOTALEMENT DÉSAGRÉGÉE.....	66
4.1 Fondements de l'approche totalement désagrégée.....	67
4.2 Modélisation systémique dans l'approche totalement désagrégée	69
4.2.1 La notion du territoire totalement désagrégé.....	69

4.2.2 L'offre totalement désagrégée.....	70
4.2.3 La demande totalement désagrégée	71
4.2.4 La modélisation totalement désagrégée de l'équilibre.....	72
4.2.5 Le cas d'un réseau routier sous congestion.....	74
4.3 Quelques usages pragmatiques de l'approche totalement désagrégée	75
4.4 Conclusion	76
CHAPITRE 5 : EXPLORATION D'UNE APPROCHE ONTOLOGIQUE POUR L'ANALYSE MULTI-PERSPECTIVE DU SYSTÈME DE TRANSPORT.	77
5.1 Le paradigme informationnel.....	77
5.2 Analyse intelligente du système de transport.....	78
5.2.1 Introduction de l'analyse multi-perspective.....	79
5.2.2 Éléments d'une analyse multi-perspective	81
5.3 Un modèle ontologique pour le système de transport.....	83
5.3.1 L'ontologie de substances et d'accidents selon Aristote.....	83
5.3.2 Quelques applications de l'approche ontologique.....	85
5.3.3 Pourquoi une ontologie pour le système de transport?.....	85
5.3.4 Éléments de l'ontologie du système de transport	86
5.3.5 Approche ontologique et approche totalement désagrégée.....	91
5.3.6 La modélisation totalement désagrégée orientée-objets.....	92
5.4 La place du "data mining" dans une analyse multi-perspective.....	93
5.5 Conclusion	95
CHAPITRE 6 : MÉTHODOLOGIE PRAGMATIQUE POUR LA MESURE DES EFFETS REDISTRIBUTIFS D'UN RÉSEAU ROUTIER URBAIN.....	96
6.1 Cadre méthodologique d'analyse	97
6.2 Formalisation du problème.....	98
6.2.1 Formulation ontologique	98
6.2.2 Points et polylinéaires	99
6.2.3 Modélisation du territoire	100
6.2.4 Modélisation du réseau.....	101
6.2.5 Modélisation des déplacements.....	101
6.2.6 Modélisation de l'équilibre	101

6.3 Quelques méthodes analytiques sur les points et sur les polylinéaires.....	103
6.4 Les systèmes de gestion des bases de données.....	106
6.5 Conclusion	107
CHAPITRE 7 : EXPÉRIMENTATION ET RÉSULTATS.....	108
7.1 Données de l'expérimentation	109
7.1.1 Le contexte	109
7.1.2 La demande utilisée dans l'expérimentation	111
7.1.3 Le territoire	112
7.1.4 Le réseau routier utilisé.....	114
7.1.5 La procédure de simulation	115
7.1.6 Les bases de données.....	116
7.2 Analyse multi-perspective	117
7.2.1 Perspective réseau	117
7.2.2 Perspective territoire de résidence.....	118
7.2.3 Perspectives Tronçon-Domicile-Destination.....	123
7.2.4 Perspectives sexe et âge.....	130
7.3 Validation de la méthode.....	133
7.4 Conclusion	133
CONCLUSION	135
Aspect systémique	135
La problématique de redistribution.....	136
Réflexion sur les instruments	137
La méthodologie.....	138
À propos de l'expérimentation	139
Conclusion générale	140
RÉFÉRENCES.....	142

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Évaluation des coûts dans l'exemple de Braess.....	60
Tableau 6.1 : Modélisation des éléments ontologiques de base.....	100
Tableau 7.1 : Historique et méthodes des enquêtes téléphoniques origine-destination de la Grande région de Montréal.....	110
Tableau 7.2 : Les bases de données de l'expérimentation.....	116
Tableau 7.3 : Utilisation du réseau routier de la GRM en période de pointe du matin selon les types de route	117
Tableau 7.4 : Quelques caractéristiques des usagers du pont Champlain.....	124
Tableau 7.5 : Quelques caractéristiques des usagers du tronçon de l'autoroute Métropolitaine entre Décarie et des Laurentides.....	126
Tableau 7.6 : Quelques caractéristiques des usagers de la rue Notre-Dame.....	128

LISTE DES FIGURES

Figure 0.1 : Objectifs de la recherche.....	4
Figure 0.2 : Méthodologie de la recherche.....	5
Figure 1.1 : Illustration du surplus social.....	22
Figure 1.2 : Interactions et équilibre entre le système de transport et le système d'activité (Manheim, 1979).....	23
Figure 2.1 : Scénarios des effets redistributifs	31
Figure 2.2 : Problématique d'équité et d'efficacité.....	33
Figure 2.3 : Aspect territorial et juridictionnel du réseau et caractéristiques spatio-temporelles du déplacement.....	39
Figure 2.4 : Triangle idéologique du transport durable	41
Figure 3.1 : Les étapes de la procédure séquentielle classique.....	44
Figure 3.2 : Illustration de la situation d'équilibre (Kanafani, 1983).....	52
Figure 3.3 : Relation fondamentale Débit, Vitesse et Densité.....	56
Figure 3.4 : La forme générale de la relation Débit-Coût.....	57
Figure 3.5 : Réseau historique du paradoxe de Braess	59
Figure 4.1 : Les composantes fondamentales d'un système informationnel désagrégé	68
Figure 4.2 : L'itinéraire dans l'approche totalement désagrégée (inspiré de MADITUC)	72
Figure 5.1 : Quelques perspectives du système de transport.....	80
Figure 5.2 : Le modèle ontologique selon Aristote.....	84

Figure 5.3 : Quelques relations méréotopologiques typiques adaptées au cas montréalais (inspiré de Smith, 1999b).....	90
Figure 5.4 : Éléments de l'approche totalement désagrégée utilisés dans l'approche ontologique	91
Figure 5.5 : Traitement des données jusqu'à l'intégration.....	94
Figure 6.1 : Bilan de consommation territoriale.....	103
Figure 6.2 : Vérification si un point est intérieur à un polygone.....	105
Figure 6.3 : Exploitation des données pour la mesure des effets redistributifs.....	107
Figure 7.1 : Les territoires d'analyse de la Grande région de Montréal.....	113
Figure 7.2 : Le réseau de simulation.....	114
Figure 7.3 : Profil de charge en trois dimensions du réseau routier de la GRM en pointe du matin dans les deux directions.....	115
Figure 7.4 : Utilisation du réseau routier de la GRM en période de pointe du matin selon les types de route	118
Figure 7.5 : Analyse de l'usage du réseau routier de la GRM en véhicules-kilomètres per capita pour les cinq régions en pointe du matin.....	120
Figure 7.6 : Mesure du débordement des régions périphériques sur le territoire de la CUM en véhicules-kilomètres en pointe du matin.....	121
Figure 7.7 : Analyse de la consommation en véhicules-kilomètres pour les 65 secteurs de la GRM en pointe du matin.....	122
Figure 7.8 : Dispersion des résidences des voyageurs qui empruntent le pont Champlain en pointe du matin.....	125
Figure 7.9 : Dispersion des destinations des voyageurs qui empruntent le pont Champlain en pointe du matin.....	125
Figure 7.10 : Dispersion des résidences des voyageurs qui empruntent le tronçon de la Métropolitaine entre Décarie et des Laurentides en pointe du matin.....	127
Figure 7.11 : Dispersion des destinations des voyageurs qui empruntent le tronçon de la Métropolitaine entre Décarie et des Laurentides en pointe du matin.	127

Figure 7.12 : Utilisation de la rue Notre-Dame selon les territoires de résidence et de destination en pointe du matin en véhicules-kilomètres.....	129
Figure 7.13 : Distance moyenne du déplacement selon le groupe d'âge et le sexe en pointe du matin.....	131
Figure 7.14 : Pourcentage de consommation en personnes-kilomètres selon le sexe et les groupes d'âge en pointe du matin.....	131
Figure 7.15 : Mesure de la redistribution de l'usage du réseau routier de la GRM selon les groupes d'âge et le sexe en pointe du matin.....	132

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CUM	Communauté Urbaine de Montréal
DJMA	Débit journalier moyen annuel
GRM	Grande région de Montréal
MTQ	Ministère des Transports du Québec
MADCADD	Modèle d'Analyse Désagrégée (Computer Aided Drafting and Drawing)
MADITUC	Modèle d'Analyse Désagrégée des Itinéraires de Transport Urbain Collectif
MAD(strat)²	Modèle d'Analyse Désagrégée stratifiée et stratégique
MRC	Municipalité Régionale de Comté
STCUM	Société des Transports de la Communauté Urbaine de Montréal
UTM	Universal Transverse Mercator
VK	Véhicules-kilomètres

INTRODUCTION

Il est souvent rapporté que le système de transport urbain fait face à une grave conjoncture économique qui exige une meilleure allocation des ressources. Dans ce contexte, une allocation optimale est garantie en se conformant au principe d'efficacité qui vise à maximiser le bien-être collectif. Cependant, l'efficacité systémique se fait souvent au détriment de quelques acteurs du système, car, en s'intéressant à l'augmentation du bien-être collectif, elle ignore la manière dont cette augmentation est distribuée à travers les différents groupes de la société. Autrement dit, l'efficacité ne signifie pas nécessairement une redistribution juste et équitable des bénéfices et des coûts. Cette équité peut être sociale ou territoriale, dans les deux cas, elle repose sur des théories de la justice dont la plus connue est celle de Rawls. L'analyse de l'équité sociale du système de transport s'intéresse à la redistribution des coûts et des bénéfices à travers les catégories d'usagers et de non-usagers selon leurs attributs socio-économiques. Quant à l'analyse de l'équité territoriale, elle concerne la mesure des débordements entre les territoires et les juridictions géopolitiques, elle s'intéresse également aux phénomènes d'évasion fiscale associés à l'usage du système de transport, et elle évalue les mécanismes de compensation réciproque.

Un planificateur de transport qui s'intéresse à la problématique de l'équité du système doit objectiver la question en vue de mesurer la redistribution des coûts et des bénéfices et de clarifier les enjeux. La question est donc traduite en termes de constat, d'explication et de mesure. Pour mener ce défi, il se sert de méthodologies et d'outils d'analyse. Il est clair que la problématique de redistribution exige une connaissance fine et détaillée de l'usage individuel du système. Pour un réseau de transport routier urbain, des modèles de planification ont été développés pendant les années 1960 et 1970. La plupart de ces modèles reposent sur une approche de consommation collective et agrégée. Ils servent donc à estimer la capacité des réseaux sans pour autant pouvoir

identifier les vrais utilisateurs. Une méthodologie pour la mesure des effets redistributifs doit être capable de traiter les usagers et les non-usagers d'une manière individuelle. Elle doit être transparente et se servir de données réelles et de fonctionnalités clairement définies.

La problématique de redistribution soulève donc un défi méthodologique de taille qui doit être surmonté. Dans le contexte du paradigme informationnel actuel, il est loisible de chercher des méthodologies pragmatiques et pertinentes, quitte à abandonner les habitudes méthodologiques classiques simplistes. Les progrès dans les technologies informationnelles permettent une meilleure gestion des données sur la mobilité et un meilleur traitement des informations sur le système de transport. Des systèmes informationnels désagrégés de planification constituent un acquis pour la réalisation d'expérimentations exploratoires en vue de l'estimation des effets redistributifs.

Le présent projet de recherche s'inscrit dans une démarche exploratoire d'analyse systémique des transports. Le principal objectif est d'élaborer et d'expérimenter, à partir d'un système de planification adéquat, des fonctionnalités analytiques permettant de trouver de meilleures réponses aux questions relatives à la redistribution des bénéfices et des coûts associés à l'usage d'un réseau routier urbain. La démarche ainsi que les résultats de ce projet de recherche sont contenus dans ce mémoire.

Avant de présenter en détail les objectifs et la structure de ce mémoire, il faut signaler que les résultats sont à mettre dans leur contexte académique bien que l'expérimentation menée soit basée sur des données de mobilité réelles. Par conséquent, ces résultats ne peuvent se substituer à ceux d'une analyse systémique plus approfondie ou servir pour d'autres fins que celle de ce projet de recherche : expérimentation d'une méthodologie.

Objectifs de la recherche

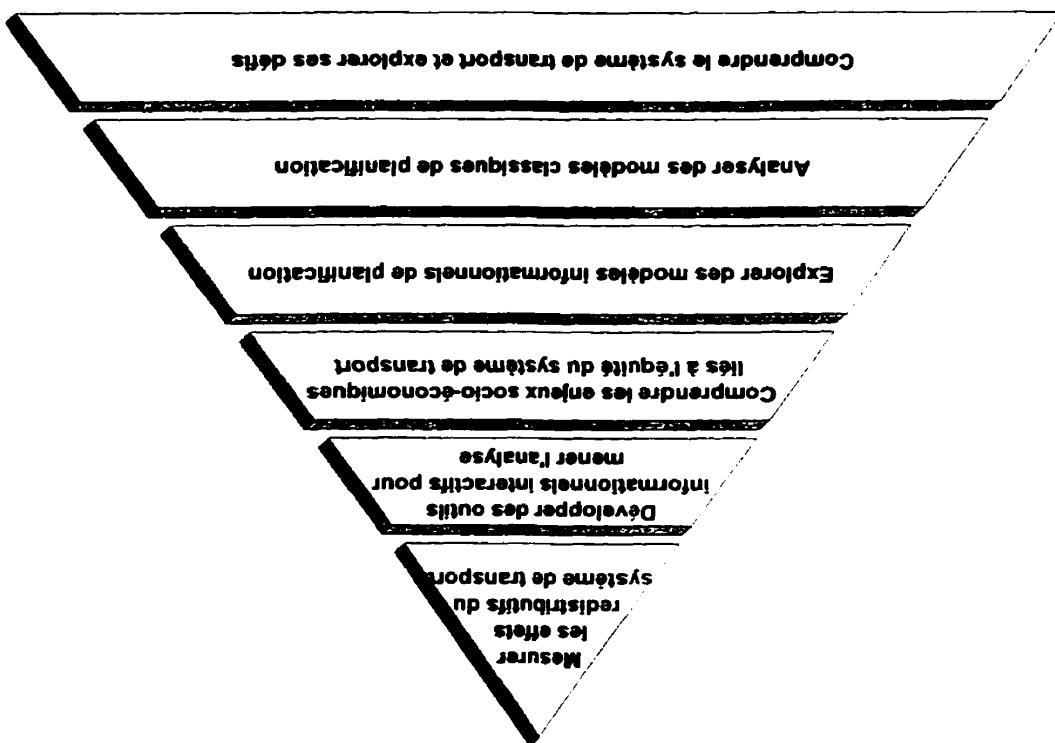
L'objectif principal de cette recherche est l'expérimentation, dans le cadre de la Grande région de Montréal, d'une méthodologie d'évaluation des effets redistributifs d'un système de transport urbain, et plus particulièrement d'un réseau routier. L'expérimentation s'intéresse aux effets redistributifs à caractère territorial, et notamment les effets de débordement entre territoires et entités géopolitiques. Elle s'intéresse également aux effets redistributifs à caractère social, et en particulier, ceux associés à l'âge, au genre et au niveau de revenu.

Cet objectif s'inscrit dans une perspective différente de celles ordinairement considérées dans les exercices de planification. En effet, cette recherche sort du cadre habituel de planification, qui consisterait par exemple à traiter le problème de transport comme une question de capacité, pour traiter le système de transport du point de vue social, économique et financier. Il s'agit d'un problème de justice redistributive, territoriale et sociale, qui peut aussi être vu comme un problème de fiscalité.

En plus de l'objectif principal, cette recherche a d'autres objectifs qui sont sommairement illustrés à la figure 0.1, et qui consistent en :

- ◆ L'exploration du système de transport et de ses défis à travers une revue de littérature adéquate. Il s'agit de cadrer la problématique de redistribution à l'intérieur d'une démarche systémique traditionnelle mais valide et pertinente.
- ◆ La compréhension des enjeux socio-économiques liés à la problématique d'équité du système de transport. Autrement dit, il faut comprendre les fondements du principe d'équité, et plus particulièrement les théories de la justice qui le supportent, ainsi que sa contradiction avec le principe d'efficacité qui maximise le bien-être collectif.
- ◆ L'analyse des modèles classiques de planification et de leur capacité à résoudre des problèmes aussi subtils que ceux des effets redistributifs. Il faut ainsi comprendre

Figure 0.1 : Objectifs de la recherche



- Pour atteindre les objectifs de cette recherche, une démarche méthodologique intégrée a été suivie.
- Le développement d'outils informationnels et interactifs pour analyser et illustrer la problématique de redistribution.
 - L'exploration des systèmes informationnels désagrégés de planification en vue de leur utilisation pour analyser les effets redistributifs de l'usage d'un réseau routier urbain.
 - Pourquoi un modèle classique ne peut pas servir à évaluer l'usage individuel du système.

Démarche méthodologique

La méthodologie de cette recherche s'inscrit dans le cadre d'une démarche exploratoire. En effet, comme le montre la figure 0.2, il s'agit dans un premier temps de comprendre le problème, de fixer les variables et d'explorer les différents outils disponibles pour mener l'analyse. Dans un second temps, les outils d'analyse sont choisis, et la démarche est formalisée. Enfin, l'expérimentation est réalisée, et les résultats sont analysés.

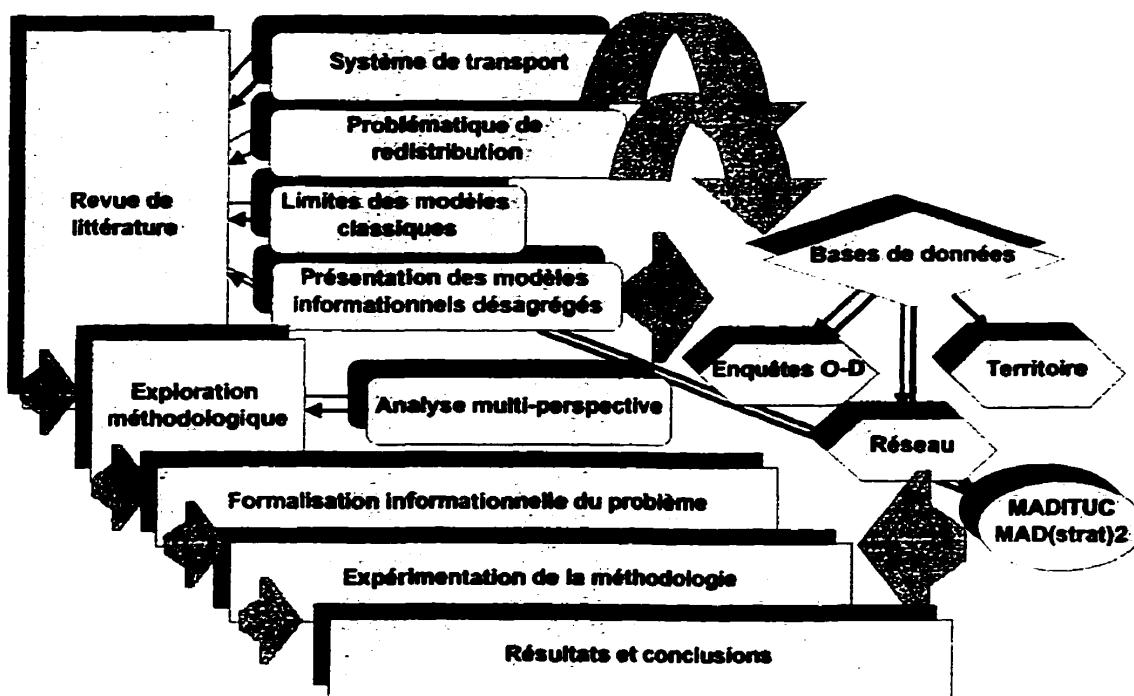


Figure 0.2 : Méthodologie de la recherche

Contenu du mémoire

Eu égard à la démarche méthodologique décrite précédemment, ce mémoire est organisé en sept chapitres.

Le premier chapitre décrit le cadre général des problèmes de transport. Tout d'abord, il présente les fondements traditionnels de l'analyse systémique ainsi que les méthodes d'analyse et de modélisation. Ensuite, il introduit les éléments systémiques des transports en adoptant le modèle micro-économique de la demande, de l'offre et de l'équilibre.

Le second chapitre est consacré à la description de la **problématique de redistribution** des coûts et des bénéfices du système de transport. En effet, les enjeux socio-économiques associés aux deux principes d'équité et d'efficacité ainsi que ceux liés aux théories de la justice sont présentés dans ce chapitre. Des mécanismes de redistribution et de compensation sont décrits. Enfin, la place de l'analyse des effets redistributifs dans le cadre du concept de transport durable est expliquée.

Le troisième chapitre examine l'approche agrégée de modélisation des transports urbains basée sur la procédure séquentielle classique. Il explique comment une analyse des effets redistributifs à l'aide de cette méthode est structurellement limitée à cause des hypothèses et des simplifications qui supportent cette démarche.

En partant de la conclusion du chapitre précédent et fidèle au défi méthodologique, ce travail explore, dans le quatrième chapitre, une méthodologie de modélisation désagrégée qui met l'emphasis sur l'information individuelle relative aux usagers du réseau de transport. Il s'agit du système d'information totalement désagrégé de planification des transports MADITUC développé dans le contexte montréalais.

Le cinquième chapitre explore les méthodes d'analyse multi-perspective. Pour ce faire, ce chapitre présente la notion d'ontologie et explique comment elle pourrait être

appliquée au cas des transports pour mener une analyse multi-perspective des effets redistributifs. Ce même chapitre présente l'enjeu que pose la gestion des bases de données dans le cadre de l'analyse multi-perspective.

Le sixième chapitre est une réalisation pragmatique de quelques fonctionnalités analytiques nécessaires pour l'analyse des effets redistributifs. La méthodologie utilisée pour mener cette analyse est basée sur l'approche totalement désagrégée du système MADITUC.

Le septième chapitre consacre l'approche explorée lors de cette recherche. Il expose l'expérimentation en vraie grandeur en se servant d'outils d'analyse adaptés ou construits. L'expérimentation est réalisée en se servant des données sur la mobilité issues de l'enquête origine-destination de la Grande région de Montréal réalisée en 1993. Le modèle MADITUC est utilisé pour le traitement des données d'enquête origine-destination, de territoire et de réseau. Le sous-modèle MAD(strat)² est utilisé pour sa part pour reproduire les déplacements déclarés lors de l'enquête.

CHAPITRE 1 : L'ANALYSE SYSTÉMIQUE DES TRANSPORTS

L'évaluation des effets redistributifs associés à l'usage d'un réseau de transport doit se faire dans un cadre systémique. En conséquence, avant d'entreprendre l'évaluation de ces effets, il faut comprendre le système de transport ainsi que ses interactions avec le système d'activité. A cet effet, ce chapitre présente, sous forme d'une revue de littérature, des explications portant sur les éléments et les défis du système de transport. Ensuite, il décrit une approche micro-économique permettant de modéliser les interactions systémiques.

1.1 Introduction de l'approche systémique en transport

Un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique organisé autour d'un but. Système solaire, système physique, systèmes du monde: ces notions, et combien d'autres semblables, ont été utilisées, parfois inconsciemment, pour désigner différentes représentations cognitives ou conceptuelles depuis l'émergence des premières pensées humaines structurées il y a plus de deux mille ans. Le développement du concept de système au cours des dernières décennies a permis de l'appliquer aux activités sociales de tous les jours tout en mettant l'emphasis sur la finalité de l'organisation systémique. Nulle activité n'est désormais sans profiter de l'approche système qui structure à la fois les éléments, les interactions et le but de l'activité.

En parallèle à la notion de système, une analyse systémique est un outil fondamental pour l'exploration des enjeux d'une intervention ou d'un phénomène. En effet, contrairement à une approche analytique dans laquelle un élément d'un phénomène est identifié et analysé indépendamment des autres composantes, une approche systémique

est beaucoup plus générale. Elle s'intéresse à tous les éléments du phénomène, intérieurs et extérieurs, ainsi qu'aux interactions dynamiques qui les conditionnent. Un élément clé dans l'approche systémique est la finalité du processus. Tous ces aspects constituent une dimension particulière à l'analyse systémique et lui permettent de servir d'outil favorable de planification.

Le domaine des transports est un exemple de système qui ne manque pas de complexité. Toute cette complexité peut être cernée en adoptant une approche systémique. La formalisation et la conceptualisation des éléments et des interactions du système de transport sont explorées dans le sous-paragraphe qui suit.

1.1.1 Le système de transport

Le système de transport constitue la base du cadre social et économique de la société et lui permet d'atteindre ses objectifs. Sur le plan social, il facilite l'accès aux services et participe ainsi à l'amélioration du cadre de vie. Sur le plan économique, il facilite la mobilité des personnes, des biens et des services. Ces deux aspects font du système de transport un maillon essentiel pour soutenir les objectifs de la société.

Le système de transport est composé de tous les éléments qui peuvent être transportés à savoir : les personnes, les marchandises et l'information; ainsi que tous les éléments qui peuvent induire ou faciliter le mouvement d'une origine à une destination autrement dit une infrastructure.

L'analyse systémique des transports consiste à évaluer les interactions entre le système de transport et le système d'activité de la société. En effet, les systèmes de transport et d'activité sont étroitement liés et sont en interaction continue. D'une part, le développement régional conditionne le système de transport en influant sur le comportement des éléments qui se déplacent ainsi que sur l'infrastructure. D'autre part, le système de transport est un moteur de développement qui provoque des changements

dans les caractéristiques de la mobilité dans la région. L'analyse systémique permet d'observer, de comprendre et d'évaluer ces interactions. Elle n'est pas une fin en soi, elle est plutôt un cadre général à l'intérieur duquel les enjeux sont clarifiés.

Selon Manheim (1979), l'analyse systémique doit s'intéresser aux **options des systèmes d'activité de la société**. Il s'agit de l'évaluation des variables de décision susceptibles d'être modifiées délibérément ou involontairement par les différents acteurs impliqués d'une manière directe ou indirecte dans les activités de la société. Les options peuvent concerner le système de transport quand il est question de la technologie, des réseaux, des caractéristiques des liens, des véhicules, des politiques d'opération et des politiques organisationnelles. Les options peuvent aussi concerner le système d'activité environnant comme c'est le cas des modifications dans les variables de déplacements ou dans les caractéristiques socio-économiques. En somme, toutes les options pertinentes doivent être considérées par l'analyse systémique.

Toujours selon Manheim (1979), l'analyse systémique doit aussi s'intéresser aux **impacts des différentes alternatives**. Ces impacts peuvent être catégorisés en impacts sur les usagers, sur les opérateurs, sur l'environnement physique, sur l'environnement fonctionnel et sur le niveau gouvernemental. En s'intéressant aux impacts, l'analyse systémique joue son rôle de clarification d'enjeux.

1.1.2 Les défis du système de transport

Manheim (1979) a défini deux défis fondamentaux qui caractérisent le système de transport. Il s'agit du défi de substance et du défi méthodologique. Pour expliquer ces défis, Manheim a écrit :

« Le défi de substance de l'analyse systémique des transports est d'intervenir délicatement et délibérément sur le tissu complexe d'une communauté afin d'utiliser le transport efficacement en concordance avec d'autres actions publiques ou privées dans l'atteinte des buts de cette communauté. »

« Le défi méthodologique de l'analyse systémique des transports est de mener pour une situation particulière une analyse systémique qui soit valide, pratique et pertinente, et qui contribue à la clarification des enjeux à débattre.»

Le défi de substance confirme encore une fois l'importance du système de transport dans le cadre complexe de la société ainsi que les interactions dynamiques entre le système de transport et le système d'activité. Quant au défi méthodologique, il fournit un cadrage de l'analyse systémique en insistant sur les aspects fondamentaux à savoir: la pertinence et la finalité de l'analyse.

L'analyse systémique se sert souvent de modèles. Les modèles sont des moyens méthodologiques qui essayent d'expliquer ou de prédire les éventuelles conséquences de certains changements dans les options des systèmes d'activité sur le tissu général de la société. Le sous-paragraphe qui suit contient une description des modèles et de leur utilisation lors de l'analyse systémique.

1.1.3 Les modèles

Le planificateur des transports se trouve aujourd'hui devant une multitude de modèles d'analyse. Il faut dire que la deuxième moitié du XX^e siècle a connu un développement exceptionnel des modèles de prévision et d'analyse de la demande de transport. Chaque modèle doit être supporté par une méthodologie valide, et les hypothèses qui lui sont sous-jacentes doivent être clairement définies.

1.1.3.1 Une taxinomie de modèles

Manheim (1979) situe les **systèmes de modèles** entre les options et les impacts de l'analyse systémique des transports. Autrement dit, le rôle d'un modèle selon Manheim est de permettre à l'analyse de prédire tous les impacts significatifs étant donné un ensemble d'options. Les modèles sont donc l'instrument qui sert à évaluer les

conséquences réciproques sur les systèmes d'activité et de transport suite à un changement dans l'un des deux systèmes.

Plusieurs catégorisations de modèles existent. Pour Manheim (1979) par exemple, il faut distinguer cinq types de modèles :

- ◆ Les modèles de service qui servent à prédire le niveau de service pour différentes options. Autrement dit, ces modèles fournissent la fonction d'offre du système de transport.
- ◆ Les modèles de ressources qui déterminent les ressources nécessaires pour un niveau de service donné et pour des options bien définies.
- ◆ Les modèles de la demande qui déterminent la fonction de la demande de transport.
- ◆ Les modèles d'équilibre qui prédisent l'état d'équilibre à court terme entre l'offre et la demande du système de transport.
- ◆ Les modèles de tendances qui servent à prédire les changements à long terme du système d'activité eu égard à l'équilibre du système de transport.

L'analyse taxinomique ci-dessus est basée sur le rôle d'un modèle comme élément d'une procédure systémique de prédiction. Dans d'autres cas, il sera question, par exemple, d'un **modèle descriptif** quand son rôle consiste à répliquer quelques caractéristiques importantes d'un phénomène. Il sera également question de **modèle de prédiction** lorsqu'il est supposé prédire un phénomène. Enfin, il sera plutôt question de **modèle de planification** quand son rôle est d'évaluer les impacts et les résultats d'une intervention.

Les méthodes utilisées par le modèle peuvent être de différentes catégories. Le modèle peut être basé sur des données et des processus déterministes comme il peut utiliser des méthodes probabilistes ou stochastiques. Il peut utiliser des méthodes analytiques ou statistiques comme il peut avoir recours à des simulations. Le modèle peut aussi être complètement basé sur une approche informationnelle pour mettre en valeur et enrichir des observations.

Le modèle est caractérisé par son aspect temporel et son niveau d'agrégation. Pour ce qui est du temps, le modèle peut être stationnaire ou temporel selon qu'il concerne un instant donné ou qu'il prenne en compte les évolutions temporelles du phénomène. En ce qui concerne son niveau de détail, le modèle est dit agrégé quand il considère le processus comme étant celui d'un groupe. Dans ce cas, il modélise le comportement et les caractéristiques de l'ensemble des individus. A l'opposé, le modèle est dit désagrégé quand il s'intéresse au comportement réel de chaque élément de la population. En somme, l'aspect temporel et le niveau d'agrégation sont deux éléments fondamentaux à considérer lors de la manipulation des modèles de transport.

1.1.3.2 Critique des modèles

Quel que soit le modèle utilisé, il doit respecter le défi méthodologique de l'analyse systémique des transports. Il doit lui-même être valide, pratique, pertinent et clair. Le rôle du modèle ne doit pas dépasser la clarification des enjeux des différentes options envisagées.

Il faut avoir conscience qu'un modèle basé sur une longue chaîne de sous-modèles avec un nombre énorme de paramètres et de variables donne aux résultats une incertitude importante. Dans ce contexte, des chercheurs en transport (GRETU, 1980) parlent du problème de la probance d'un modèle. Ils se demandent si les résultats d'un grand modèle sur ordinateur qui simule un système complexe sont probants. Autrement dit, si les résultats sont une conséquence logique des données d'entrée ou reflètent surtout l'effet du hasard ou des artifices de modélisation. Atkins (1986) explique pour sa part comment c'est souvent le modèle qui doit être mis en question plutôt que les données du modèle. En un mot, un modèle doit être probant autrement, l'analyse sera biaisée.

Parmi les composantes du système de transport c'est le sous-système de transport urbain qui connaît la plus grande prolifération de modèles. Ce phénomène est surtout dû

aux caractéristiques intrinsèques du sous-système de transport urbain qui sont exposées dans le sous-paragraphe qui suit.

1.1.4 Les particularités du sous-système de transport urbain des personnes

Le sous-système de transport urbain est défini par Meyer et al. (1984) comme le mouvement des personnes et des marchandises entre des origines et des destinations à l'intérieur d'une région urbaine. Il s'agit donc d'une caractérisation spatiale du mouvement. Quand il est question de définir le concept de région urbaine, Kanafani (1983) propose de l'étendre au-delà des limites administratives et géopolitiques de la ville pour inclure toutes les régions qui génèrent des déplacements touchant d'une manière ou d'une autre le centre urbain. Dans ce contexte, le sous-système de transport urbain garde tous les aspects du système de transport sauf qu'il s'intéresse à un espace urbain restreint.

Les déplacements urbains se distinguent par au moins trois aspects fondamentaux. Premièrement, les déplacements urbains se caractérisent par des motifs dont la catégorisation est laissée au soin du planificateur. Toutefois, il existe quelques motifs généraux souvent utilisés tels que le travail, les études, le magasinage, le loisir et le retour à domicile. Les motifs sont aussi distingués selon que le déplacement est effectué à partir du domicile ou non. La deuxième caractéristique importante du transport urbain concerne la distribution temporelle des déplacements. Les déplacements effectués en périodes de pointe sont traités séparément de ceux effectués hors pointe. La distribution temporelle des déplacements dépend des systèmes d'activité et de culture de la région. Finalement, la troisième caractéristique du sous-système de transport urbain a trait au degré de détail approprié pour mener une analyse systémique. Si la plupart des anciens courants de modélisation ont choisi d'agréger les données géographiques et temporelles à un niveau qui permet une gestion en rapport avec les technologies disponibles à l'époque, d'autres courants tirent profit des nouvelles technologies informationnelles pour traiter des données individuelles. En résumé, le motif et l'heure du déplacement ainsi

que le niveau de détail sont trois principaux aspects qui distinguent le sous-système de transport urbain.

1.2 Les interactions entre le système de transport et le système d'activité

A l'intérieur du cadre général de la société, les interactions entre le système de transport et le système d'activité se traduisent par une succession d'équilibres à court terme qui mènent à leur tour à un équilibre à long terme. En empruntant le vocabulaire économique, il est loisible de schématiser un équilibre entre une demande constituée essentiellement du système d'activité et une offre reflétant le système de transport. Ce sous-chapitre explique comment cette schématisation conceptuelle est organisée.

1.2.1 La théorie de la demande

L'estimation des besoins en déplacements à un niveau de service ou de prix donné constitue l'estimation de la demande de transport. L'estimation de cette demande pour différents niveaux de services ou de prix permet de dériver la fonction de la demande de transport. Enfin, l'analyse des caractéristiques de cette fonction et des attributs qui l'influencent constitue le champ de l'analyse de la demande de transport. Cette dernière est sans doute un des domaines les plus importants de la planification des transports.

1.2.1.1 La demande de transport

En théorie micro-économique, la demande peut être définie comme une fonction reliant, d'une part, les niveaux des besoins ou des désirs d'un bien et, d'autre part, les niveaux de prix. La demande de transport est définie de la même façon. En effet, elle n'est qu'une représentation des niveaux de mobilité des personnes, du mouvement des

Marchandises ou du transfert de l'information qui se produiraient à des niveaux de prix différents. Il s'agit donc dans le cas du transport des personnes de la **pénétration** d'une personne à se déplacer étant donné un niveau de prix. Ces prix peuvent représenter, par exemple, le coût dû à l'énergie et au temps consommés. La demande de transport ne doit donc pas être confondue avec les flots observés. Elle reflète plutôt le **potentiel** des flots de trafic. Ce potentiel peut être divisé en mobilité observée et mobilité latente (Kanafani, 1983 et Merlin, 1991).

Toutefois, à l'inverse de la demande de la plupart des activités économiques, la demande de transport est une demande **dérivée**. Le déplacement n'est pas une fin en soi. Le déplacement est un processus intermédiaire qui permet à l'entité en mouvement de participer à différentes activités situées dans sa destination. Pour cette raison, il faut être prudent lors de la transposition de la théorie micro-économique au système de transport.

La demande de transport est souvent exprimée en termes de déplacements effectués en un instant donné par des individus entre une origine et une destination. Deux dimensions sont donc spécifiques à la demande. D'une part, la demande est caractérisée par sa dimension temporelle puisqu'elle peut être occasionnelle comme elle peut être régulière à fréquence saisonnière, hebdomadaire ou quotidienne par exemple. D'autre part, la demande possède un caractère spatial reflété par les lieux de l'origine et de la destination du déplacement. Elle peut être locale, régionale, interrégionale, internationale ou intercontinentale (Merlin, 1991). Ces deux aspects, temporel et spatial, sont à l'origine de la complexité systémique des transports.

La demande est également caractérisée par le motif et le mode du déplacement ainsi que et le chemin emprunté. Le motif du déplacement peut expliquer le comportement des entités qui se déplacent. Le mode du déplacement et le chemin emprunté sont une conséquence des options disponibles et du comportement des usagers.

La combinaison de toutes les caractéristiques des déplacements, et en particulier le temps, l'espace, le motif et le chemin emprunté, à un niveau de détail bien approprié, permet d'évaluer les bénéfices directs et indirects du système de transport.

1.2.1.2 L'analyse de la demande de transport

L'analyse des relations entre la demande de transport et les activités socio-économiques qui génèrent les déplacements est souvent appelée l'analyse de la demande de transport. La mobilité des gens en un moment donné et dans un espace précis est liée au niveau et au type des activités humaines environnantes. L'analyse de la demande cherche des relations entre les différentes manières de mesurer ces activités et le niveau de la mobilité. Ces relations sont souvent formulées sous forme de modèles de la demande de transport.

Le niveau et le mode de vie de la personne ou des groupes de personnes qui se déplacent sont deux facteurs importants sur lesquels s'attarde l'analyse de la demande de transport. A cet égard, Merlin (1991) souligne que la relation entre ces deux facteurs et la mobilité se traduit pour le voyageur par les dépenses encourues pour effectuer le déplacement et par sa disponibilité à consacrer un temps donné pour le déplacement à des niveaux donnés de confort et de sécurité. La mobilité des marchandises est également fonction du coût de transport, du temps et de la sécurité.

1.2.2 L'offre de transport

En théorie micro-économique, l'offre est une fonction qui donne la quantité d'un bien que le fournisseur est prêt à offrir à un niveau de prix donné.

Pour pouvoir appliquer la théorie micro-économique de l'offre, il faut prendre en compte les caractéristiques intrinsèques du système de transport. D'une part, l'offre de transport n'est pas souvent identifiable d'une manière claire; d'autre part, le coût n'est pas

nécessairement exprimé en terme monétaire; et enfin, le comportement de l'usager constitue souvent un attribut très important de la fonction de l'offre (Kanafani, 1983).

L'offre de transport est influencée par divers facteurs. La technologie est un aspect décisif et déterminant de l'offre. Les stratégies d'exploitation et d'opération sont aussi importants que la technologie. Cependant, c'est le contexte institutionnel et le comportement des usagers qui vont former les limites de l'offre.

1.2.2.1 Caractéristiques de l'offre de transport

Merlin (1991) rappelle que l'offre de transport est caractérisée par ses aspects géométrique et qualitatif. En ce qui concerne la géométrie ou la topologie, le mouvement des personnes ou des marchandises peut se faire en mer, par voie aérienne, sur terre ou dans les voies d'eau, ce qui exige des infrastructures différentes. Du point de vue qualitatif, il s'agit surtout de caractéristiques telles que la vitesse du mouvement, la capacité du système, les coûts de déplacement, la qualité de service, la sécurité et les nuisances associées au système. La géométrie conditionne souvent la qualité de l'offre, et en résultent des contraintes importantes qui vont jouer sur la vitesse du déplacement et les volumes transportés.

La qualité du service est une variable fort importante de l'offre de transport. Elle concerne, par exemple, l'espace disponible pour le voyageur ou la marchandise, le nombre de correspondances, le temps d'attente, la régularité, le confort et l'esthétique. Ces aspects sont souvent incorporés dans une fonction générale exprimant le niveau de service du système de transport.

1.2.2.2

La fonction d'offre

Les coûts de transport

La notion de coût de transport est différente de celle employée dans la théorie micro-économique générale. En effet, le coût de transport englobe aussi bien la valeur monétaire que d'autres variables telles que le temps du déplacement, le temps d'attente, le confort et la sécurité. Ces variables sont souvent regroupées dans une seule formule homogène qui exprime un **coût généralisé** de transport.

De la même façon qu'en théorie micro-économique, il faut distinguer le coût total, le coût moyen et le coût marginal de transport. Il faut aussi distinguer les fonctions de coût à court terme et celles à long terme. La relation entre les différents niveaux du coût de transport et les caractéristiques de l'offre constitue la fonction de coût.

La fonction d'offre

La fonction d'offre exprime une relation entre les différents niveaux des attributs du système de transport d'une part, et les attributs du niveau de service perçu par les usagers d'autre part. Les principales composantes de la fonction d'offre de transport sont essentiellement le temps total de déplacement, le coût total de déplacement, la fréquence, le confort et la fiabilité.

La problématique de la valeur du temps

La valeur du temps est une mesure subjective et dépend souvent du comportement des usagers. Cette caractéristique explique les difficultés rencontrées quand il est question de l'aborder d'une manière approfondie. En effet, la valeur du temps doit être différenciée par individu et par motif de déplacement. Elle doit aussi être distinguée selon la période de la journée ou de l'année considérée. Le confort influe de son côté sur

la valeur du temps. Quinet (1990) soulève un autre problème qui concerne la distribution de la valeur du temps sur un intervalle de temps passé. Toutes ces difficultés font de l'estimation de la valeur du temps une problématique aiguë aussi bien en théorie qu'en pratique.

Coûts privés versus coûts sociaux

Les coûts sociaux peuvent être définis comme les coûts d'une activité économique, qui sont supportés, d'une façon ou d'une autre, par la société plutôt que par les personnes impliquées en tant que producteurs ou usagers. Les bénéfices sociaux sont définis d'une façon similaire : ce sont les bénéfices d'une activité économique, qui sont reçus par la société plutôt que par le producteur.

Parfois le système de transport souffre de déséconomies sous forme d'externalités négatives ou positives qui sont la conséquence d'un système de coûts non approprié. En général, les externalités négatives apparaissent lorsque certaines activités imposent à des personnes à l'extérieur du système des coûts non compensés. Autrement dit, le coût social du produit excède son coût privé de production. Dans un autre contexte, il sera question d'externalités positives lorsqu'une activité bénéficie à des personnes qui ne payent pas pour ces bénéfices. Ceci veut dire que le bénéfice social excède le bénéfice privé reçu par le producteur. Lorsque des externalités existent dans le système de transport, ce dernier connaît des déséconomies qui handicapent sa performance.

Pour ce qui est du système de transport, des déséconomies peuvent exister suite aux dommages causés à l'issue d'un déplacement qui provoquerait une congestion; endommagerait l'infrastructure; ou nuirait à l'environnement par la pollution sonore ou par la pollution de l'air ou de l'eau. Ces déséconomies peuvent être éliminées partiellement, et théoriquement totalement, en ajustant la fonction d'offre et le système de prix utilisé. Le paragraphe qui suit explique ce cas de figure d'une façon théorique à l'aide d'un exemple inspiré de Button (1994).

Cet exemple présente un cas fictif illustrant la notion des coûts sociaux et des externalités. Il s'agit d'une route où les usagers doivent payer une redevance d'usage égale au coût privé marginal de production noté MC comme dans la Figure 1.1. Il est sous-entendu que ce coût augmente avec le volume du trafic sur la route. Sur la même figure, la demande du trafic sur la route est modélisée par une courbe MB qui représente le bénéfice marginal du déplacement. A l'équilibre, un volume optimal F_1 est enregistré et les usagers payent une redevance notée P_1 . Le bien-être social est égal au total du surplus du consommateur (des usagers) représenté dans ce cas par l'aire du triangle P_1bc et du surplus du producteur représenté par l'aire du triangle abP_1 . Il faut noter que ce bien-être est interne au système de transport.

Si la même situation est considérée, mais cette fois les usagers peuvent admirer une composante esthétique de la route ou aux abords de la route, le bénéfice marginal se verra augmenté, et la courbe de la demande sera dans ce cas représentée par MB' . Si le fournisseur de la route peut faire payer les usagers le prix correspondant à l'admiration de la composante esthétique, il doit faire de sorte que son offre réponde à la demande en améliorant la route pour pouvoir supporter à l'équilibre un trafic plus important F_2 sans pour autant avoir à changer sa fonction d'offre. Dans ce cas, le bénéfice externe a été internalisé et le surplus total de la société est amélioré.

Dans un autre cas de figure, si la route souffre de la congestion, la fonction d'offre réelle sera représentée par un coût marginal MC' plus élevé et, à l'équilibre, un volume F_3 doit être atteint. Le surplus total est diminué dans ce cas optimal. Cependant, ce cas d'optimalité n'est réalisable que si le fournisseur décide de faire payer le vrai prix aux usagers. Si ces derniers continuent de subir l'ancienne fonction d'offre MC , ils recevront des bénéfices dont ils ne supportent pas les coûts. Ces coûts seront donc supportés par des personnes externes qui n'utilisent pas la route en question. Le fait de demander aux usagers de payer le prix réel consiste à internaliser une externalité négative.

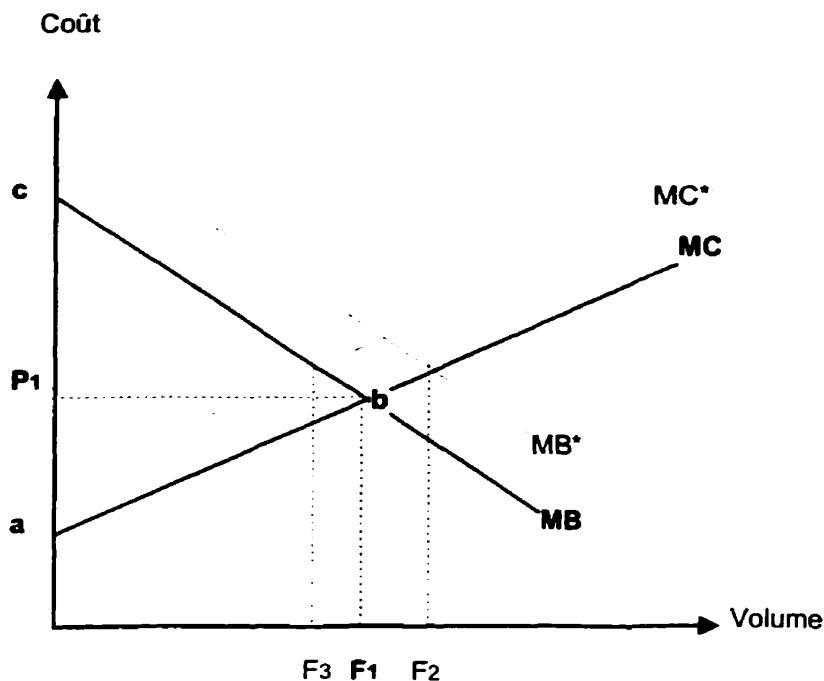


Figure 1.1 : Illustration du surplus social

Dans cet exemple simple, il n'a pas été question d'expliquer comment dériver les fonctions d'offre et de demande. Il est théoriquement possible de le faire pour des cas simples, cependant, en pratique, il est très délicat de déterminer les coûts sociaux.

1.2.3 L'équilibre entre l'offre et la demande

L'équilibre du marché selon la théorie micro-économique est atteint lorsqu'il n'y a aucune tendance vers un changement du prix. Cette situation se produit au niveau de prix auquel la quantité du bien demandée est égale à la quantité offerte.

Cette même définition peut être transposée au cas des interactions entre le système de transport et le système d'activité. Toutefois, vu que le prix n'est pas le seul déterminant dans la demande et l'offre de transport, un ajustement de la définition de l'équilibre s'avère indispensable. Ainsi, l'équilibre entre le système de transport et le système d'activité est atteint lorsque les facteurs affectant la demande de transport sont égaux aux facteurs déterminant l'offre de transport, et que la demande et l'offre pour ces mêmes facteurs sont égales.

Manheim (1979) décompose l'équilibre du système de transport en trois processus tels qu'illustrés à la Figure 1.2. Tout d'abord, les caractéristiques de la mobilité sont déterminées par les systèmes de transport et d'activité. Ensuite, ces mêmes caractéristiques provoquent des réactions au cours du temps qui changent, d'une part, le système de transport et, d'autre part, le système d'activité. Ces processus dynamiques d'actions et de réactions aboutissent à des équilibres à court terme puis à l'équilibre à long terme.

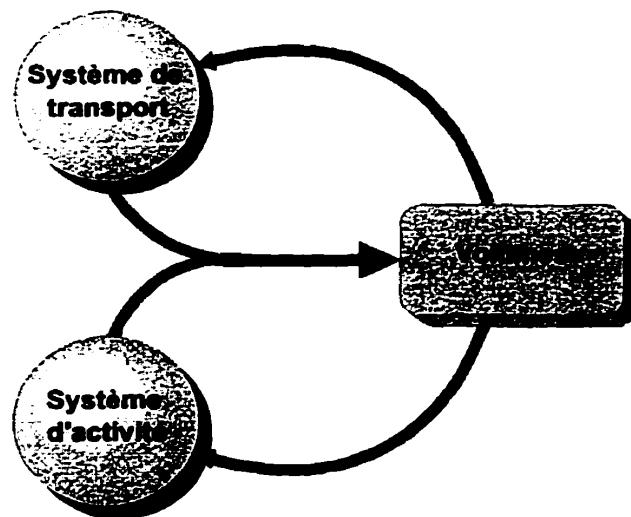


Figure 1.2 : Interactions et équilibre entre le système de transport et le système d'activité (Manheim, 1979)

1.3 Conclusion

La clarification des enjeux est le but d'une analyse systémique valide des transports. Cette analyse doit considérer toutes les composantes du système de transport et traiter les différentes options possibles afin d'évaluer les impacts.

L'analyse systémique se sert d'instruments méthodologiques tels que les modèles. Plusieurs catégories de modèles existent dont ceux utilisés pour analyser le service, évaluer les ressources, simuler la demande ou prédire les changements à long et à court terme dans les systèmes de transport et d'activité. Il faut cependant veiller à ce que le modèle soit valide et probant.

Le sous-système de transport urbain des passagers se distingue par son caractère spatial, mais aussi par le motif des déplacements, la distribution temporelle des déplacements et le niveau de détail approprié pour mener une analyse systémique.

Les interactions entre les systèmes de transport et d'activité peuvent être modélisées en adoptant le modèle micro-économique. Ainsi, le système de transport est représenté par une offre de transport, le système d'activité par une demande, et les interactions par des situations d'équilibres à court et à long terme.

Une gestion du système de transport basée sur une allocation optimale des ressources qui maximisera le surplus social collectif conduit parfois à une distribution inéquitable des bénéfices et des ressources du système sur les différents groupes de la société et entre les différentes entités géopolitiques impliquées. Le chapitre qui suit pose la problématique de redistribution, explique ses origines et présente les implications de la contradiction entre les principes d'équité et d'efficacité sur le système de transport.

CHAPITRE 2 :

EFFETS REDISTRIBUTIFS ET ENJEUX SOCIO-ÉCONOMIQUES DU SYSTÈME DE TRANSPORT

L'amélioration de la mobilité grâce au système de transport permet l'accès aux opportunités et par conséquent la stimulation des activités socio-économiques. Cependant, les groupes de la société ne bénéficient pas de la même façon et aux mêmes proportions du système de transport. La quête d'une allocation optimale des ressources basée sur la maximisation du bien-être social est souvent en contradiction avec des principes de justice ou d'équité.

Il faut distinguer deux types d'équité quand il s'agit de traiter des problèmes de transport. D'une part, il y a l'équité sociale qui trouve ses fondements dans la redistribution des revenus entre les groupes de la société. Par exemple, le système de transport peut être efficace en augmentant le bien-être de la société, mais il peut en même temps avoir des effets inverses sur les groupes les moins favorisés. Ces derniers, étant les plus vulnérables aux risques, peuvent dans certains cas être victimes des impacts négatifs des transports sur l'environnement. D'autre part, il y a une équité spatiale ou territoriale qui a plutôt trait au caractère géopolitique de la fourniture et de l'usage du système de transport. Il s'agit de la redistribution des coûts et des bénéfices à l'aide de mécanismes de compensations réciproques entre les entités géopolitiques, les juridictions et les territoires qui fournissent une part du système de transport et ceux qui l'utilisent.

Le défi lié à l'analyse des effets redistributifs du système de transport est donc le résultat de la contradiction entre les principes d'équité et d'efficacité. Cette contradiction soulève la problématique d'une tarification équitable et efficace du système de transport. Cependant, entre équité et efficacité, les changements récents dans la société font naître

d'autres préoccupations qui peuvent être sommairement résumées dans le concept du transport durable.

Ce chapitre commence donc par introduire la problématique des effets redistributifs du système de transport, et notamment les principes d'équité, d'efficacité et la théorie de la justice. Ensuite, il présente quelques méthodes théoriques et pratiques qui ont été proposées ou utilisées pour tarifer l'utilisation du système de transport. Enfin, ce chapitre introduit sommairement le concept du transport durable.

2.1 Les effets redistributifs du système de transport

Dans la plupart des cas, le système de transport affecte une population non homogène et des entités géopolitiques différentes. C'est pour cette raison qu'il est important d'analyser la distribution et l'incidence finale des coûts et des bénéfices entre les différents groupes de population affectés et entre les différentes entités géopolitiques impliquées.

Les effets redistributifs d'un système ou d'un sous-système de transport concernent les impacts sur l'équilibre économique général final et les caractéristiques des incidences finales sur la qualité de vie en travers les différents groupes de la société et entre les différentes entités géopolitiques. Ces effets redistributifs traduisent les impacts d'un changement dans le système de transport sur des groupes de la population comme, par exemple, les groupes défavorisés à faible revenu. Il est aussi pertinent d'analyser les effets redistributifs sur des entités géopolitiques impliquées dans le système de transport. Ces deux aspects sont issus des préoccupations d'équité et d'efficacité d'allocation des ressources.

2.1.1 Le principe d'équité

L'évocation de l'efficacité économique ou l'allocation optimale des ressources est souvent liée à l'évocation du principe d'équité sociale. Ceci est d'autant vrai que le flou qui accompagne ces deux notions laisse un champ d'action libre pour les politiques et les décideurs pour montrer leurs performances démagogiques.

En dehors de tout discours démagogique, la politique sociale de l'état considère que l'équité est un des principaux buts du système de transport. Le principe d'équité fait référence au désir éthique et moral de distribuer les bénéfices et les coûts du système de transport parmi les différents groupes de la société. Il faut cependant distinguer deux aspects d'équité :

- ◆ L'équité **horizontale** qui concerne le traitement équitable et impartial des individus vivant dans des circonstances similaires. Ceci veut aussi dire l'impartialité dans l'allocation des coûts et des bénéfices entre des groupes ayant des richesses, des ressources, des besoins et des moyens comparables; et
- ◆ L'équité **verticale** qui concerne le traitement d'individus ou de classes sociales dissemblables. La distribution des bénéfices et des coûts est fonction des besoins et des moyens des individus. L'équité verticale implique que le système de transport doit fournir le plus grand bénéfice aux groupes défavorisés compensant ainsi une **injustice** (inéquité) sociale. Les groupes à faible revenu, les personnes âgées et les personnes à mobilité réduite sont des exemples de groupes défavorisés.

Ces deux aspects du principe d'équité sont souvent en conflit avec le principe d'efficacité, ce qui laisse le champ libre aux interprétations par les acteurs du système de transport.

2.1.2 Efficacité et efficience

La performance d'un système et des interventions qu'il subit est évaluée à travers deux notions : l'efficience et l'efficacité. L'efficience porte sur la qualité des outputs d'une

intervention en regard des coûts, ressources et délais. C'est aussi le résultat obtenu en regard des ressources et moyens mis en œuvre pour la production des outputs désirés. L'efficacité porte quant à elle sur le degré d'atteinte des objectifs et buts visés par le projet ou l'intervention en général. Souvent confondues, les notions d'efficience et d'efficacité sont par définition valides dans le cadre des hypothèses subjectives qui les supportent.

Quant à l'efficacité économique, elle concerne l'allocation optimale des ressources en vue de maximiser les bénéfices totaux de la société. Il s'agit donc dans le cas des transports de maximiser une fonction d'utilité collective. Ce principe d'efficacité trouve ses fondements dans une théorie utilitariste. La vérification de l'efficacité économique se fait souvent à l'aide d'analyse bénéfices-coûts.

Il faut cependant noter que le critère d'efficacité peut être atteint au détriment d'une injustice redistributive qui fait que les groupes favorisés sont avantagés, et les groupes défavorisés voient leur bien-être diminuer.

2.1.3 Les théories de la justice – la théorie de Rawls

Selon Khisty (1996), une théorie de la justice est un moyen pour développer les procédures de prise de décision. Il cite les six théories de la justice suivantes:

- ◆ La partition égale : cette théorie veut que les bénéfices et les coûts soient distribués d'une manière égale à tous les groupes de la société. Elle fait l'analogie avec le suffrage universel où tous les individus ont le même droit à un vote égal.
- ◆ La distribution utilitariste : selon cette théorie, une décision est juste en proportion avec sa tendance à augmenter le bonheur humain total.
- ◆ La distribution maximisant la moyenne du bénéfice net avec un minimum assuré : cette théorie maximise la moyenne du bénéfice net de la société en assurant qu'un

Le principe de différence significative que des inégalités sont justes dans la mesure où elles pluôt la somme totale des variations de surplus (Bonnafous et al., 1999).

Maximin. Il faut noter que ce dernier est différent du critère d'efficacité qui maximise surplus minimum. Pour cette raison, il est appelé par les économistes le principe du Autrement dit, le principe de différence correspond à une maximisation de la variation du qui conduirait à une augmentation des revenus des plus pauvres est souhaitable. bénéficient aux membres les défavorisés de la société. Pour Rawls, un changement Le principe de différence significative que des inégalités sont justes dans la mesure où elles

des groupes défavorisés.

distribués d'une manière uniforme, sauf si une distribution inéquitable était à l'avantage d'égalité des chances). Les deux principes de Rawls exigent que les bénéfices soient attachés à des positions et des fonctions ouvertes à tous (consistant avec le principe soient à l'avantage du plus défavorisé (consistant avec le principe de différence), et les inégalités sociales et économiques doivent être organisées de façon à ce qu'elles libérés de base compatibles avec un système identique de libertés pour les autres; et (2) Rawls (1971, 1999) est rendu célèbre par sa théorie de justice qui repose sur les deux principes suivants : (1) chaque individu a un droit égal au système le plus étendu de

expliquée un peu plus en détails dans ce qui suit.

- ♦ La théorie de la justice de Rawls : cette théorie est la plus importante. Elle est économique.
- ♦ L'égalitarisme : ce principe considère que tous les genres sont égaux. Les bénéfices doivent donc être répartis d'une façon à réduire toute inégalité sociale ou maximisée, et les bénéfices sont maintenus à l'intérieur d'un intervalle évitant ainsi bénéfices : selon cette théorie, la moyenne du bénéfice net de la société est une grande disparité.
- ♦ La distribution maximisant la moyenne du bénéfice net avec un intervalle de bénéfices : certains groupes, défavorisés, reçoivent au moins un minimum de certains groupes, défavorisés, reçoivent au moins un minimum de

Rawls fonde sa théorie sur l'idée du **voile de l'ignorance** qui suppose une absence complète d'information chez le citoyen. Ce dernier ne sait donc ni ce qu'il sera dans le futur, ni quelle sera sa position sociale. Cette hypothèse veut que l'individu soit égoïste, rationnel et averse au risque. Ces trois caractéristiques expliquent la logique derrière le principe du Maximin.

2.1.4 Les scénarios des effets redistributifs

Si un changement est effectué dans un système de transport dont la distribution des bénéficiaires est parfaitement connue, il est possible de distinguer les cinq scénarios d'effets redistributifs suivants (Gannon et al. 1997) qui sont empruntés au vocabulaire fiscal :

- ◆ Scénario neutre ou proportionnel: le changement dans le système de transport bénéficie aux différents groupes de la population d'une manière proportionnelle, et la distribution des bénéfices et des coûts après ce changement n'est pas différente d'une manière significative de celle avant le changement.
- ◆ Scénario relativement régressif: tous les groupes de la population bénéficient du changement en terme absolu. Cependant, le changement bénéficie aux groupes favorisés plus que les groupes défavorisés. Lorsqu'il est question du revenu par exemple, la distribution des revenus après le changement est relativement pire que la situation avant le changement.
- ◆ Scénario absolument régressif: le changement bénéficie aux classes favorisées mais empire la situation des classes défavorisées en valeur absolue.
- ◆ Scénario relativement progressif: tous les groupes bénéficient du changement en terme absolu. Toutefois, le changement bénéficie aux groupes défavorisés plus que les groupes favorisés. La distribution des revenus, par exemple, est relativement améliorée après le changement.

- Scénario absolument progressif: dans ce cas, le changement du système de transport bénéficie aux groupes défavorisés mais rend la situation des groupes favorisés pire que ce qu'il y avait avant le changement.

A ces cinq scénarios, il est possible d'ajouter un autre dit rawlsien d'après le principe de différence de Rawls. Il correspond au cas dans lequel le changement bénéficie principalement aux groupes défavorisés.

Les cinq scénarios typiques sont illustrés à la Figure 2.1 inspirée de Gannon et al. (1997) où les axes x et y représentent les pourcentages des gains par rapport à la situation de référence. La première bissectrice représente le scénario neutre ou proportionnel.

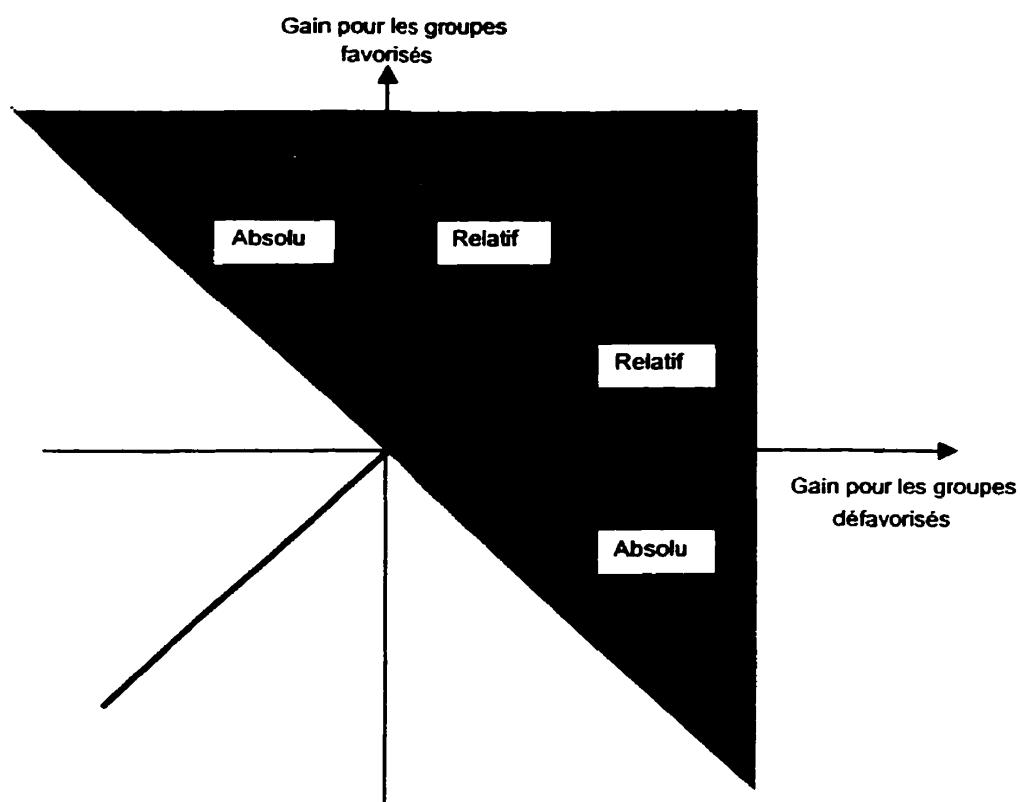


Figure 2.1 : Scénarios des effets redistributifs

2.1.5 Équité et efficacité

Dans la plupart des cas, le principe d'équité est en conflit direct avec celui de l'efficacité. Le décideur dans le domaine des transports doit donc trouver un terrain d'entente ou un compromis pour respecter à la fois les deux principes. Ce processus est très subjectif et le décideur a une infinité de choix devant lui. Son choix dépend donc ou bien d'autres impératifs ou de son degré de militantisme. Quant au planificateur, son rôle est d'objectiver la définition de cet espace de choix infinis et des enjeux qui les accompagnent.

En considérant un indicateur d'efficacité quelconque tel que la valeur actualisée nette des bénéfices après une analyse coûts-avantages, la Figure 2.2 montre comment l'efficacité et l'équité peuvent entrer en conflit et comment dans bien des cas, il faut faire des compromis pour sélectionner une variante qui soit à la fois efficace et équitable. Dans cette figure, cinq variantes A, B, C, D et E sont présentes. Il est admis, mais peut être réfutable, que les variantes C, D et E sont à rejeter, car au moins un des deux critères d'équité et d'efficacité n'est pas respecté. Le choix doit donc se faire entre les variantes A et B. En clarifiant les enjeux relatifs à ces dernières variantes, le planificateur fournit au décideur d'autres moyens pour choisir la variante adéquate.

Le principe d'efficacité est issue de la théorie utilitariste et correspond donc à une maximisation de l'utilité collective. Cette dernière est l'agrégation des variations des surplus individuels. La maximisation de bien-être social peut selon cette théorie bénéficier indifféremment à n'importe quel individu. L'équité repose pour sa part sur la redistribution juste des bénéfices et des coûts. Elle s'intéresse donc aux utilités individuelles. Dans sa version rawlsienne, la redistribution juste doit se faire en maximisant le bien-être minimal. Il est clair que les contraintes d'efficacité et d'équité ne peuvent mener au même résultat que dans des cas assez rares.

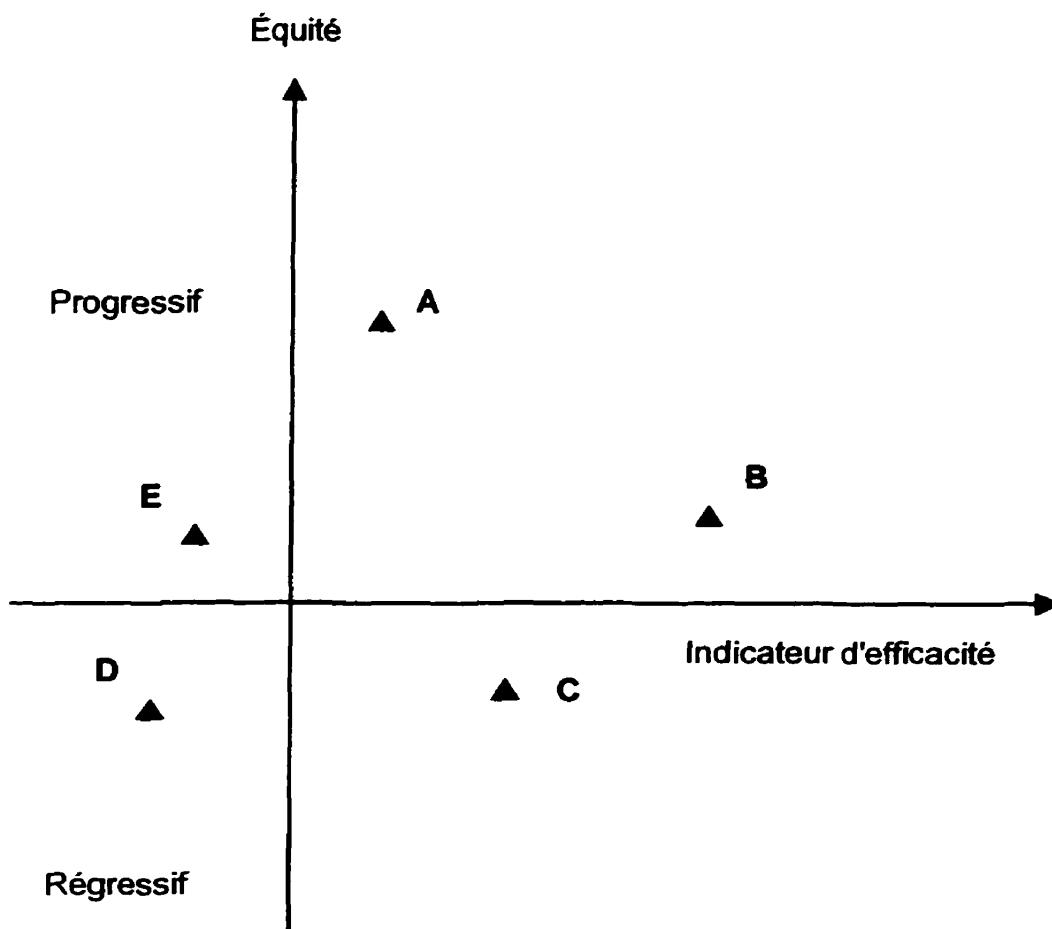


Figure 2.2 : Problématique d'équité et d'efficacité

2.1.6 Les effets redistributifs du système de transport

Les pouvoirs publics au niveau central, régional ou local exercent un contrôle direct ou indirect sur le système de transport résultant en des redistributions géographiques et sociales des ressources. En effet, dans le cadre du mécanisme d'allocation optimale des ressources, une des principales interventions de ces pouvoirs concerne la collecte de la redevance d'usage et le prélèvement des taxes sur le transport d'une part, et le versement de subventions et le financement du développement du système d'autre part. Ces interventions se traduisent par des transferts économiques et financiers qui

conduisent à des modifications dans la structure géographique du système d'activité et dans les revenus réels des différentes catégories de la population. Deux situations se dégagent donc. D'un côté, il s'agit d'une redistribution des coûts et des bénéfices entre des entités géopolitiques; de l'autre, il s'agit d'une redistribution de revenus entre différentes catégories de la population. Dans le premier cas, il est loisible de parler d'**équité territoriale ou spatiale**, dans le second, d'**équité sociale**.

Toujours dans le contexte du système de transport, l'évaluation des effets redistributifs consiste principalement à analyser la redistribution des coûts et des bénéfices associés à l'utilisation de l'infrastructure et de leur assignation aux différentes catégories d'usagers et de non-usagers. La mesure de la répartition de ces coûts et bénéfices permet d'évaluer l'équité du système d'allocation des ressources utilisé.

Plusieurs approches d'allocation des coûts existent. L'approche des coûts occasionnés alloue les coûts aux usagers selon les coûts qu'ils occasionnent à l'infrastructure. L'approche proportionnelle alloue les coûts proportionnellement aux bénéfices que réalisent les usagers en utilisant le système de transport. Enfin, dans l'approche du coût marginal, l'usager est requis de payer l'équivalent du coût marginal de l'environnement, de la congestion, de l'infrastructure et d'autres coûts associés à l'utilisation du système de transport. En somme, une multitude d'approches existe, et chaque approche répond à des stratégies différentes d'allocation. Dans le sous-paragraphe qui suit, certaines approches théoriques et pratiques d'allocation des ressources sont exposées.

2.1.7 Les principes de tarification des transports

Il n'existe pas une méthode unique de tarification des transports. En effet, il y a plutôt des stratégies de tarification optimale qui permettent d'atteindre certains objectifs et de satisfaire certaines conditions. Différentes idéologies sont souvent défendues dans la littérature pour justifier un mécanisme de tarification ou un autre. Cependant, si le principal objectif de la tarification des transports est d'allouer les ressources et d'assurer

un financement complet ou partiel du système de transport, d'autres objectifs peuvent aussi être pris en considération tels que l'orientation des choix des usagers ou la redistribution des ressources. Dans ce contexte, les objectifs à atteindre peuvent consister à satisfaire un certain niveau de service comme ils peuvent être la maximisation du bien-être du producteur, du consommateur ou de la société. Selon les objectifs de tarification considérés, il est possible de distinguer plusieurs grandes catégories de principes de tarification (Quinet, 1990). Les plus importantes sont: 1) la tarification au coût marginal privé; 2) la tarification au coût marginal social; et 3) la tarification à l'équilibre budgétaire.

2.1.7.1 La tarification au coût marginal de production

L'objectif traditionnel de tarification d'un bien est de maximiser le profit du producteur. Dans un environnement parfaitement concurrentiel, cet objectif implique que le prix soit égal au coût marginal de production. En appliquant ce raisonnement au système de transport, le système de tarification consiste à fixer le prix d'usage au coût marginal à court terme de la fourniture du bien de transport. Il s'agit donc du coût marginal privé senti par l'usager du bien de transport.

Cette stratégie de tarification ne prend pas en compte les effets externes du système de transport. C'est pour cette raison qu'une autre stratégie qui prend en compte le coût induit à la société à cause de l'utilisation du système de transport s'impose.

2.1.7.2 La tarification au coût marginal social

Le système de tarification au coût marginal social prend en compte, dans certaines mesures, les externalités du système de transport. Il s'agit de faire supporter à chaque usager l'ensemble des coûts marginaux qu'il occasionne. Le mécanisme de cette stratégie de tarification se traduit par l'internalisation des effets externes tels que la congestion, les accidents et la pollution: c'est le principe du pollueur payeur.

Avec le système de tarification au coût marginal privé ou social, appelé aussi tarification à l'**optimum de premier rang**, la gestion des infrastructures est optimale, mais les dépenses d'investissement ne sont pas nécessairement récupérées. En effet, vu que ce système ne prend pas en considération les dépenses passées d'investissement, les recettes tarifaires peuvent dans certains cas ne pas couvrir les dépenses d'investissement. Ce résultat est dû à l'existence de rendements moyens croissants dans le système de transport. Cette caractéristique implique que la tarification au coût marginal induit nécessairement un déficit d'exploitation et n'assure pas l'équilibre budgétaire. La tarification dite à l'équilibre budgétaire est une tentative de remédier à ce problème.

2.1.7.3 La tarification à l'équilibre budgétaire

Dans certains cas, l'adoption de la tarification au coût marginal peut induire des pertes financières. Ces pertes sont surtout dues aux coûts fixes et aux rendements moyens croissants qui caractérisent généralement le système de transport. Pour résoudre ce problème, il faut ou bien avoir recours à des subventions ou changer le système de tarification. Le système de tarification à l'équilibre budgétaire est construit de telle façon que les usagers payent l'ensemble des dépenses d'investissement et de charges courantes de gestion, d'entretien et d'opération. En pratique, il s'agit de fixer la redevance d'usage du système de transport au coût marginal augmenté d'un coût assurant l'équilibre budgétaire. Cette adaptation de l'optimum de premier rang pour tenir compte des autres contraintes techniques ou institutionnelles aboutit à une tarification de Ramsey¹ ou de l'optimum du second rang. Cette stratégie tient compte des différentes élasticités de la demande par rapport aux prix.

¹ Ramsey (1927), "A contribution to the theory of taxation", Economic Journal.

2.1.8 **Effets redistributifs d'un réseau routier**

Dans le cas particulier d'un réseau routier, plusieurs mécanismes d'allocation des ressources et de redistribution sont utilisés, mais, dans la plupart des cas, ils sont inefficaces à cause de la difficulté de mettre en pratique les principes théoriques. Reste à savoir que pour analyser les effets redistributifs associés à l'usage d'un réseau routier, il faut prendre en compte les trois dimensions: spatiale, temporelle et sociale, en plus d'une dimension réseau.

2.1.8.1 **Allocation des ressources pour un réseau routier**

Le système d'allocation des ressources pour le transport routier est basé sur plusieurs approches. Il regroupe tous ou quelques-uns des mécanismes suivants: une taxe sur les produits pétroliers correspondant à une redevance d'usage de l'infrastructure, une taxe à l'essieu, les vignettes annuelles, quelques taxes à l'achat des véhicules et à l'enregistrement, des taxes sur le permis de conduire, les péages aux parkings en ville et les péages routiers directs. Il est évident que chacun de ces mécanismes répond à un objectif différent. Par ailleurs, certaines contraintes peuvent mettre en question quelques-uns de ces mécanismes. Dans certains cas, le système fiscal général adopte le principe de l'unicité de la caisse et les taxes collectées se voient perdues dans le budget général de l'état. Il faut noter qu'une partie des taxes liées à l'utilisation du système de transport routier doit théoriquement être considérée comme redevance d'usage de l'infrastructure et doit aller directement au budget des transports routiers.

Quant à l'évaluation des coûts sociaux, elle est souvent délicate à entreprendre. La théorie économique fournit des recommandations à propos de l'évaluation et la tarification des externalités, mais ne sont point mises en œuvre dans la pratique par manque d'outils et de méthodes d'objectivation de la problématique. En ce qui concerne la congestion par exemple, l'adoption d'un système de péage routier direct et dynamique qui prend en compte les conditions de la circulation sur la route ainsi que la période du déplacement permet une tarification proche des résultats théoriques.

Cependant, il est toujours difficile d'instaurer un système de tarification de l'infrastructure routière à cause de la topologie fortement maillée du réseau routier. Dans la plupart des pays, un système de taxation du carburant est pratiqué à la source. Une simple revue de ce système permet de constater qu'il sous-entend une uniformité totale des déplacements automobiles dans l'espace et dans le temps et qu'il aboutit à une **péréquation** des redevances d'usage de l'infrastructure. Les rares exceptions qui pratiquent une tarification pouvant varier selon la période ou le lieu du déplacement concernent quelques systèmes de péage sur les autoroutes. Ce système profite du caractère linéaire de ces infrastructures ce qui réduit considérablement les coûts associés à l'opération et aux attentes aux postes de péage.

2.1.8.2 Caractéristiques d'une analyse des effets redistributifs d'un réseau routier

Afin d'éviter la **péréquation** totale des redevances d'usage de l'infrastructure, dans l'espace et dans le temps, une analyse fine des effets redistributifs du système est nécessaire. Cette analyse doit tenir compte d'au moins quatre dimensions: la dimension spatiale, la dimension temporelle, la dimension réseau et la dimension sociale.

Le caractère spatial du système de transport est un élément majeur pour la mesure des effets redistributifs d'un réseau routier. En effet, l'offre et la demande de transport sont caractérisées par des attributs spatiaux qui peuvent être identifiés par leurs coordonnées x et y dans un référentiel arbitrairement choisi. D'une part, le réseau routier est caractérisé par sa géométrie et sa topologie qui ne peuvent être distinguées d'une appartenance à un territoire donné comme, par exemple, une entité géopolitique. Dans bien des cas, cette entité géopolitique peut participer au financement et à la provision de l'infrastructure. Elle peut à la fois subir d'autres coûts associés à l'existence du réseau sur son territoire, tels que les coûts des nuisances; et bénéficier du réseau, puisqu'il la rend plus accessible. D'autre part, la Figure 2.3 illustre comment la demande de transport est caractérisée par son aspect territorial aussi. Toute personne qui se déplace

est liée à un territoire ou une entité géopolitique par un lien de résidence. Le territoire de résidence bénéficie donc directement ou indirectement du déplacement qui s'effectue éventuellement sur le territoire d'autres entités géopolitiques. Ce même déplacement peut comporter une origine, des correspondances, des transferts et une destination qui s'effectuent sur d'autres territoires appartenant à d'autres juridictions géopolitiques. Ces entités bénéficient du déplacement et peuvent subir des coûts liés au déplacement. Par ailleurs, Chapleau (1995b) souligne que parfois le phénomène d'étalement urbain associé à une dédensification du centre peut être interprété comme une sorte d'«évasion socio-fiscale» face au fardeau du système de transport. La question qui se pose donc est comment distribuer les coûts et les bénéfices globaux du système de transport routier entre les différentes entités territoriales et juridictions géopolitiques. Autrement dit, comment respecter le principe d'équité territoriale.

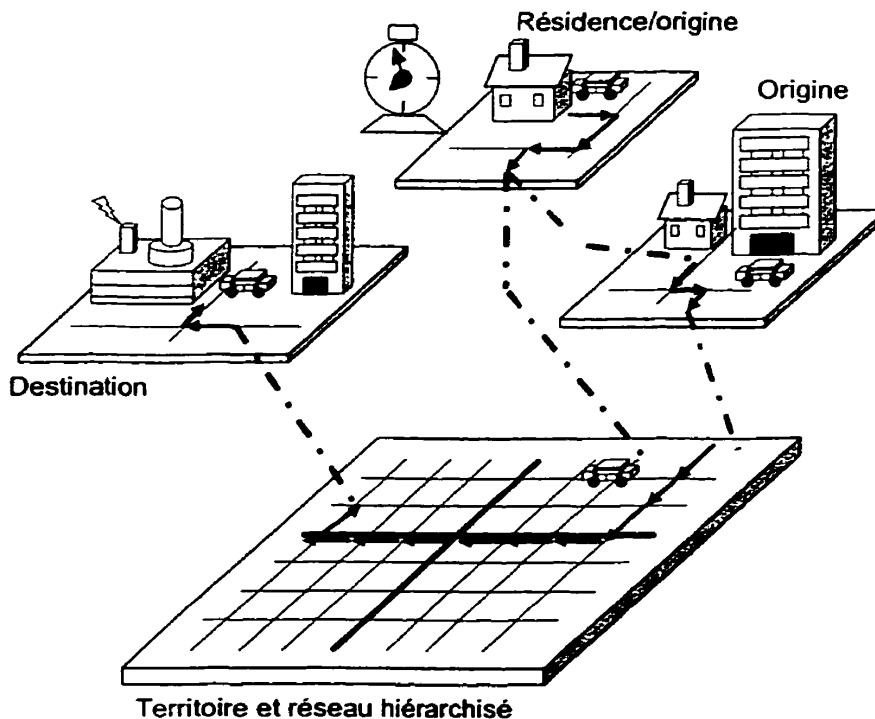


Figure 2.3 : Aspect territorial et juridictionnel du réseau et caractéristiques spatio-temporelles du déplacement

Au plan temporel, il faut prendre en compte la période où le déplacement est effectué. En effet, les coûts et les bénéfices associés au déplacement peuvent varier considérablement selon la période de la journée ou de l'année. Comme chaque usager doit supporter le coût réel de son utilisation de l'infrastructure, une connaissance assez fine de la distribution temporelle des déplacements est indispensable.

L'utilisation du réseau routier doit être connue selon la hiérarchie du réseau. Ce dernier est souvent hiérarchisé en classes de routes qui dépendent chacune dans sa gestion et son financement d'une juridiction différente. Le réseau autoroutier, par exemple, peut dépendre des autorités provinciales ou centrales alors que les artères ou les voies d'accès peuvent dépendre des autorités locales. Cette distinction par classe de route est très importante pour l'estimation des flux financiers entre ces différentes juridictions.

Au plan social, le respect des principes de l'équité sociale entre les différents groupes d'usagers du système de transport routier exige une connaissance fine des usagers. Ceci se traduit d'une part par des classes d'usagers selon le type de véhicule par exemple, mais surtout selon des attributs sociaux tels que le revenu, l'âge ou le sexe. Il faut également être capable, lors de l'analyse, de retracer les itinéraires des usagers du réseau routier afin de retrouver leurs attributs socio-économiques.

2.2 Effets redistributifs et transport durable

L'analyse des effets redistributifs du système de transport n'est pas seulement astreinte à répondre aux exigences d'une analyse systémique valide, mais aussi à des enjeux encore plus considérables qui font partie du concept de transport durable. En effet, les acteurs du système de transport sont souvent structurés en groupes valorisant chacun des idéologies et des enjeux spécifiques. Cette diversité systémique et organisationnelle est une composante essentielle du système de transport qu'il ne faut pas oublier. Une schématisation simplifiée consiste à catégoriser les idéologies, les enjeux et les intérêts

des acteurs du système de transport en trois pôles différents: un pôle économique, un pôle social et un pôle écologique. Ces trois pôles forment les sommets d'un triangle d'idéologies tel que représenté par la Figure 2.4. Le centre du triangle correspond aux acteurs qui partagent certaines conceptions, ceux qui sont prêts à faire des concessions et des compromis, et enfin ceux qui se trouvent confus. Partant de ces constats, la durabilité du système de transport est définie comme la satisfaction des trois préoccupations principales économique, écologique et sociale. Dans un contexte de durabilité, le système de transport doit assurer une amélioration continue de ses moyens matériels et de son environnement économique et financier intrinsèque. Le système de transport doit aussi générer une amélioration maximale du cadre et de la qualité de vie de la société. Enfin, les avantages et les bénéfices du système de transport doivent être partagés équitablement entre les différentes composantes et classes de la société. Cette dernière condition de durabilité est au cœur de toute analyse d'effets redistributifs.

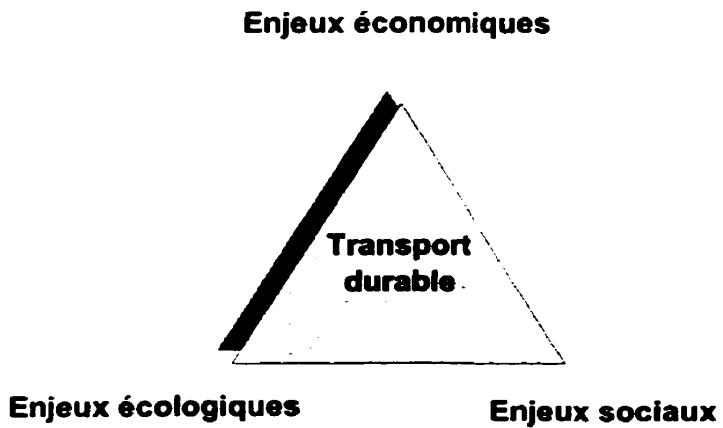


Figure 2.4 : Triangle idéologique du transport durable

2.3 Conclusion

Dans le cadre d'un transport durable, l'utilisation du seul critère d'efficacité basé sur la maximisation du bien-être collectif pour juger la performance du système de transport n'est pas suffisante. Il faut en plus analyser comment les coûts et les avantages du système sont distribués à travers les différentes classes de la société, d'une part, et entre les différentes entités géopolitiques, d'autre part. Autrement dit, il faut réaliser une analyse des effets redistributifs associés au système de transport. Cette analyse est supportée par les principes de justice, et plus particulièrement par les principes d'équité sociale et territoriale.

Ce chapitre a donc présenté la problématique des effets redistributifs à travers une explication des principes d'équité, d'efficacité et de justice. Il a ensuite exposé différents mécanismes d'allocation des ressources et de redistribution pour les réseaux routiers. Ce chapitre a enfin mis l'accent sur les caractéristiques de la problématique de redistribution pour ces réseaux.

Quatre composantes fondamentales sont à considérer lors d'une analyse des effets redistributifs d'un système de transport et d'un réseau routier en particulier. Il s'agit des dimensions spatio-territoriale, temporelle et sociale des déplacements en plus d'une dimension qui s'intéresse au réseau même de transport.

L'analyse des effets redistributifs associés à l'usage d'un réseau routier doit s'inscrire dans une démarche systémique. Pour ce faire, des modèles d'aide à l'analyse sont donc nécessaires. Le chapitre subséquent présente le modèle séquentiel classique largement utilisé par les planificateurs des transports routiers et montre comment un tel modèle est incapable de constituer un cadre de modélisation pour l'analyse des effets redistributifs. Les autres chapitres qui suivent essayent de chercher d'autres approches de modélisation plus appropriées pour mener une analyse valide des effets redistributifs d'un réseau routier urbain.

CHAPITRE 3 :

LIMITES DES MODÈLES SÉQUENTIELS CLASSIQUES

Le développement des systèmes de transport urbain au cours des trente dernières années a été accompagné par un développement considérable de modèles de demande. L'approche séquentielle agrégée était parmi les premières tentatives de modélisation des transports urbains. Bien que ces modèles séquentiels soient largement utilisés par les planificateurs, ils souffrent de limitations majeures au niveau méthodologique qui les rendent incapables de fournir un cadre de modélisation valide pour l'analyse des effets redistributifs du système de transport urbain.

La première partie de ce chapitre introduit la procédure séquentielle classique. Elle fait état des trois premières étapes de modélisation à savoir la génération des déplacements, la distribution des déplacements et le choix modal. L'affectation des déplacements, la quatrième étape de modélisation, est brièvement décrite dans cette partie.

En deuxième partie du présent chapitre, l'affectation des déplacements est expliquée et trois méthodes sont examinées. Il s'agit de l'affectation tout-ou-rien, l'affectation d'équilibre et l'affectation probabiliste. L'emphase est particulièrement mise sur le modèle d'équilibre.

Enfin, la troisième partie explique les limitations de la modélisation classique quant à l'analyse des effets redistributifs et propose d'adopter une approche comportementale basée sur des informations et des observations individuelles plutôt qu'une modélisation synthétique.

3.1 La procédure séquentielle classique

La procédure séquentielle classique dont l'origine remonte à **The Urban Transportation Model System (UTMS)** introduit pendant les années soixante aux États-Unis est un des modèles les plus utilisés pour des fins de planification des transports urbains.

Dans cette approche de modélisation, les individus sont groupés en classes correspondant à une partition de la région étudiée en zones, et la fonction agrégée de la demande de transport correspondant à une zone donnée est fonction des caractéristiques du système d'activité et des variables du service. La fonction de la demande est séparée en quatre sous-modèles qui correspondent à une modélisation en quatre étapes comme illustrées à la Figure 3.1 : (1) la génération des déplacements; (2) la distribution des déplacements; (3) le choix modal; et (4) l'affectation des déplacements.

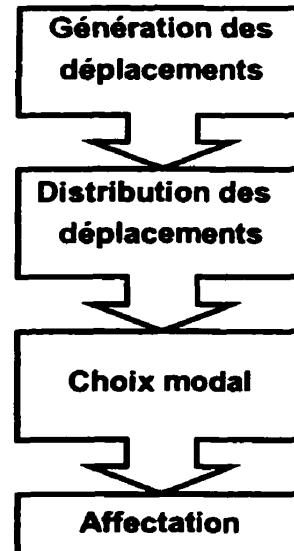


Figure 3.1 : Les étapes de la procédure séquentielle classique

3.1.1 Génération des déplacements

La génération des déplacements est une méthode dont l'objectif est d'estimer les extrémités de déplacements générées par un ménage ou par une zone. L'analyse de la génération des déplacements est souvent divisée en deux parties. La première partie concerne la **production** des déplacements et consiste à estimer le nombre de déplacements réalisés par un individu, un ménage ou un groupe de ménages agrégés selon leurs zones de résidence par exemple. La deuxième partie de l'analyse de la génération concerne l'**attraction** des déplacements et consiste à estimer le nombre de déplacements qui ont pour destination une zone donnée.

La génération des déplacements est fonction des caractéristiques socio-économiques des zones d'origine et de destination. En effet, dans ce modèle, le nombre de déplacements quittant une zone i est modélisé par une fonction des caractéristiques socio-économiques de cette zone. Le revenu par ménage et le niveau de motorisation constituent deux facteurs importants qui influencent la production des déplacements. A ces deux facteurs s'ajoutent d'autres qui leur sont reliés d'une manière ou d'une autre. Il s'agit de la taille des ménages, du nombre de travailleurs par ménage, de la densité résidentielle et de la distance qui sépare l'origine du déplacement du centre-ville. Quant au nombre des déplacements qui ont pour destination une zone j , il est généralement fonction des caractéristiques de cette zone telles que le nombre d'emplois ou l'utilisation du sol. Le niveau d'emploi de la zone est sans doute un facteur déterminant. A cela s'ajoutent d'autres facteurs tels que le niveau des espaces commerciaux et le niveau d'accessibilité. En somme, la génération des déplacements dans la procédure séquentielle est fonction des caractéristiques socio-économiques intrinsèques aux zones d'origine et de destination. Elle n'inclut nullement les variables de transport et sous-entend que la demande est inélastique par rapport à l'offre supposant ainsi que la modélisation représente l'équilibre entre l'offre et la demande (Domencich et al., 1975).

Plusieurs modèles algébriques sont utilisés pour modéliser la génération des déplacements. Les relations entre les différents facteurs socio-économiques et le

nombre de déplacements produits ou attirés par une zone donnée sont traditionnellement modélisées soit par des modèles de régressions linéaires soit par des modèles de classification.

3.1.2 Distribution des déplacements

L'analyse de la distribution des déplacements concerne les volumes de déplacements entre les origines et les destinations. La distribution des déplacements est décrite par une **matrice origine-destination** $T=[T_{ij}]$. Le terme générique T_{ij} représente le nombre de déplacements pendant une période de temps donnée entre une origine i et une destination j . Le modèle de distribution consiste donc à distribuer les déplacements, modélisés lors de l'étape de génération, entre les différentes origines et destinations afin d'estimer la matrice T .

Plusieurs modèles de distributions sont utilisés. Kanafani (1983) distingue trois catégories de modèles selon leurs fondements. La première catégorie est issue de la famille des modèles dits directs. Les volumes T_{ij} sont dérivés du modèle de demande de base pour maximiser une fonction d'utilité. La deuxième catégorie concerne les modèles de choix. Il s'agit de choisir sa destination en comparant les attributs des différentes alternatives qui répondent au but du voyageur. La troisième catégorie concerne les modèles physiques d'attraction spatiale. Cette dernière catégorie fait une analogie entre l'attraction spatiale des déplacements et les systèmes physiques. Cette même catégorie englobe trois types de modèles selon l'approche utilisée. Ainsi, faut-il distinguer l'approche de gravité, l'approche d'entropie, et l'approche de réseau. Toutefois, parmi toutes ces catégories et approches, le modèle de gravité est sans doute le plus utilisé dans les modèles séquentiels classiques. La modélisation typique du modèle de gravité consiste à estimer les volumes T_{ij} sous la forme :

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

Où :

O_i = le nombre total des déplacements produits dans la zone i .

D_j = le nombre total des déplacements attirés par la zone j .

f_{ij} = un facteur de friction.

Le facteur de friction est souvent une fonction inverse du coût du voyage, qui peut être la durée du déplacement, la distance ou le coût généralisé de transport entre les zones i et j . Si ce coût est noté c_{ij} , les formes communes du facteur de friction sont du type (Meyer et al., 1984) :

$$f_{ij} = c_{ij}^{-b}$$

$$f_{ij} = e^{-bc_{ij}}$$

où b est une constante.

Le facteur de friction f_{ij} peut aussi être une fonction implicite du coût c_{ij} . Ce facteur doit être calibré selon la région de l'étude. Un processus itératif d'équilibrage permet, d'une part, d'assurer que le nombre total de déplacements quittant une zone i est égal au nombre total de déplacements produits par cette zone; et, d'autre part, que le nombre total de déplacements entrant dans la zone j est égal au nombre total de déplacements attirés par cette même zone.

3.1.3 Le choix modal

Les modèles de choix modal sont utilisés pour estimer la part du marché de déplacements de chacun des modes de transport disponibles. Dans la procédure séquentielle classique, l'étape du choix modal peut se faire avant ou après l'étape de

distribution. Dans le cas où le choix modal serait effectué avant la distribution des déplacements, l'achalandage du transport en commun est supposé être fonction des variables socio-économiques. Toutefois, la modélisation du choix modal est souvent effectuée après la distribution des déplacements. Ceci permet d'inclure dans le modèle les caractéristiques du service telles que le temps du déplacement et son coût. En pratique, la modélisation se fait en utilisant des courbes de diversion.

3.1.4 L'affectation des déplacements

La dernière étape du modèle séquentiel est l'affectation des déplacements ou la prédiction des déplacements par route. Les modèles d'affectation peuvent être déterministes ou stochastiques comme ils peuvent prendre en compte les contraintes de capacité sur les liens ou non. Une étude plus détaillée des modèles d'affectation est réalisée dans le sous-chapitre qui suit.

3.2 Étude de l'affectation dans les modèles séquentiels

Comme il a été souligné, les modèles d'affectation utilisés dans l'approche séquentielle classique sont catégorisés selon qu'ils sont déterministes ou probabilistes ou selon qu'ils prennent en compte la capacité des liens ou non. Cette partie présente trois méthodes d'affectation. Il s'agit tout d'abord de l'affectation du chemin le plus court, dite aussi tout-ou-rien, qui ne tient pas compte de la capacité des liens, puis de l'affectation d'équilibre et enfin de l'affectation probabiliste.

3.2.1 L'affectation du chemin le plus court : Tout-Ou-Rien

Dans l'approche tout-ourien, le chemin le plus court, correspondant au temps de parcours minimum ou au coût généralisé minimum entre une origine *i* et une destination *j*,

est déterminé, et tous les déplacements entre cette origine et cette destination sont chargés sur ce chemin. Un chemin donné reçoit donc tous les flots entre une paire origine-destination ou ne reçoit rien. Dans le cas où le temps ou le coût généralisé minimum de déplacement entre i et j correspondrait à deux chemins distincts ou plus, les déplacements entre i et j sont répartis uniformément sur tous ces chemins.

Cette approche a l'avantage de demander peu de moyens de calculs et reflète ce que les usagers feraient en l'absence de contrainte de capacité et de congestion, mais elle souffre de plusieurs limitations. En effet, l'affectation peut être irréaliste dans le sens où quelques liens pourraient être chargés bien au-delà de leur capacité. L'approche tout-ou-rien reste néanmoins satisfaisante quand il s'agit d'un réseau de transport en commun ou de transport interurbain (Chapleau et al., 1990).

Plusieurs algorithmes sont utilisés pour réaliser une affectation tout-ou-rien. L'algorithme de Dijkstra semble être très bien adapté.

3.2.2 L'affectation d'équilibre

3.2.2.1 Les principes de Wardrop

Wardrop est rendu célèbre par les deux principes qu'il avait formulés dans une communication scientifique en 1952. Il a énoncé deux critères pour déterminer la distribution du trafic sur des chemins alternatifs reliant une origine et une destination (Wardrop, 1952) :

- 1) « Les temps de parcours sur tous les chemins effectivement empruntés sont égaux, et moindres que le temps qui serait observé par un quelconque véhicule sur tout autre chemin non utilisé » ; et
- 2) « Le temps moyen de parcours est minimum ».

Le premier critère correspond à une affectation **descriptive** du trafic (user-optimized). Le second critère correspond à une affectation **normative** du trafic (system-optimized). Wardrop avait déjà remarqué que le premier critère est le plus réaliste et correspond à ce qui se passe en pratique, alors que le deuxième critère est peu réaliste bien qu'il soit plus efficace du point de vue de la société, puisqu'il minimise le temps global des déplacements.

3.2.2.2 La formulation du problème d'affectation d'équilibre

Les techniques d'affectation d'équilibre partent du premier principe de Wardrop et considèrent que le coût de transport sur les liens d'un réseau dépend généralement des flots qui les traversent. Le problème consiste donc à trouver la distribution des volumes sur les liens et les coûts de transport associés dans la situation d'équilibre du système. La formulation qui suit est inspirée de Kanafani (1983).

Notation

Soit V_{ij} le flot du trafic entre deux points i et j d'un système de transport, où i appartient à un sous-ensemble I de l'ensemble des origines de déplacements, et j appartient à un sous-ensemble J de l'ensemble de toutes les destinations.

Pour un lien L , soit V_L le flot du trafic sur ce lien.

Le coût attribué au passage sur le lien L est représenté par une fonction $S_L(V_L)$ où S est un **coût moyen**.

Soit R_{ij} l'ensemble de tous les chemins connectant i à j .

Soit V_{ij}^r la part du flot du trafic entre i et j qui emprunte le chemin r , où r appartient à R_{ij} .

Les flots V_{ij} ainsi que les fonctions de coûts $S_L(V_L)$ sont supposés connus.

La conservation des flots V_{ij} entre les origines et les destinations exige que :

$$\sum_{r \in R_{ij}} V_{ij}^r = V_{ij} \quad \text{pour tout } i \text{ et } j \quad (3.1)$$

Si δ_r^L est la variable binaire qui prend la valeur 1 quand le lien L appartient au chemin r et la valeur 0 sinon, alors la formule 3.2 peut être dérivée.

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} V_{ij}^r \delta_r^L = V_L \quad (3.2)$$

Optimisation normative

L'optimisation normative correspond au cas du deuxième principe de Wardrop. Cette méthode d'affectation a pour but d'allouer les volumes entre les différents chemins et liens en minimisant le coût total du système sous les deux contraintes 3.1 et 3.2 et la contrainte de positivité des flots V_{ij}^r .

$$\text{Coût Total} = \sum_L V_L S_L(V_L) \quad (3.3)$$

Optimisation descriptive

L'optimisation descriptive correspond au premier principe de Wardrop. L'usager choisit un chemin dont le coût est inférieur ou égal à tout autre chemin réalisable, l'usager ne peut améliorer son choix en choisissant un autre chemin. Dans ce cas, l'équilibre est atteint lorsque les coûts moyens sur toutes les routes reliant une paire origine-destination sont égaux.

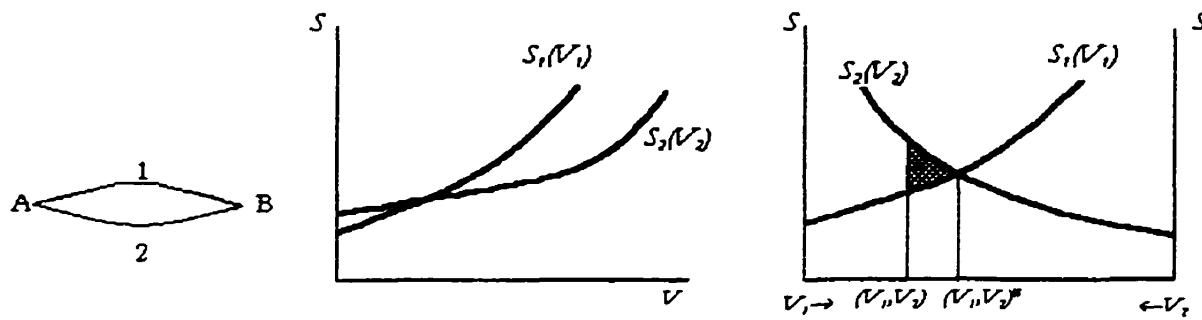


Figure 3.2 : Illustration de la situation d'équilibre (Kanafani, 1983)

En effet, la Figure 3.2 illustre le cas de deux points A et B reliés par deux routes 1 et 2. Une courbe d'offre $S_r(V_r)$ correspond à chacune de ces deux routes. Chaque route est composée d'un seul lien. Une demande V doit aller de A à B. Soient V_1 et V_2 les flots sur les routes 1 et 2, avec $V = V_1 + V_2$. Le premier principe de Wardrop postule que les flots sont répartis entre les deux routes de telle sorte qu'aucun usager ne peut changer son chemin sans augmenter son coût. L'équilibre est donc atteint lorsque les deux coûts sont égaux. En traçant les deux courbes d'offre sur le même graphe, en tenant compte du fait que $V = V_1 + V_2$, la situation d'équilibre correspond au cas où l'aire hachurée dans la Figure 3.2 devient nulle. Il s'agit donc de minimiser l'aire hachurée sous les courbes d'offre. Il n'est pas difficile d'étendre cette propriété pour le cas général, et le problème de l'affectation descriptive revient à résoudre le programme mathématique suivant:

$$\text{Minimiser} \sum_L \int_0^L S_L(x) dx \quad (3.4)$$

Sous les contraintes de l'équation (3.1), (3.2) et la non-négativité des volumes V_{ij}^r . Ce programme résulte en l'égalité des coûts.

Ce même programme, correspondant à l'affectation descriptive, peut s'appliquer au cas de l'affectation normative en remarquant que le coût total n'est autre que la somme des

intégrales des coûts marginaux. Ceci permet de conclure que l'équilibre dans le cas de l'affectation normative est atteint lorsque les coûts marginaux sont égaux.

Algorithme de résolution

Les algorithmes et techniques d'affectation d'équilibre utilisent un processus itératif pour converger vers une situation dans laquelle aucun voyageur ne peut améliorer son temps de déplacement en choisissant un autre chemin. À chaque itération, les volumes sur les liens sont calculés en tenant compte des capacités et du fait que les temps de parcours dépendent des volumes sur les liens. Par ailleurs, afin d'assurer la convergence du programme d'équilibre, les algorithmes exigent que les fonctions de coûts soient non décroissantes par rapport aux volumes.

L'algorithme commence par une itération 0 afin d'initialiser le programme. Il s'agit de trouver le chemin le plus court entre chaque paire origine-destination en se basant sur le coût dans le cas d'un écoulement libre sans congestion. Ensuite, la demande est assignée selon les chemins les plus courts ainsi calculés.

A l'itération i , l'algorithme suit une procédure en quatre étapes :

- ◆ Trouver le plus court chemin entre chaque paire origine-destination en se basant sur le coût correspondant au volume de l'étape $i-1$, soit $S_i(V_{L,i-1})$
- ◆ Affecter la demande aux plus courts chemins ainsi calculés ce qui produit des volumes intermédiaires $V'_{L,i}$
- ◆ Calculer la proportion λ_i des déplacements qui vont utiliser les nouveaux plus courts chemins
- ◆ Mettre à jour les volumes, soit : $V_{L,i} = (1-\lambda_i).V_{L,i-1} + \lambda_i.V'_{L,i}$

Deux problèmes se posent donc à savoir : la détermination du pas λ optimal et le critère d'arrêt ou de convergence. Pour le pas optimal, plusieurs méthodes sont appliquées, la plus utilisée consiste à trouver le pas qui minimise la fonction-objectif suivante :

$$\sum_L \int_{\nu_L}^{(1-\lambda)\nu_L + \lambda\nu'_L} S_L(x) dx$$

Ce programme est résolu en annulant le gradient par rapport à λ de la fonction-objectif. Quant au critère d'arrêt ou de convergence, plusieurs méthodes existent et la plus utilisée consiste à manipuler la différence entre le temps total de déplacement sur les chemins utilisés et celui sur les chemins les plus courts.

3.2.2.3 La fonction de performance d'un lien

La fonction de performance d'un lien est une modélisation de la fonction d'offre du lien exprimant ainsi une relation entre le niveau de trafic et le niveau de service. En l'absence de congestion, la fonction de performance est constante. Cependant, en cas de congestion, la modélisation de la fonction de performance devient plus compliquée.

Une approche dite statique est utilisée pour modéliser la fonction de performance d'un lien dans le cas d'un réseau routier. Elle consiste à trouver une relation entre trois variables fondamentales à savoir : le débit, la densité et la vitesse sur le lien. Cette approche fait l'hypothèse que, pour un lien donné, tous les déplacements qui l'empruntent parcourent une même distance sur ce lien. Par ailleurs, l'approche statique se distingue de l'approche dynamique en faisant l'hypothèse que les arrivées sont homogènes et que la vitesse est constante sur le lien. Cette dernière hypothèse est fondamentale pour assurer l'homogénéité des usagers du lien.

Pour mesurer le niveau d'offre du lien, trois variables peuvent être utilisées. La première est le nombre d'usagers N qui utilisent le lien pendant la période d'analyse telle que la l'heure de pointe par exemple. La deuxième variable est le débit F qui mesure le nombre

de véhicules homogènes qui passent par un point donné sur la route par unité de temps. Enfin, la troisième variable est la densité D qui représente le nombre d'usagers par unité d'espace de la route. L'espace total du lien peut être mesuré en considérant la longueur L du lien et le nombre de voies W .

Le niveau de service est exprimé en termes de vitesse S qui représente la distance parcourue par unité de temps. La vitesse est directement liée au temps généralisé de transport pour l'usager.

Dans un modèle statique continu, si le temps de parcours d'un lien de longueur L et de W voies est t , et si le nombre d'usagers à un instant donné est n , alors les relations fondamentales suivantes peuvent être dérivées :

$$F = \frac{n}{t} \quad S = \frac{L}{t} \quad D = \frac{n}{L \cdot W}$$

Par ailleurs, si le modèle statique s'intéresse à une période donnée, l'heure de pointe par exemple, dont la durée est égale à T , qui correspond au temps écoulé entre les passages du premier et du dernier usager par un même point de repérage sur le lien, et si le nombre total des usagers qui utilisent le lien pendant la période considérée est noté N , les équations fondamentales deviendront :

$$F = \frac{N}{T} \quad S = \frac{L}{t} \quad D = \frac{N \cdot \frac{t}{T}}{L \cdot W}$$

Dans les deux cas, la relation fondamentale entre le débit, la vitesse et la densité sur un lien s'écrit :

$$F = D \cdot S \cdot W$$

La vitesse est normalement bornée par une valeur maximale S_{max} qui correspond à la vitesse de l'écoulement libre. Par ailleurs, puisque le lien a une capacité finie, la vitesse

décroît généralement avec la densité jusqu'à atteindre une valeur nulle pour une valeur de densité maximale D_{max} . La Figure 3.3 montre la forme générale de la relation fondamentale entre le débit, la vitesse et la densité dans l'approche statique.

Finalement, en utilisant l'hypothèse selon laquelle le coût généralisé est essentiellement composé du temps de déplacement, et en exploitant la relation entre le temps et la vitesse, d'une part, et la vitesse et le débit, d'autre part, la forme générale de la relation entre le débit et le coût généralisé moyen est telle qu'illustrée à la Figure 3.4.

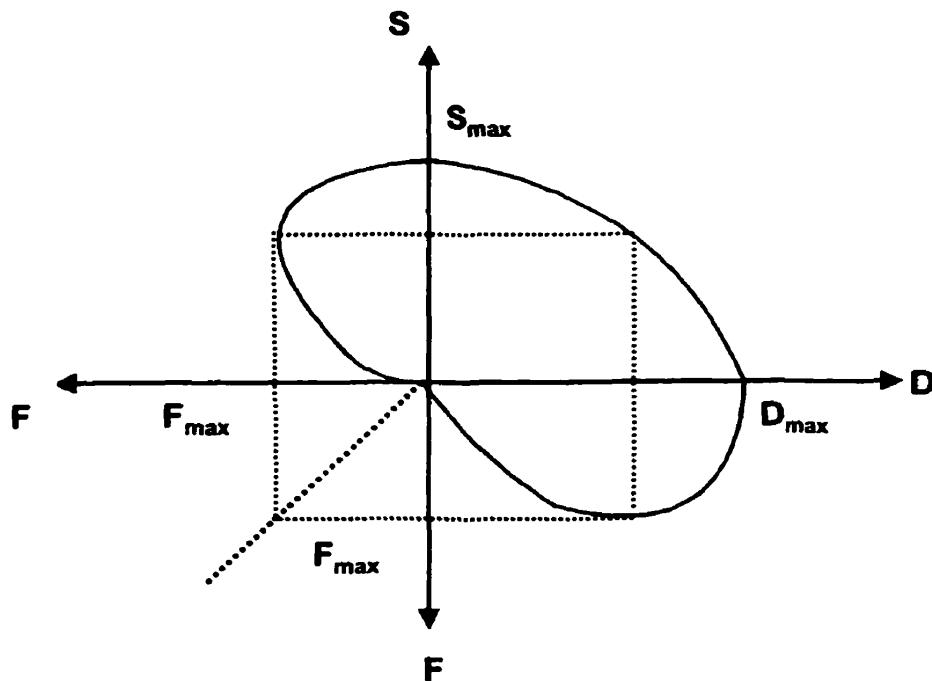


Figure 3.3 : Relation fondamentale Débit, Vitesse et Densité

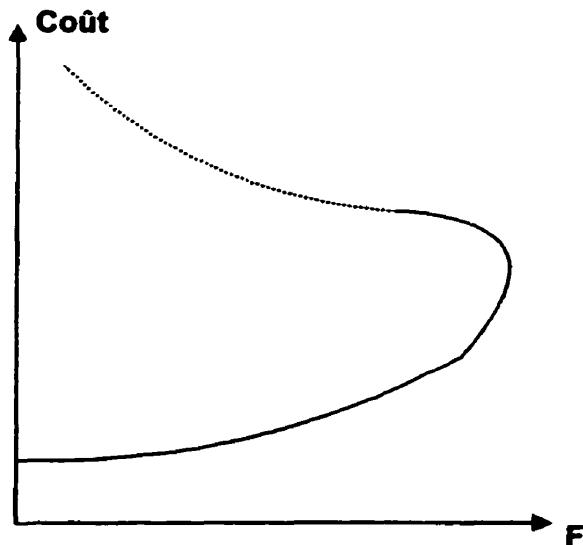


Figure 3.4 : La forme générale de la relation Débit-Coût

La plupart des modèles d'affectation d'équilibre utilisent la formulation suivante proposée par le Bureau of Public Roads (BPR) :

$$t = t_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{V}{C}\right)^\beta\right)$$

Où :

t = Le temps de déplacement sur le lien en congestion

t_0 = Le temps de déplacement sur le lien sans congestion

V = Le volume sur le lien

C = La capacité du lien

α, β = Des paramètres

En général, α est pris égal à 0,15, et β est pris égal à 4.

3.2.2.4 Le paradoxe de Braess

Dans un réseau sans congestion, dans lequel les coûts des déplacements sur les liens ne dépendent pas des volumes, la construction d'un nouveau lien ne peut jamais augmenter le coût total de déplacements pour les usagers du réseau.

En 1968, Braess a présenté un exemple démontrant que ce résultat ne s'applique pas nécessairement dans le cas d'un réseau avec congestion. Son exemple montrait en effet comment l'introduction d'une nouvelle route peut augmenter le coût de déplacement de tous les usagers.

L'exemple de Braess est devenu par la suite connu sous le nom du paradoxe de Braess devant l'étonnement des universitaires qui n'ont pas cessé de chercher d'autres exemples, mais aussi les raisons derrière ce paradoxe.

Les sous-paragraphes qui suivent présentent le paradoxe de Braess et tentent de comprendre son origine.

L'exemple historique

Soit le réseau de la Figure 3.5-A dans lequel les arcs (12) et (34) ont chacun un **coût moyen** égal à $(10 f)$, et les arcs (13) et (24) ont chacun un coût moyen égal à $(50 + f)$, où f est le nombre d'usagers sur l'arc. Il y a une demande de six usagers au nœud 1 qui désirent se rendre au nœud 4; ils peuvent utiliser l'un ou l'autre des deux chemins (124) ou (134).

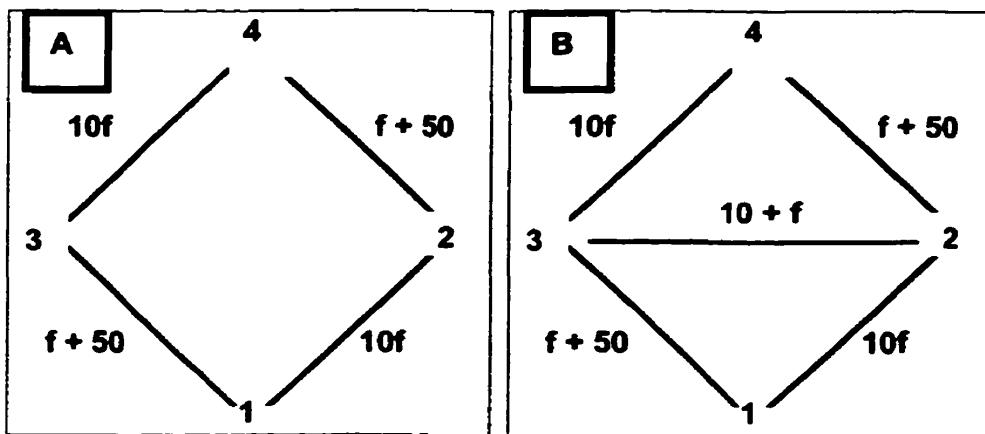


Figure 3.5 : Réseau historique du paradoxe de Braess

Chaque usager essaye de minimiser sa désutilité et choisit un chemin qui minimise son **coût total privé** selon le principe de d'optimisation descriptive de Wardrop. Ceci permet de conclure que chaque chemin sera utilisé par trois usagers. Le coût total privé pour chaque usager est donc égal à : $(50 + 3 + 10 \times 3) = 83$.

Si un nouvel arc est construit pour relier les nœuds 2 et 3 supportant un coût moyen de $(10 + f)$ tel qu'illustré à la Figure 3.5-B, deux nouveaux chemins reliant 1 et 4 seront possibles : (1234) et (1324). Le nouvel équilibre minimisant le coût total pour chaque usager est obtenu lorsque chacun des chemins (124), (134), et (1234) est utilisé par 2 usagers et le chemin (1324) n'est pas utilisé. Le coût total privé pour chaque usager est de $(50 + 2 + 10 \times 4) = 92$. L'introduction de la nouvelle route a eu pour conséquence une augmentation du coût privé total pour chaque usager.

Explication

Afin de comprendre le paradoxe de Braess, il faut considérer le **coût marginal social** de déplacement sur chaque route avant et après l'introduction du nouvel arc. Les fonctions de coût sont supposées discrètes (i.e. le coût marginal est le coût dû à la production d'une unité de plus).

Tableau 3.1 : Évaluation des coûts dans l'exemple de Braess

Chemin	Coût moyen	Coût total	Volumes avant dernier usager	Coût marginal Social
Avant la construction	124 $(10f_{12}) + (50 + f_{24})$	$(10f_{12})f_{12} + (50 + f_{24})f_{24}$	$f_{12}=2$ $f_{24}=2$	$10(2f_{12}+1) + (2f_{24}+51)$ = 105
	134 $(50 + f_{13}) + (10f_{34})$	$(50 + f_{13})f_{13} + (10f_{34})f_{34}$	$f_{13}=2$ $f_{34}=2$	$(2f_{13}+51) + 10(2f_{34}+1)$ = 105
Après la construction	124 $(10f_{12}) + (50 + f_{24})$	$(10f_{12})f_{12} + (50 + f_{24})f_{24}$	$f_{12}=3$ $f_{24}=1$	$10(2f_{12}+1) + (2f_{24}+51)$ = 123
	134 $(50 + f_{13}) + (10f_{34})$	$(50 + f_{13})f_{13} + (10f_{34})f_{34}$	$f_{13}=1$ $f_{34}=3$	$(2f_{13}+51) + 10(2f_{34}+1)$ = 123
	1234 $(10f_{12}) + (10 + f_{23}) + (10f_{34})$	$(10f_{12})f_{12} + (10 + f_{23})f_{23} + (10f_{34})f_{34}$	$f_{12}=3$ $f_{23}=1$ $f_{34}=3$	$10(2f_{12}+1) + (2f_{23}+11) + 10(2f_{34}+1)$ = 153

On constate d'après les calculs du Tableau 3.1 que dans le cas où les chemins (124), (134) et (1234) seraient utilisés avec deux usagers sur chacun d'eux, le coût marginal social de la route (1234) est plus grand que celui des deux autres bien que le coût privé soit le même sur les trois routes. Ceci permet de conclure que le choix des usagers ne serait plus le même s'ils étaient conscients du coût dû à leurs choix (i.e. s'ils subissaient le coût social marginal par exemple par l'intermédiaire d'un péage égal à ce coût). L'équilibre qui provoque le paradoxe de Braess est motivé par le coût supporté par la société et qui n'est pas perçu par les usagers.

Le système de prix employé (i.e. prix égal au coût privé) provoque une distorsion du système de transport qu'il faut corriger en instaurant un système qui reflète le coût marginal social. En effet, si le cas avant la construction du nouveau tronçon est considéré, chacun des deux chemins (124) et (134) sera utilisé par trois usagers, et le coût marginal social associé à chaque usager sera égal à 105. Si le nouveau tronçon est construit, le coût marginal social de l'utilisation du chemin (1234) par le premier usager sera de 131. Aucun usager n'aura intérêt à utiliser ce chemin du moment qu'avec l'ancien équilibre (i.e. trois usagers sur (124) et trois sur (134)), chaque usager ne supporte qu'un coût égal à 105. Le nouveau tronçon ne sera donc pas utilisé.

Le paradoxe de Braess est donc dû au fait que les usagers ne supportent que le coût privé moyen lié à leur utilisation du système de transport et non pas le coût marginal social de cette utilisation.

3.2.3 L'affectation probabiliste

Le dernier modèle classique de modélisation de l'affectation des déplacements concerne l'affectation probabiliste. En effet, plusieurs approches stochastiques ont été développées depuis les années soixante pour réaliser une affectation probabiliste des déplacements. Celle-ci, à l'inverse des autres méthodes d'affectation, considère que le coût perçu par chaque voyageur est une variable aléatoire, et que le choix du chemin répond à une contrainte de maximisation de la fonction d'utilité. Par ailleurs, l'affectation probabiliste peut également se faire à coûts constants ou à coûts dépendants des volumes.

Kanafani (1983) souligne que Dial était parmi les pionniers à introduire les modèles probabilistes pour l'affectation des déplacements. Dial a défini le concept de **chemin raisonnable ou efficace** qui correspond à un chemin qui permet au voyageur de se trouver plus proche de sa destination et loin de son origine. Le trafic, selon Dial, ne sera pas distribué sur les chemins à coûts minimums mais sur les chemins raisonnables qui relient l'origine et la destination. Les volumes sont distribués selon une loi logit multinomiale de la forme :

$$p(r) = \frac{e^{\theta(S_0 - S_r)}}{\sum_{j \in R} e^{\theta(S_0 - S_j)}}$$

où $p(r)$ est la probabilité du choix de la route r , S_r est le coût associé au chemin r , S_0 est le coût minimum entre l'origine et la destination, R est l'ensemble de tous les chemins raisonnables pour une paire origine-destination donnée, et θ est un paramètre.

Les développements qui ont suivi le concept de Dial ont permis d'introduire des modèles probabilistes qui tiennent compte de la congestion sur les liens.

3.3 Les modèles séquentiels classiques et l'analyse des effets redistributifs

L'approche séquentielle classique traite des données agrégées à partir desquelles la mesure de l'usage individuel du réseau ne peut pas être réalisée. D'une part, les niveaux de détails des informations sur le territoire, l'offre et la demande sont grossiers et ne permettent pas d'effectuer des évaluations fines de la consommation du réseau. D'autre part, quand l'affectation d'équilibre est adoptée, la non-unicité de la décomposition des flots sur les liens pour une paire origine-destination ne permet pas la détermination des usagers réels d'un lien ou d'une partie du réseau. Par ailleurs, l'enjeu fondamental de l'analyse des effets redistributifs du système de transport est la détermination exacte des bénéficiaires directs et indirects du système. Cette détermination requiert l'évaluation de la consommation individuelle ou d'un groupe d'individus du réseau ou d'une sous-partie du réseau. C'est pour ces raisons que l'approche séquentielle classique ne peut être utilisée pour analyser les effets redistributifs.

La procédure séquentielle est également handicapée par son aspect synthétique. En effet, essayer de remédier aux deux problèmes d'agrégation et d'affectation d'équilibre tout en gardant l'approche séquentielle ne permet pas nécessairement de mener une analyse valide. Le caractère synthétique de cette procédure résiste mal à une confrontation avec des données d'observations réelles.

Cette partie présente donc les limitations de l'approche séquentielle classique. Dans un premier temps, elle explique les problèmes d'agrégation et d'affectation d'équilibre. Ensuite, elle présente quelques limites de la modélisation synthétique.

3.3.1 Agrégation, affectation d'équilibre et perte d'informations

La procédure séquentielle classique est basée sur des données de déplacements et de conditions socio-économiques agrégées par zones géographiques conduisant à un état de « désinformation ». L'agrégation fait perdre aux données la majorité des informations fondamentales à une analyse de la mobilité. Le choix du système de zones n'est pas sans influence majeure sur les résultats de la modélisation. A ce propos, Atkins (1986) affirme, en compilant des réflexions sur les modèles de planification des transports, que des résultats différents peuvent être produits et parfois par des manipulations délibérées du système zonal, sans oublier que ce type de modèle néglige les déplacements intrazonaux. Le caractère agrégé est donc la première limitation du modèle classique.

L'affectation d'équilibre pose un second problème de taille. En dehors du problème de la non-unicité de la décomposition des volumes sur les liens, Chapleau et al. (1990) expliquent comment l'approche d'équilibre peut produire des volumes correspondant à des itinéraires erronés. Ils contestent aussi les hypothèses sous-jacentes, et surtout l'hypothèse de la rationalité du choix des usagers, leur parfaite connaissance du réseau et leur comportement réactif instantané. Cette dernière observation est souvent constatée lors d'une perturbation mineure dans le réseau qui provoque un changement radical de l'état d'équilibre. Elle est aussi prouvée par la sensibilité des modèles d'équilibre aux itérations. Une autre faille de ces modèles est la fonction du coût généralisé utilisée pour modéliser le niveau de service sur les liens. La formulation du Bureau of Public Roads prise comme universelle avec des paramètres laissés au choix de l'utilisateur met en question la totalité de la modélisation séquentielle classique.

3.3.2 Problèmes fondamentaux liés à la modélisation synthétique

Les sous-modèles de génération des déplacements n'intègrent point les variables du système de transport. En effet, les déplacements produits sont supposés être totalement indépendants des changements dans le système de transport. Cette même

caractéristique s'applique au sous-modèle d'attraction des déplacements. Ce dernier n'inclut aucune variable du système de transport qui puisse modéliser les éventuelles influences du système de transport sur le comportement des personnes se déplaçant. Les deux sous-modèles de génération des déplacements sont donc une procédure purement mécanique plutôt que comportementale.

Le sous-modèle de distribution des déplacements peut décrire sans pour autant pouvoir expliquer ou prédire les impacts des changements dans le système de transport sur la distribution des déplacements. En effet, il ne peut qu'affecter la distribution des déplacements entre les différentes zones sans pouvoir affecter le nombre même des déplacements effectués. Il s'agit donc d'un modèle descriptif qui n'a pas la capacité de prédire les conséquences d'un changement dans le système.

Le sous-modèle de répartition modale est limité bien qu'il soit comportemental. Il n'inclut pas les données relatives à l'accès aux facilités du système de transport. Cette limite est aussi due à l'agrégation spatiale des données qui fait perdre au modèle des variables très importantes dans le processus de choix du mode de transport.

Les modèles séquentiels classiques souffrent de la lourdeur des calculs effectués étant donnés leurs caractères algébrique et mécanique. Le nombre important des paramètres et des hypothèses qui les supportent engendrent des erreurs successives. Ces erreurs peuvent être faibles, mais leur cumul peut mettre en question les résultats obtenus. Ces modèles sont souvent très sensibles à toute modification portée aux principaux paramètres. Certains modèles tentent de réduire l'ampleur de ce problème en ayant recours à des itérations successives. Cependant, si cette solution semble résoudre certaines failles, elle ne permet guère de les supprimer.

3.4 Conclusion

Ce chapitre a tenté de décrire un des modèles les plus utilisés dans la planification des systèmes de transport urbain : la procédure séquentielle classique. Cette approche utilise des données agrégées dans le temps et dans l'espace pour modéliser la demande, l'offre et l'équilibre du système de transport. L'approche se distingue par son aspect séquentiel et la modélisation se fait généralement en quatre étapes: (1) génération des déplacements, (2) distribution des déplacements, (3) choix modal et (4) affectation des déplacements.

Ce chapitre a exposé en outre les limitations de cette modélisation. D'une part, elle souffre de son aspect synthétique et algébrique simpliste. D'autre part, cette modélisation est limitée, car elle est fondée sur des données agrégées et des hypothèses contestables sur le comportement des usagers.

Ce travail va donc chercher d'autres approches de modélisation qui soient basées sur des **informations** et des **observations réelles**, et qui permettent des appréciations valides de la demande **individuelle** de transport. Le chapitre qui suit introduit l'approche totalement désagrégée qui a été conçue depuis le début des années 1980 dans le contexte de la modélisation des transports urbains montréalais.

CHAPITRE 4 :

LA MODÉLISATION TOTALEMENT DÉSAGRÉGÉE

Dans le chapitre précédent, il a été démontré que la modélisation séquentielle classique basée sur une approche agrégée et sur le principe de Wardrop ne peut pas servir de cadre méthodologique pour mener à terme l'objectif de cette recherche. Dans ce chapitre, une modélisation dite totalement désagrégée est explorée. Elle se distingue par son caractère comportemental et son cadre informationnel.

La modélisation totalement désagrégée des transports a été développée dans la Grande région de Montréal depuis le début des années 1980 lorsque les planificateurs ont trouvé que le système des 1 500 zones utilisé et sa méthode agrégée ne répondaient pas à leurs besoins (Chapleau et al., 1998). Cette approche de modélisation s'inscrit dans le cadre d'un système d'information évolutif et transparent. Elle repose donc sur les composantes fondamentales d'un système d'information et profite des développements continus des technologies informationnelles.

Pour ce qui est de la modélisation systémique, l'approche totalement désagrégée est structurée autour de quatre composantes : le territoire, l'offre, la demande et l'équilibre. Ces composantes sont traitées d'une manière désagrégée pour refléter le comportement individuel des usagers du système de transport.

Le présent chapitre décrit les fondements de l'approche totalement désagrégée dans son cadre informationnel. Il présente ensuite la structure désagrégée de ses composantes systémiques et montre comment elle est mieux adaptée pour mener une analyse des effets redistributifs du système de transport.

4.1 Fondements de l'approche totalement désagrégée

L'approche totalement désagrégée est un cadre méthodologique pragmatique pour l'analyse du système de transport basée sur les informations disponibles et observées. Dans ce sens, une **analyse désagrégée** du système de transport s'intéresse au comportement individuel des éléments qui se déplacent. En plus, une **analyse totalement désagrégée** va au-delà d'une modélisation algébrique pour donner plus d'importance à l'information. Il ne s'agit donc pas de fabriquer des données synthétiques à l'aide de procédures mécaniques, mais de traiter des données réelles sur la mobilité, de les analyser et d'en extraire des conclusions pertinentes pour clarifier les enjeux d'une manière transparente. Un groupe d'experts en transports (GRETU, 1980) avait signalé l'importance d'une méthode basée sur des données réelles en soulignant comment «on résiste mal à l'idée qu'une demande se constate».

Pour situer l'approche totalement désagrégée, Chapleau (1991) explique, en présentant le modèle MADITUC (Modèle d'Analyse Désagrégée des Itinéraires de Transport Urbain Collectif), que :

« L'appellation désagrégée associée au système MADITUC se réfère, d'une part, au **traitement systématique d'informations de caractère individuel** (déplacement et les caractéristiques de la personne ou du ménage impliqué) spécifiées par de multiples variables, et, d'autre part, **autrairement d'informations à caractère spatial n'exigeant pas ou peu de système territorial défini a priori** (sans système zonal). »

L'approche totalement désagrégée a un meilleur pouvoir descriptif et explicatif des phénomènes de transport parce qu'elle donne plus d'importance à la collecte et à la gestion des informations relatives au système de transport. Elle a également un potentiel analytique sophistiqué grâce aux outils informatiques disponibles. Son architecture fondamentale est centrée autour de bases de données, d'applications d'analyse et d'outils graphiques interactifs.

L'approche totalement désagrégée consiste en un système d'information dédié à la planification des transports plutôt qu'un modèle algébrique. Telle que l'illustre la Figure 4.1, L'approche totalement désagrégée intègre les cinq composantes suivantes, essentielles à un système informationnel (Chapleau, 1991) :

- ◆ Le personnel technique et professionnel qui réalise l'évaluation effective des impacts relatifs aux options en question.
- ◆ Les procédures qui regroupent les méthodes et les techniques d'une façon transparente.
- ◆ Le matériel constitué des équipements technologiques et informatiques supportant les procédures et les bases de données.
- ◆ Les logiciels qui représentent les instruments d'application des méthodes.
- ◆ Les bases de données qui regroupent toutes les informations de la problématique en question.

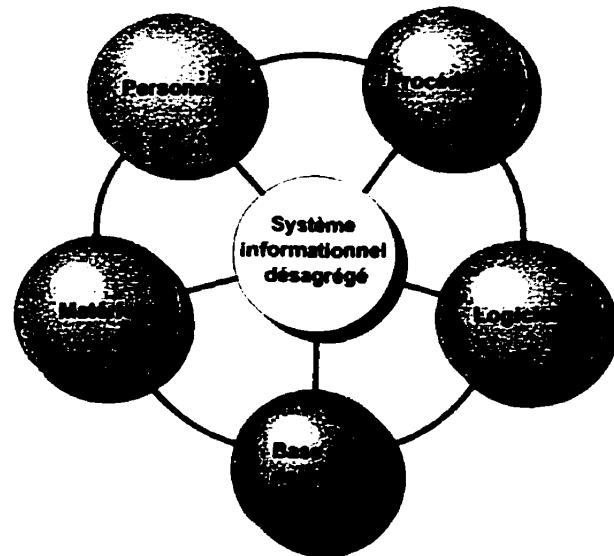


Figure 4.1 : Les composantes fondamentales d'un système informationnel désagrégé

En s'inscrivant dans le cadre d'un système d'information plutôt que dans celui d'un modèle algébrique, l'approche totalement désagrégée suit intelligemment les développements continus et accélérés des technologies informationnelles. Un système d'information est en effet ouvert et évolutif. Cet aspect fondamental permet un enrichissement permanent des informations sur la mobilité.

4.2 Modélisation systémique dans l'approche totalement désagrégée

L'approche totalement désagrégée est un modèle comportemental. Un modèle comportemental est un outil d'aide à la décision en matière de la demande de transport qui a pour objectif de prédire le comportement des individus à partir de données observées. Un modèle comportemental considère donc des données individuelles, car le comportement des individus ne peut être analysé en se servant de données agrégées. Les données individuelles permettent en effet au modèle de savoir comment un individu, face à des conditions spécifiques, prend la décision de se déplacer et choisit tous les attributs de son déplacement.

La structure de la modélisation totalement désagrégée des transports est basée sur quatre éléments clés : le territoire, la demande, l'offre et l'équilibre.

4.2.1 La notion du territoire totalement désagrégé

La première différence entre les modèles classiques, qui ont fait l'objet d'une présentation détaillée dans le chapitre précédent, et l'approche totalement désagrégée concerne le degré de détail du territoire du système de transport. Aucune limite n'est imposée en ce qui concerne le degré de désagrégation et ceci contrairement au modèle zonal restrictif

qui constitue la base des modèles classiques. L'approche totalement désagrégée peut en effet utiliser différents niveaux de résolutions, et plus particulièrement:

- ◆ Les coordonnées x et y (dans le système UTM par exemple) pour localiser l'origine et la destination des déplacements.
- La zone fine représentant une petite entité géographique homogène.
- ◆ Le secteur de recensement.
- ◆ L'entité géopolitique telle que la municipalité.

L'agrégation d'un niveau de résolution à un autre se fait à l'aide de dictionnaires ou de procédures de repérage spatial. Ces outils font partie des applications analytiques que comporte le modèle totalement désagrégé. La modélisation du territoire est ainsi libérée des restrictions et des limitations imposées par le système zonal agrégé.

4.2.2 L'offre totalement désagrégée

L'offre de transport est modélisée d'une manière multimodale. Autrement dit, tous les modes de transport sont modélisés et intégrés.

La géométrie du réseau et le niveau de service sont finement spécifiés. Ainsi, les réseaux sont représentés par un ensemble de nœuds et de liens et sont modélisés d'une manière hiérarchique. Le niveau de service est adéquatement calibré pour tenir compte des observations réelles sur le réseau et des déclarations des personnes qui se déplacent.

Pour le réseau de transport urbain collectif, le réseau concerne un jour moyen de la semaine et les aspects géométriques des tracés des lignes sont décrits de manière spatialisée (Chapleau, 1992). Les niveaux de service sont spécifiés en termes de vitesse commerciale et intervalles pour diverses périodes.

Le réseau routier urbain est hiérarchisé en classes de routes pour tenir compte des caractéristiques de service. Par analogie avec les correspondances en transport en commun, des pénalités de correspondances entre classes de routes sont utilisées

4.2.3 La demande totalement désagrégée

Une caractéristique très importante de l'approche totalement désagrégée concerne la modélisation de la demande. Cette dernière est basée sur des données observées. Dans le cas de la Grande région de Montréal par exemple, les données désagrégées sur la mobilité sont issues d'enquêtes ménage origine-destination à grande échelle. Ces données peuvent aussi provenir d'enquêtes continues ou de comptages automatiques des usagers du transport en commun avec l'utilisation de cartes à puce ou de voitures particulières équipées de systèmes de localisation intelligents. Le traitement de ces informations observées permet de construire des bases de données relationnelles contenant des fichiers structurés de tous les déplacements et de leurs attributs socio-économiques et spatio-temporels. La modélisation de la demande dans l'approche totalement désagrégée reflète donc des observations réelles.

Des attributs sont associés à chaque déplacement. Il s'agit du facteur d'expansion qui correspond au poids échantillonnel du déplacement, de la référence de la personne qui se déplace, de la localisation spatiale de ses points de résidence, d'origine et de destination et de l'heure et du motif du déplacement. En outre, d'autres attributs socio-économiques sont inclus dans le fichier désagrégé des déplacements tels que l'âge, le genre, la taille du ménage, la possession automobile ou du permis de conduire et le revenu du ménage. Les attributs associés aux déplacements permettent donc d'analyser la mobilité des personnes selon plusieurs perspectives.

4.2.4 La modélisation totalement désagrégée de l'équilibre

La modélisation totalement désagrégée de l'équilibre du système de transport est parfaitement maîtrisée dans le contexte du transport en commun alors que plusieurs approches ont été expérimentées jusqu'à présent pour un réseau routier avec congestion. Cette modélisation repose sur le concept **d'itinéraire** et procède par **simulation** des déplacements déclarés dans le fichier de la demande.

4.2.4.1 Le concept d'itinéraire

L'approche totalement désagrégée utilise le concept d'itinéraire pour représenter l'équilibre entre l'offre et la demande. L'itinéraire est la description détaillée de la trace du déplacement sur le territoire et le réseau. Tel qu'illustré à la Figure 4.2, l'itinéraire est composé du nœud d'entrée dans le réseau, du nœud de sortie du réseau, des nœuds de correspondance ou de jonction et les sections de lignes ou de rues empruntées. Un itinéraire est donc propre à un déplacement donné. Cette propriété permet de conserver tous les attributs du déplacement en question.

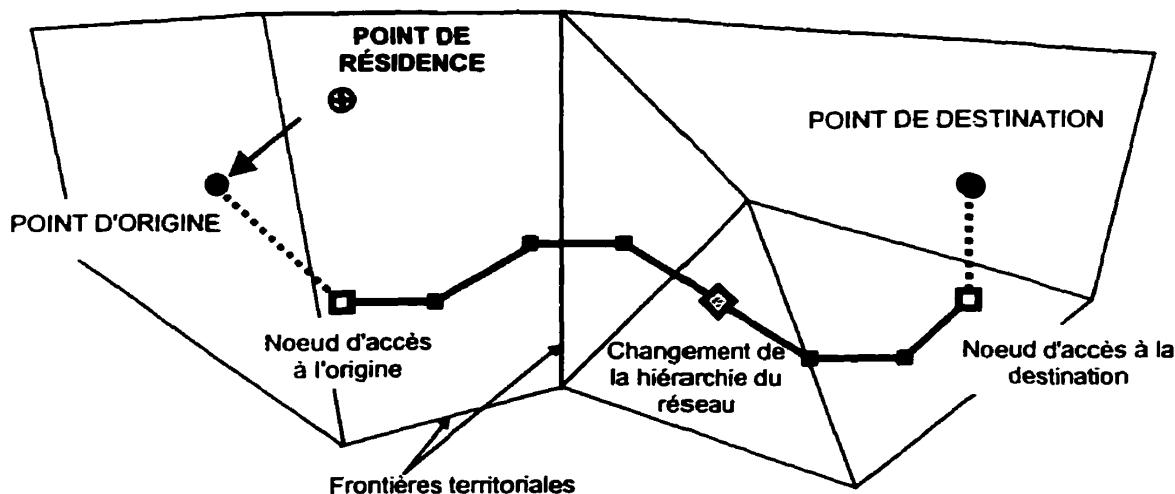


Figure 4.2 : L'itinéraire dans l'approche totalement désagrégée
(inspiré de MADITUC)

4.2.4.2 La procédure de simulation

La procédure de simulation traite les déplacements déclarés d'une manière individuelle et simule les itinéraires qui leur correspondent. Cette procédure comporte trois étapes (Bergeron et al., 1996) :

- ◆ Le calcul d'accès (entrée et sortie) : cette étape permet de mettre en relation la configuration physique du territoire et celle du réseau. Dans le contexte du transport en commun, l'accès au réseau est modélisé d'une manière automatique à partir des points d'origine et de destination en prenant en compte le réseau des trottoirs et des passages piétons. Dans un contexte de transport routier en véhicule privé, le calcul d'accès consiste à identifier les voies d'accès qui lient les points d'origine et de destination au réseau de simulation.
- ◆ Le calcul du cheminement : cette étape correspond au calcul de la trajectoire du déplacement sur le réseau entre l'origine et de destination en cherchant le chemin à coût généralisé minimum entre les points d'origine et de destination. Lors de cette étape, la séquence des sections empruntées est décrite et comprend, pour chaque section, les liens empruntés identifiés par leurs points d'entrée et de sortie ainsi que leurs numéros. Cette étape utilise des fonctions d'impédance sur les liens calibrées a priori en se servant des données réelles de l'enquête origine-destination pour les transports en commun ou des temps d'écoulement libre et à l'équilibre pour le réseau routier. Ces fonctions d'impédance tiennent compte des pénalités de correspondances entre les différentes lignes et modes de transport en commun et de la hiérarchie du réseau routier pour les déplacements automobiles.
- ◆ Le chargement des itinéraires : lors de cette étape, l'ensemble ou une partie des déplacements est chargé sur le réseau afin d'évaluer et d'apprécier la charge supportée par les infrastructures du réseau, et de réactualiser dans certains cas les conditions d'offre telles que les impédances sur certains liens ou sections.

L'aspect le plus important de cette procédure est que les volumes sur les liens sont composés de déplacements dont les attributs sont parfaitement connus. Cette propriété

permet la réalisation de différentes analyses, et notamment l'analyse des effets redistributifs.

Le résultat d'une simulation de l'équilibre est organisé dans une base de données qui contient, entre autres, une description des itinéraires de tous les déplacements. Chaque itinéraire correspond à un déplacement du fichier de la demande. L'itinéraire est composé donc d'un point d'origine, d'un point de destination et d'une séquence de tous les nœuds traversés, et par conséquent de tous les liens utilisés.

4.2.5 Le cas d'un réseau routier sous congestion

L'approche totalement désagrégée est parfaitement maîtrisée dans le cas du transport en commun. En effet, elle profite des parcours fixes du réseau du transport collectif pour calibrer les fonctions d'impédance sur les liens et utilise une affectation tout-ou-rien pour charger les déplacements sur le réseau.

L'application de cette procédure au réseau routier sous congestion doit être soigneusement et adéquatement élaborée. En effet, dans le cas d'un réseau routier sous congestion, les impédances sur les liens dépendent des conditions du trafic, et plus particulièrement des volumes sur les liens. Plusieurs approches ont été suggérées et testées pour effectuer une affectation routière totalement désagrégée. Chapleau et al. (1990) proposent d'utiliser les temps de parcours à l'équilibre résultant d'une affectation d'équilibre selon le principe de Wardrop pour chaque lien et pour chaque paire origine-destination afin de calibrer les impédances sur les liens. En outre, des pénalités sont ajoutées pour modéliser les correspondances entre les différents niveaux hiérarchiques du réseau routier. Cette procédure permet de calibrer les impédances sur les liens à l'état d'équilibre.

4.3 Quelques usages pragmatiques de l'approche totalement désagrégée

L'utilisation de l'approche totalement désagrégée dans le contexte montréalais en se servant des données d'enquêtes origine-destination à grande échelle sert à analyser au moins quatre catégories de problèmes de transport. Dans ce sens, Chapleau (1995b) distingue :

- ◆ L'analyse des réseaux de transport à l'aide de modèles d'affectation qui utilisent les déplacements déclarés lors de l'enquête au lieu de matrices origine-destination synthétiques. Cette analyse permet l'évaluation du réseau et de son adaptation éventuelle à la demande.
- ◆ Les analyses catégorielles de la demande telles que le suivi des tendances socio-économiques et l'étude de l'usage des modes. Ces analyses se servent des données d'enquêtes comparables et essayent d'extraire les tendances spatio-temporelles du système de transport montréalais.
- ◆ L'examen d'effets à caractère géopolitiques tels que les effets de débordement, les flux financiers ou l'évasion fiscale. Grâce aux itinéraires décrits, l'usage des réseaux est identifié selon des attributs socio-économiques, et en particulier selon le lieu de résidence et les destinations. Dans le cas des transports en commun, des formules de compensations réciproques entre les différents organismes impliqués permettent de partager les recettes et les subventions (Chapleau, 1988 et 1995a).
- ◆ Le développement d'un système d'information intégré orienté transport. Ce système englobe des outils orientés-objets. Il est utilisé pour comprendre les entités du système de transport. Il est également utilisé pour supporter les systèmes d'information à l'usager et de dissémination de l'information.

4.4 Conclusion

L'approche totalement désagrégée est une méthodologie pragmatique et transparente qui s'inscrit dans le cadre d'un système d'information dédié à la planification des transports et repose sur des données désagrégées sur les quatre composantes essentielles : le territoire, l'offre ou le réseau, la demande et l'équilibre. Ces données sont structurées dans des bases de données relationnelles pour faciliter l'extraction et le traitement des informations pertinentes.

Toutes les composantes systémiques de l'approche totalement désagrégée sont traitées à un niveau de détail assez fin. Ainsi, le territoire est géocodé de manières mathématique et thématique au niveau des coordonnées x et y. Les données ne dépendent d'aucun système de zonage défini a priori. Quant au réseau, il est finement géocodé, et les données sur le niveau de service tiennent compte du caractère multimodal et de la perception réelle des usagers. Enfin, les données sur la demande reflètent des observations réelles qui peuvent provenir d'enquêtes ménage origine-destination à grande échelle comme c'est le cas du modèle MADITUC dans la Grande région de Montréal.

L'équilibre est simulé à travers la reconstitution des itinéraires déclarés en tenant compte de la géométrie du réseau et de son niveau de service. Cette simulation permet de retracer les chemins empruntés par les usagers, et par conséquent, de retrouver leurs attributs socio-économiques, et en particulier, leurs lieux de résidence. C'est pour cette raison que l'approche totalement désagrégée est mieux adaptée pour évaluer les effets redistributifs associés à l'usage d'un réseau de transport. L'exercice exploratoire amorcé dans le cadre de la présente recherche adopte donc une approche totalement désagrégée.

Le chapitre qui suit explore une méthodologie d'analyse dite multi-perspective et examine son applicabilité dans le cadre du système de transport.

CHAPITRE 5 :

EXPLORATION D'UNE APPROCHE ONTOLOGIQUE POUR L'ANALYSE MULTI-PERSPECTIVE DU SYSTÈME DE TRANSPORT

Par sa complexité, la problématique des effets redistributifs associés à un système de transport requiert une analyse selon plusieurs perspectives et demande la manipulation d'instruments multiples et complémentaires. Pour répondre à ces besoins, une analyse multi-perspective est mieux adaptée, car elle permet une analyse intelligente et flexible basée sur un agencement pertinent de toutes les variables.

Le présent chapitre explique comment, dans un cadre informationnel, une analyse multi-perspective est un outil intelligent de planification. Pour conceptualiser les éléments fondamentaux d'une telle analyse, ce chapitre présente une approche dite ontologique. Ensuite, il explique comment l'analyse multi-perspective peut être réalisée dans le cadre du système totalement désagrégé. Enfin, ce chapitre souligne l'importance de la gestion des données lors de l'adoption d'une analyse multi-perspective et explore la technique de gestion et d'exploitation de données dite data mining.

5.1 Le paradigme informationnel

Le paradigme informationnel qui marque la fin du XX^e siècle ne manque pas d'influencer le système de transport. En effet, grâce aux nouvelles technologies informationnelles, le système de transport est maintenant organisé autour de la gestion de la connaissance et de l'information. En conséquence, l'analyse systémique ne sert plus à mesurer des indicateurs de performance ou à évaluer des outputs à caractère purement industriel,

mais plutôt à clarifier des enjeux, d'une manière transparente, en exploitant et enrichissant les données, les informations et les connaissances disponibles.

D'ailleurs, depuis bien des années, la gestion intelligente de l'information est devenue un des défis majeurs d'une analyse systémique qui se veut valide et pertinente. Cette gestion concerne à la fois les connaissances du monde des transports que les bases de données qui servent à mener l'analyse. Une gestion intelligente de l'information et des connaissances permet également de réaliser une analyse sous différentes perspectives.

5.2 Analyse intelligente du système de transport

Une approche intelligente de modélisation est une systématisation valide de la représentation d'une réalité appelée système de transport. Une analyse intelligente s'intéresse aux notions fines de temps, d'espace et se sert d'une modélisation intelligente qui intègre des modèles de **traitements** statiques et dynamiques traduisant chacun une vision de la réalité du système. Vu le caractère complexe de ce dernier, la modélisation intelligente peut être concrète ou abstraite. Cependant, le but de la modélisation dans le cadre d'une analyse intelligente reste le même : aider à avoir le plus d'informations et à clarifier les enjeux d'un changement quelconque dans les éléments systémiques.

Une modélisation intelligente doit par ailleurs être transparente, flexible, pro-active et évolutive. Dans le cas des transports, elle consisterait en une fonction générique qui engloberait une classe de fonctions analytiques capables de mener l'analyse systémique selon plusieurs perspectives. Dans le cadre de cette analyse, les éléments systémiques seraient classifiés, leurs attributs identifiés et les relations qui les gouvernent modélisées.

L'analyse dite multi-perspective est un exemple d'analyse intelligente. Elle est parfois utilisée dans le contexte des transports, mais ce sont les systèmes d'information qui s'en

servent le plus. Dans la suite de ce sous-chapitre, une exploration de cette approche est réalisée.

5.2.1 Introduction de l'analyse multi-perspective

Dans le cadre de cette recherche, une approche dite multi-perspective est expérimentée. Une telle approche fournit un cadre général pour analyser le système de transport sous différents angles tout en intégrant des méthodes variées et complémentaires. Une étape fondamentale de l'approche multi-perspective consiste à conceptualiser le système de transport à l'aide de moyens partiels de modélisation intégrés au sein d'une architecture commune, flexible et évolutive.

La Figure 5.1 illustre d'une façon simplifiée les multiples facettes d'une analyse multi-perspective du système de transport. Il s'agit en fait d'intégrer toutes les composantes systémiques, et de les analyser selon différents angles en se servant d'outils méthodologiques et analytiques complémentaires. Il faut signaler qu'il existe une infinité de perspectives, et que l'analyste doit définir et choisir celles qui sont pertinentes pour l'aider à clarifier les impacts des changements systémiques qui l'intéressent. La construction d'une perspective ressemble à l'identification de paradigmes et la construction de syntagmes en sémiotique².

A l'intérieur de cet espace infini, il existe toutefois quelques perspectives susceptibles d'être omniprésentes lors d'une analyse systémique. A ce sujet, une perspective tenant compte de l'aspect temporel des déplacements ou de leur aspect territorial est d'une importance majeure.

² Sémiotique : appelée aussi sémiologie, du grec *sêmeion*, théorie des systèmes de signes.

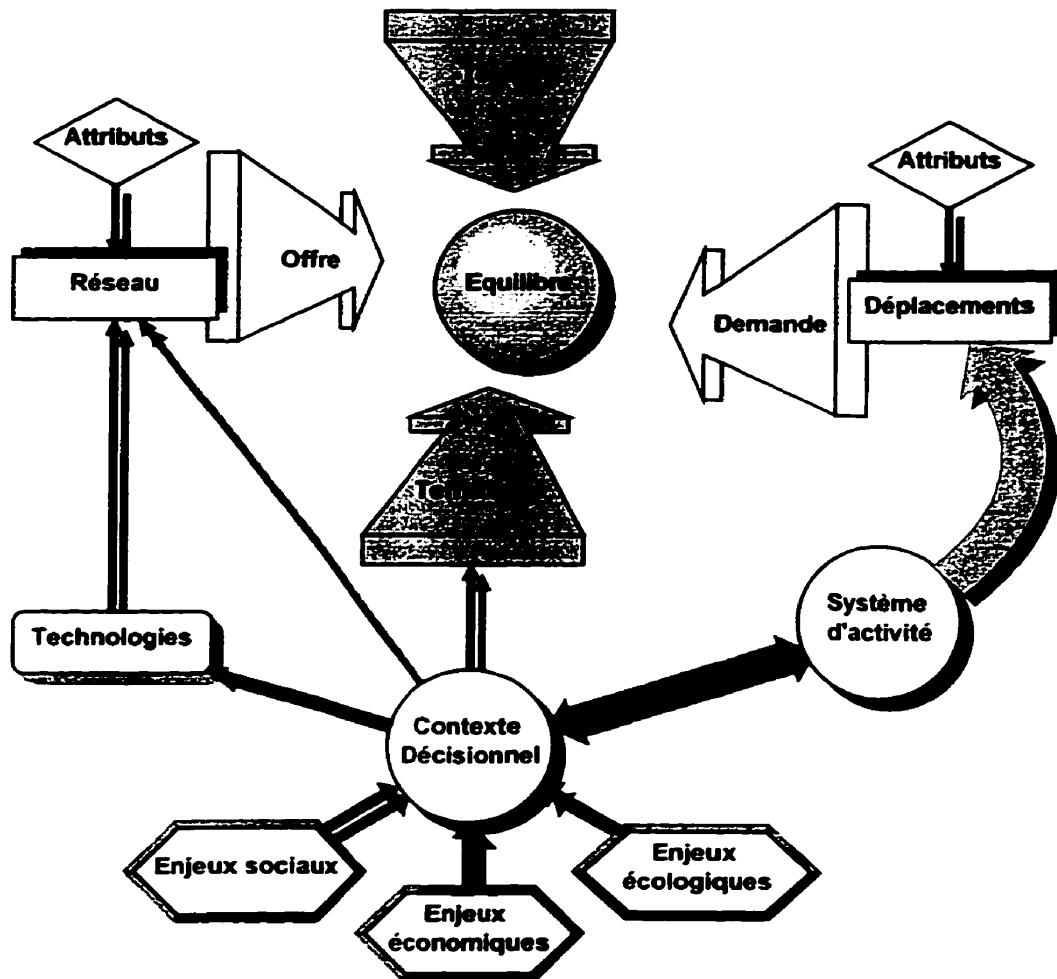


Figure 5.1 : Quelques perspectives du système de transport

Chapleau (1992) cite quatre grandes dimensions d'analyse couramment examinées qui sont reprises et adaptées ici :

- La perspective nœuds : sert à étudier les mouvements à une station ou aux intersections de routes. Dans le premier cas, il est possible d'analyser l'accessibilité

par la marche, le covoitage ou les stationnements incitatifs, les débits et la composition des correspondances, les types de clientèle et la distribution temporelle des arrivées.

- ◆ La perspective lignes et liens: sert à analyser la composition du trafic par l'examen des faisceaux de déplacements désagrégés et à la production de statistiques sur les modes et les distances d'accès. Elle sert également à l'estimation des matrices origine-destination à partir d'enquêtes montées-descentes pour les lignes de transport en commun ou de comptes cordon pour le trafic routier.
- ◆ La perspective secteurs territoriaux: cette perspective est combinée à d'autres perspectives qui tiennent compte des origines et des destinations des déplacements faits par les résidents et selon une décomposition complète par modes de transport. Cette combinaison de perspectives permet l'étude des distorsions tarifaires ou financières amenées par les réseaux ou les infrastructures de transport.
- ◆ La perspective personnes: autorise l'analyse de corrélations entre les taux de déplacement pour chaque mode de transport, selon la catégorie socio-économique des personnes qui se déplacent, leur occupation, le lieu de résidence ou leur revenu. Elle sert également à analyser l'équité du système selon des attributs tels que le niveau de revenu, le genre ou l'âge.

5.2.2 Éléments d'une analyse multi-perspective

L'analyse multi-perspective est surtout utilisée dans le cadre du développement des systèmes informationnels lors de l'évaluation des exigences et des conditions d'un nouveau système. La transposition des méthodes d'analyse multi-perspective au système de transport peut se faire en adoptant les éléments de l'approche informationnelle qui existent déjà ou qui sont en phase de formalisation.

Opdahl (1997) cite quatre éléments principaux pour expliquer les perspectives multiples qui peuvent exister lors de l'analyse d'un problème. Ces éléments sont:

- ◆ Les choses : ce sont les composantes élémentaires du monde.
- ◆ Les propriétés : les choses ont des propriétés. Ces dernières peuvent correspondre à des relations entre les choses. Des choses ayant des propriétés communes peuvent former une classe ou un système. Les propriétés peuvent être intrinsèques, mutuelles, émergentes ou héréditaires.
- ◆ Les conceptions : les conceptions apparaissent lorsque les choses sont perçues selon une perspective donnée. Les conceptions considèrent un sous-ensemble de propriétés liées aux choses considérées.
- ◆ Les perspectives : ce sont des points de vue ou des angles suivant lesquels un problème est traité. Elles peuvent provenir de la complexité des acteurs impliqués dans le problème. Une perspective comprend un ensemble de conceptions avec des propriétés bien particulières et parfois des définitions de classes de choses adéquatement choisies.

Une analyse multi-perspective doit donc prendre en compte ces quatre éléments. Il faut cependant commencer par définir les deux premiers qui sont les choses et les propriétés, car ils constituent les deux éléments de base. Après cette construction, l'analyse multi-perspective peut définir les perspectives selon lesquelles le problème doit être analysé en se servant des choses et des propriétés.

Parmi les approches utilisées pour la construction de domaines tels que le système de transport à partir d'éléments de base, il y en a une qui consiste en l'élaboration d'une **ontologie** : un ensemble d'idées sur les composantes de base du monde et les relations entre ces composantes ainsi que leur organisation.

La suite de ce chapitre explore la notion d'ontologie et explique comment son application au système de transport pourrait fournir un cadre riche et efficace pour une analyse multi-perspective en vue de l'évaluation des effets redistributifs.

5.3 Un modèle ontologique pour le système de transport

L'évaluation des effets redistributifs à l'aide d'une analyse multi-perspective requiert une conceptualisation méthodologique formelle. Cette conceptualisation doit permettre de formaliser les éléments et l'environnement du système de transport ainsi que toutes les interactions et les relations qui peuvent exister. L'exercice de conceptualisation consiste à définir une vision abstraite et simplifiée du **monde** des transports. L'approche de conceptualisation explorée dans la suite est basée sur la théorie ontologique d'Aristote telle que développée par Bunge (1977 et 1979) et Smith (1999a).

5.3.1 L'ontologie de substances et d'accidents selon Aristote

Le terme **ontologie** est emprunté à la philosophie où l'ontologie veut dire le compte systématique de ce qui existe. Selon Smith (1999a), Aristote fonde sa théorie ontologique autour de deux concepts fondamentaux: (1) les **substances** qui englobent les choses, les objets ou les corps; et (2) les **accidents** qui regroupent les événements, les processus, les propriétés et les relations.

Des substances peuvent être rassemblées en groupes ou **classes** plus complexes, et un groupe peut hériter de certaines des propriétés ontologiques des substances qui le composent. Le pont Jacques-Cartier, par exemple, est une substance qui fait partie de la classe appelée système de transport de la Grande région de Montréal (GRM). D'autres substances font partie du système de transport de la GRM sans pour autant faire partie de la sous-classe des ponts de la GRM. D'une façon plus générale, le degré de complexité des classes est illimité. Dans le cas extrême, des classes sont regroupées pour former des systèmes (Bunge, 1979).

En ce qui concerne les accidents, ils peuvent être **non-relationnels** ou **relationnels**. Les accidents non-relationnels sont associés à une seule substance qui les supporte. Ils peuvent correspondre à des attributs ou à des propriétés intrinsèques à une substance.

Dans l'exemple du pont Jacques-Cartier, un accident serait la longueur du pont. Quant aux accidents relationnels, ils sont associés à un groupe de substances et expriment des relations et des interactions entre les substances composant le groupe. L'expression "Le pont relie la rive sud et l'île de Montréal" est un accident relationnel selon l'ontologie aristotélicienne. Les accidents peuvent également faire partie d'un groupe d'accidents plus complexes. Dans ce cas, des relations sont expliquées par une composition d'accidents élémentaires.

Dans certains cas complexes, le terme **transcatégorie** est employé pour désigner un ensemble composé de substances appartenant à des classes ontologiques différentes et faisant l'objet d'accidents multiples. Le système de transport, par exemple, est une transcatégorie.

La Figure 5.2 illustre le modèle ontologique selon la théorie d'Aristote.

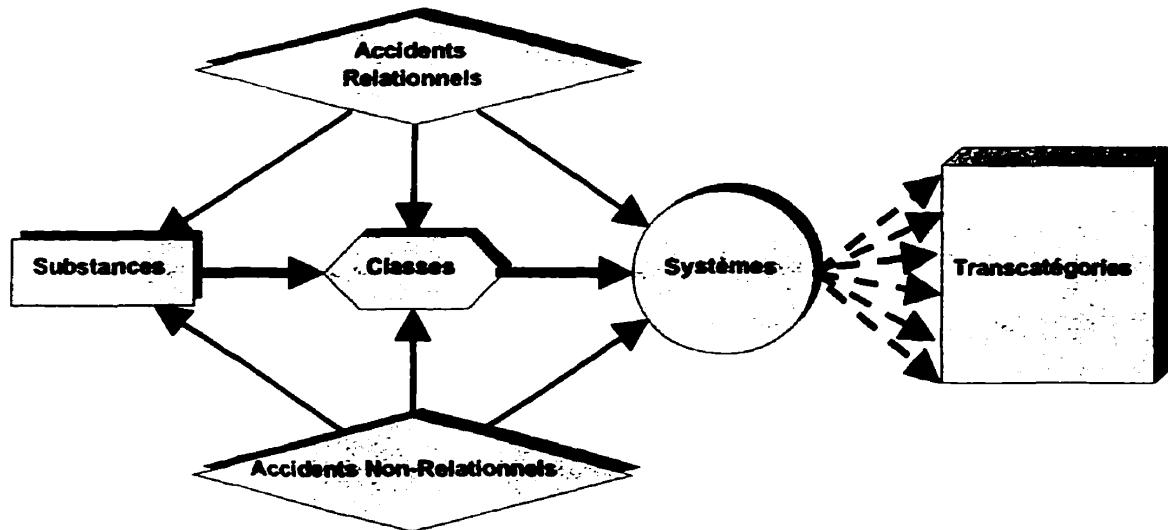


Figure 5.2 : Le modèle ontologique selon Aristote

5.3.2 Quelques applications de l'approche ontologique

L'approche ontologique est utilisée dans le domaine de l'intelligence artificielle pour catégoriser les choses dénombrables d'un domaine cognitif et les relations qui peuvent exister entre elles. Dans ce contexte, une ontologie est considérée comme une spécification explicite de la conceptualisation du monde. Cette conceptualisation permet de définir et de catégoriser un certain nombre de concepts, un nouveau vocabulaire, un domaine lexicographique et une grammaire. Ce nouvel univers forme l'espace du discours de l'ontologie. Cependant, l'application de l'approche ontologique dans le domaine des sciences informationnelles et en intelligence artificielle n'a pas encore dépassé la gestion de la connaissance. La présente recherche tente d'explorer une éventuelle application plus avancée de l'approche ontologique au transport qui dépasserait la simple construction d'un vocabulaire ou d'une grammaire.

5.3.3 Pourquoi une ontologie pour le système de transport?

La construction d'une ontologie pour le système de transport faciliterait une meilleure compréhension des éléments et des interactions systémiques, et par conséquent, elle permettrait une analyse multi-perspective transparente. Avant de regarder plus en détails les éléments d'une telle ontologie, il serait important de signaler les possibilités qu'elle offrirait.

Une ontologie des transports s'intéresserait au réseau, à la demande, au territoire et à l'équilibre. De la perspective réseau, l'offre de transport est constituée d'objets possédant un certain nombre d'attributs et régis par des relations spécifiques. De la perspective demande, les déplacements individuels ainsi que les personnes ou choses qui se déplacent sont conceptualisés en objets, classes et propriétés. Cette formalisation permet de bien comprendre le comportement individuel des objets qui se déplacent et d'en tirer les caractéristiques et les tendances de la mobilité. De la perspective territoire, la manipulation d'objets tels que les coordonnées x et y ou les codes postaux ainsi que

les relations territoriales sont parfaitement réalisables en ayant recours à une approche ontologique. Enfin, les interactions et l'équilibre sont des propriétés ou des méthodes ontologiques complexes et sophistiquées appliquées à une transcatégorie qui n'est autre que le système de transport.

Un autre aspect très important de l'approche ontologique appliquée aux transports concerterait le système de gestion des bases de données. En effet, l'ontologie des transports est un moyen performant pour gérer les bases de données d'une manière flexible, pro-active, évolutive et réutilisable.

5.3.4 Éléments de l'ontologie du système de transport

La catégorisation des éléments du système de transport ne date pas d'aujourd'hui. Elle a fait l'objet des premières recherches sur les transports. Cependant, ce sont les éléments utilisés par l'approche totalement désagrégée qui se rapprochent le plus d'une conceptualisation ontologique. L'approche totalement désagrégée orientée-objets (Chapleau et al., 1998) peut servir de modèle pour transposer l'approche ontologique aux transports.

5.3.4.1 Les substances et les accidents du système de transport

Le système de transport est par définition une transcatégorie formée de classes complexes de substances. Il est régi par des accidents qui représentent les interactions internes et externes.

Les substances sont les éléments fondamentaux qui composent le système de transport. La station métro Université de Montréal est une substance qui appartient à la classe des stations métro de Montréal. Cette même classe appartient à la classe réseau du transport en commun de la Communauté Urbaine de Montréal. Ce dernier fait partie du système de transport de la Grande région de Montréal.

Les accidents forment le deuxième concept fondamental de la modélisation ontologique du système de transport. Il s'agit d'une part de toutes les propriétés des substances du système, et d'autre part de toutes les relations et interactions intérieures et extérieures qui peuvent exister. La station métro Université de Montréal possède des attributs tels que son nom, son emplacement et sa fonction. Elle est aussi en relation avec d'autres stations. En effet, la station métro Université de Montréal est directement liée aux deux stations Côte-des-Neiges et Edouard-Montpetit. Elle est également en relation avec d'autres substances extérieures à sa classe. Par exemple, elle est en correspondance avec la ligne 51 du réseau d'autobus, et elle est reliée à l'intersection entre le boulevard Edouard-Montpetit et la rue Louis-Colin.

5.3.4.2 Méréologie et méréotopologie du système de transport

La **méréologie**, théorie des relations entre les particules et le tout, peut expliquer les interactions et les relations spatio-temporelles entre les éléments du système de transport. En effet, le système de transport n'est qu'une réunion méréologique de substances et d'accidents collectifs. Il s'agit de la caractérisation des aspects de chevauchement et de positionnement dans l'espace et dans le temps des composantes systémiques et de leurs interactions.

Les caractéristiques méréologiques du système de transport se distinguent par leur aspect spatio-temporel qui va au-delà d'une simple topologie basée sur une métrique classique. Afin de caractériser l'aspect méréologique spatial et temporel, la notion de **méréotopologie** que Smith (1999b) utilise pour sa théorie ontologique géographique peut être transposée aux transports. La méréotopologie peut être définie comme la théorie des relations spatiales, temporelles et collectives entre les substances du système de transport.

5.3.4.3 Agglomérations et territoires

La notion d'agglomération a été développée par Smith (1999b) lors de son étude ontologique du domaine géographique. L'approche ontologique du système de transport explorée dans ce paragraphe est inspirée de sa réflexion.

Parmi les multiples aspects du système de transport, le caractère spatio-temporel en est sans doute le plus important. La mobilité est définie par une origine, une destination, des correspondances et le moment ou la période du déplacement. L'objet mobile a souvent un point d'attache ou une résidence. C'est cette subtilité entre l'origine, la destination et le point d'attache qui pose le problème spatial. En outre, lors d'une agrégation de la mobilité, le critère d'agrégation a une importance majeure. L'agrégation par zone de résidence, d'origine ou de destination; par période temporelle ou par classe d'objets mobiles doit être soigneusement construite afin d'obtenir des conclusions valides. Ce constat est au cœur de l'analyse des effets redistributifs qui fait l'objet de cette recherche.

Ontologiquement, un **territoire** est un objet spatialement délimité. Un territoire est souvent le reflet d'une existence cognitive dans la culture et dans les croyances, mais il est attaché à une région spatiale sans pour autant lui être identique. En outre, un territoire est le produit d'un **fiat** (i.e. que cela soit en latin) humain par opposition à des objets spatiaux **bona fide** (i.e. de bonne foi en latin) qui ne dépendent pas de propriétés culturelles ou politiques pour exister (Smith, 1999b). La ville de Montréal est un objet fiat constituant un territoire. Elle a des frontières qui ont été politiquement ou culturellement instaurées et qui peuvent évoluer dans le temps. Par contre, l'île de Montréal, au sens géographique, est un objet spatial **bona fide** qui supporte le territoire de la ville de Montréal ainsi que d'autres territoires.

De la même façon, une **agglomération** peut être définie comme une agrégation d'objets du système de transport selon un critère spatial, temporel ou tout autre critère attribuable à des objets. Dans le cas particulier d'une agrégation spatiale, le concept d'agglomération est très efficace pour expliquer des confusions qui puissent exister lors

de l'analyse du système de transport. Le cas des déplacements de transit est un exemple de situation complexe dont l'analyse de l'appartenance géopolitique se fait efficacement en définissant des agglomérations appropriées.

Une fois définis, les territoires et les agglomérations sont sujets à des relations méréotopologiques. Les relations les plus importantes sont des relations de juxtaposition, de séparation, de chevauchement, d'inclusion, de tangence, d'entourage et de connexité. Des relations plus complexes peuvent refléter des interpénétrations, réciproques ou dans un seul sens, entre les territoires ou les agglomérations. Des exemples de cette catégorie concernent les relations du type diaspora ou archipel. La Figure 5.3 illustre quelques relations méréotopologiques typiques adaptées au cas de la Grande région de Montréal.

Les territoires et les agglomérations constituent des éléments fondamentaux dans l'analyse du système de transport qui sont parfaitement maîtrisés en adoptant un niveau de désagrégation assez fin. En particulier, l'analyse des effets redistributifs repose sur un système de territoires géopolitiques pour évaluer les transferts entre les différentes entités géopolitiques, les effets de débordement ou les phénomènes d'évasion fiscale. Cette même analyse repose sur un système d'agglomérations quand il s'agit de s'intéresser à l'usage de l'infrastructure par les femmes, les hommes, les groupes d'âge ou les classes de revenu. Il faut toutefois garder à l'esprit le caractère fiat des territoires d'analyse. Le système de zonage, par exemple, est une pure convention qui peut changer selon les circonstances. En adoptant donc un niveau de désagrégation très fin, l'analyse ne dépend point du choix du territoire.

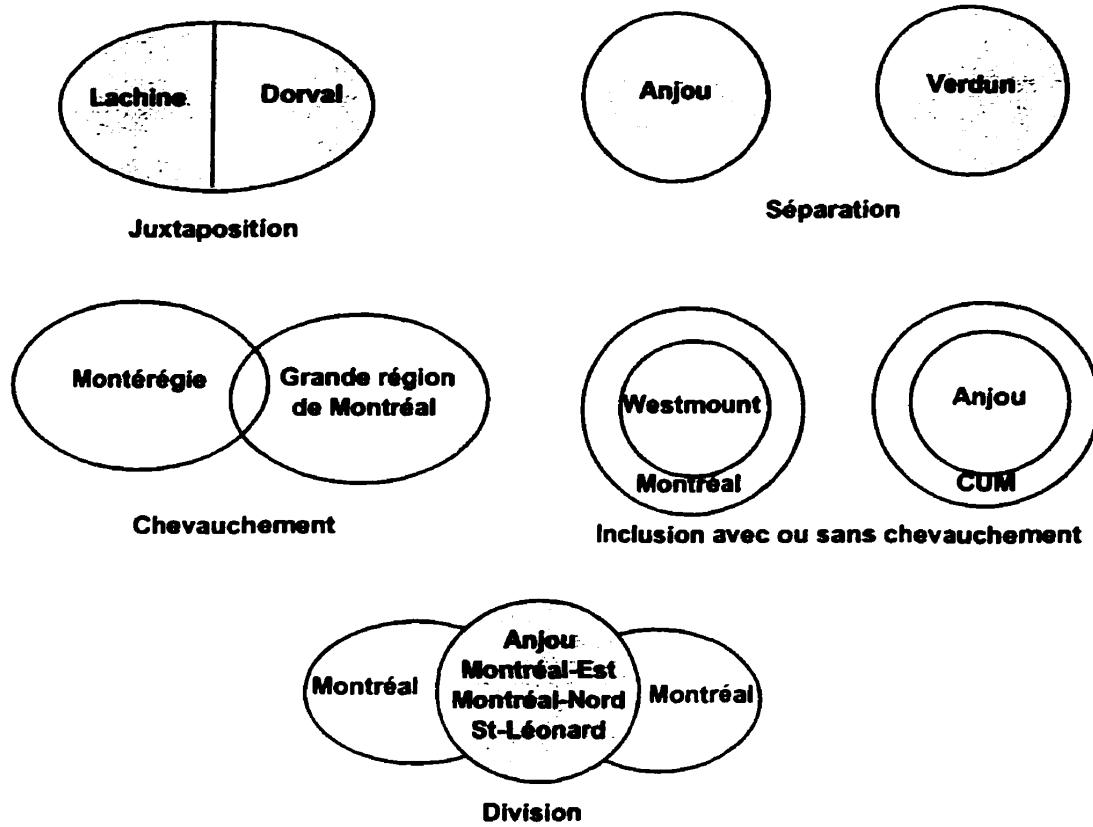


Figure 5.3 : Quelques relations méréotopologiques typiques adaptées au cas montréalais (inspiré de Smith, 1999b)

Les relations méréotopologiques entre les territoires ou les agglomérations sont à leur tour d'une importance majeure pour l'analyse du système de transport. L'analyse des déplacements selon différentes agglomérations d'usagers aboutit souvent à des relations complexes du type diaspora. Quant à l'offre, c'est le concept du territoire qui s'applique le plus souvent. Les appartenances territoriales des éléments du réseau, des liens, des stations de métro, des espaces aériens sont identifiées en analysant des relations méréotopologiques.

5.3.5 Approche ontologique et approche totalement désagrégée

L'approche ontologique est une façon de redécouvrir comment l'approche totalement désagrégée peut être exploitée pour conceptualiser l'analyse systémique des transports. D'une part, l'adoption d'une approche ontologique et méréotopologique exige la manipulation d'objets élémentaires à l'intérieur d'un système ouvert, évolutif et adaptable. D'autre part, ces mêmes notions sont à la base de l'approche totalement désagrégée introduite au chapitre précédent. La Figure 5.4 montre un exemple de l'application des concepts de la modélisation totalement désagrégée et de l'ontologie des transports pour illustrer les différentes perspectives de l'analyse des effets redistributifs associés à l'usage d'un réseau routier urbain. Les concepts de l'approche totalement désagrégée sont donc utilisables dans le cadre d'une approche ontologique.

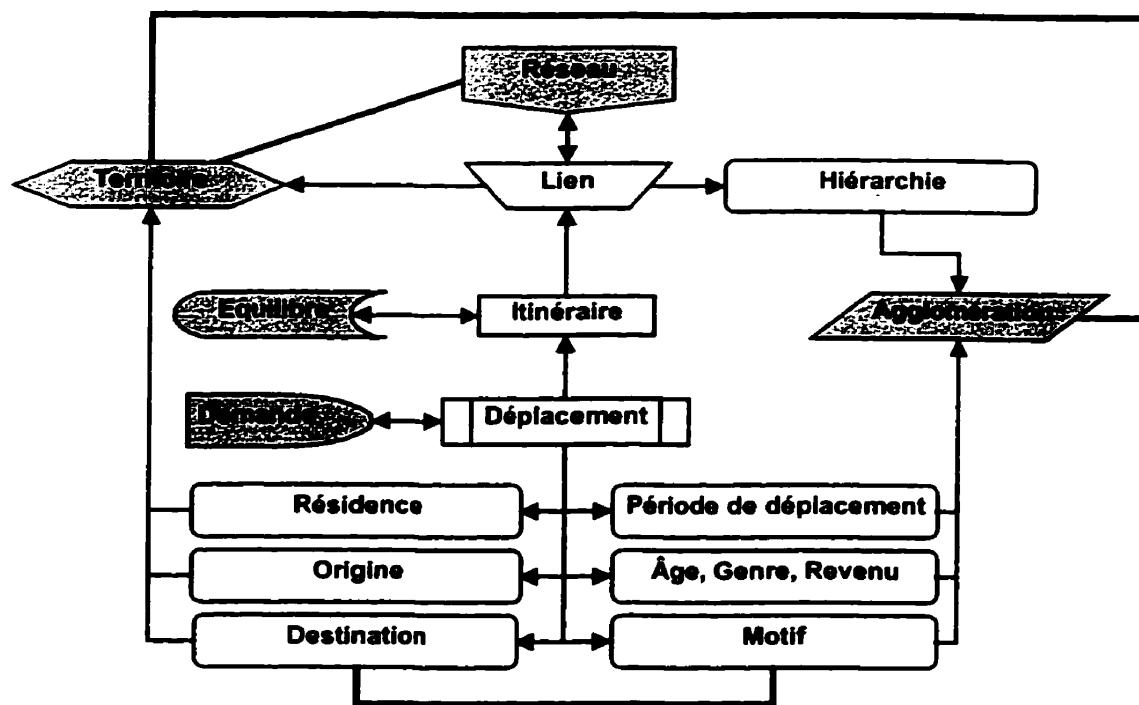


Figure 5.4 : Éléments de l'approche totalement désagrégée utilisés dans l'approche ontologique

5.3.6 La modélisation totalement désagrégée orientée-objets

La modélisation totalement désagrégée orientée-objets peut être vue comme une application pragmatique de l'approche ontologique. Chapleau et al. (1998) introduisent la modélisation floue totalement désagrégée orientée-objets. Ils définissent quatre types de classes d'objets impliquées dans des relations dynamiques spatiales :

- ◆ Les objets immobiles ou statiques qui ont une localisation fixe dans le temps et dans l'espace. Quelques exemples englobent les générateurs de déplacements et les codes postaux.
- ◆ Les objets dynamiques qui sont les acteurs de transport. Il s'agit des groupes de personnes, des objets moteurs tels que les voitures ou les autobus et les objets transportés tels que les marchandises.
- ◆ Les objets cinétiques qui décrivent le mouvement. Il s'agit d'objets tels que voyage, lien, chemin, route.
- ◆ Les objets systémiques qui sont des groupements d'objets et de relations. Ils peuvent être opérationnels tels que le réseau; informationnels tels que l'enquête; ou globaux tels que le système urbain.

Des méthodes sont appliquées à ces classes et objets. Ces mêmes méthodes sont organisées dans des applications analytiques et utilisent des technologies souples et évolutives (Trépanier et al., 1997).

L'aspect flou confère à cette approche une souplesse et lui permet de travailler sans une définition préalable du type ou de la quantité de données requises. Ces possibilités sont permises grâce à des bases de données orientées-objets bien structurées.

5.4 La place du "data mining" dans une analyse multi-perspective

Le **data mining** est défini comme la recherche d'informations de valeur à l'intérieur d'un grand volume de données (Weiss et al., 1998). Dans le cas des transports, une composante fondamentale de l'approche informationnelle multi-perspective concerne la manipulation de bases de données sur le territoire, le réseau et la demande. Il est clair donc que l'exploration de ces données constitue un défi majeur pour l'analyste des transports.

Les données sont généralement stockées dans des "entrepôts" de données. Ces entrepôts sont mis à jour régulièrement et peuvent même l'être en temps réel. L'usage de cartes à puce, par exemple, peut fournir des informations en temps réel sur les déplacements qui doivent être stockées immédiatement. Cependant, avant de les mettre dans l'entrepôt, les données brutes doivent subir un traitement particulier qui se fait généralement en quatre étapes (Weiss et al., 1998) comme l'illustre la Figure 5.5 :

- ◆ Extraction : les données sont extraites de sources différentes et sous différents formats. Les données opérationnelles des compteurs à bord des véhicules de transport en commun peuvent consister en des fichiers numériques hexadécimaux par exemple.
- ◆ Transformation : les données sont transformées en données uniformes et compréhensibles pour supporter les décisions.
- ◆ Nettoyage : les enregistrements sont validés, ceux erronés sont corrigés sinon éliminés.
- ◆ Intégration : les données qui proviennent de différentes sources sont intégrées dans l'entrepôt central.

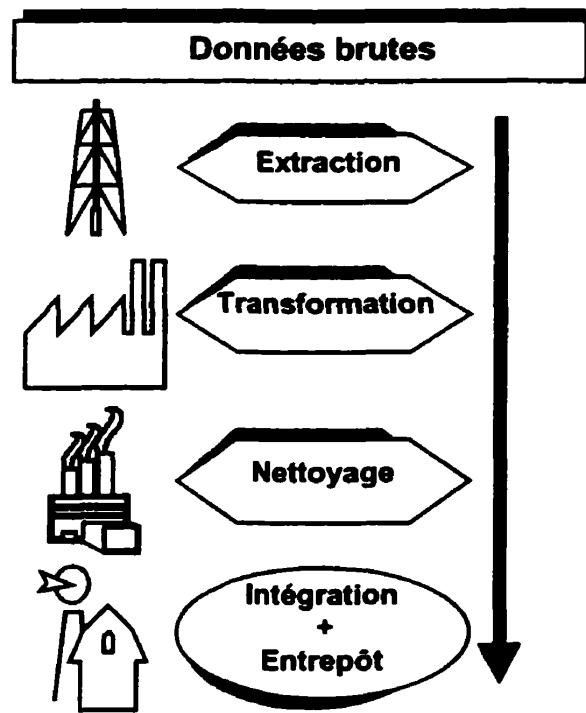


Figure 5.5 : Traitement des données jusqu'à l'intégration

Les problèmes du data mining sont souvent répertoriés en deux catégories: la prédiction et la découverte de connaissances. La prédiction sert surtout à prendre une décision en se basant sur des enregistrements antérieurs, alors que la découverte de connaissances sert comme étape d'aide à la décision.

Toute manipulation de données, surtout dans le cas de la prédiction, est faite en quatre étapes : (1) la préparation de données, (2) la réduction des données, (3) la modélisation et la prédiction et (4) l'analyse.

5.5 Conclusion

Le paradigme informationnel fournit un cadre favorable pour une analyse intelligente des transports, et en particulier l'analyse multi-perspective. Cette dernière consiste à analyser le système de transport sous différents angles tout en intégrant des méthodes variées et complémentaires. Elle est basée sur quatre éléments de base qui sont les choses, les propriétés, les conceptions et les perspectives.

L'approche ontologique est empruntée à la philosophie pour conceptualiser les éléments fondamentaux de l'analyse multi-perspective, et surtout les choses et les propriétés. L'ontologie considère que le monde est composé de substances (choses) et régi par des accidents (relations et propriétés). L'application de l'approche ontologique aux transports permet donc de définir les objets systémiques, leurs attributs et les relations statiques et dynamiques qui les gouvernent. Cette approche permet en plus de définir des relations dites méréotopologiques qui expliquent les interactions spatio-temporelles du système de transport.

L'analyse multi-perspective se sert de bases de données assez importantes et exigeant des méthodes performantes de gestion et d'exploitation. La technique du data-minig a été explorée dans ce chapitre.

L'importance et la validité d'une analyse multi-perspective combinée avec une approche ontologique peuvent être vérifiées en examinant des problèmes relatifs au système de transport. Le problème de l'étalement urbain est un bon exemple où l'application d'une approche ontologique serait pertinente. Dans la suite, cette recherche adopte l'approche totalement désagrégée et réalise des expérimentations pragmatiques afin d'évaluer les effets redistributifs de l'usage d'un réseau routier urbain. L'approche ontologique est parfois explicitement utilisée, mais souvent vient implicitement guider cette recherche.

CHAPITRE 6 :

MÉTHODOLOGIE PRAGMATIQUE POUR LA MESURE DES EFFETS REDISTRIBUTIFS D'UN RÉSEAU ROUTIER URBAIN

La mesure des effets redistributifs d'un réseau routier urbain fait partie d'une classe particulière de problèmes de transport où le seul moyen valide de les aborder consiste à adopter une méthode informationnelle et comportementale. En effet, ce type de problèmes exige une connaissance fine du système de transport et de ses interactions.

En ce qui concerne les transports urbains, et en particulier le transport de personnes, l'adoption d'une approche totalement désagrégée permet de cerner le problème de redistribution en se servant d'outils d'analyse informationnels. En effet, avec cette approche, une infinité d'objets de transport est identifiée et s'avère traitable. L'enjeu est donc le développement d'instruments de traitement et d'analyse.

Le problème peut être divisé en deux parties. D'une part, il y a la conception de gestionnaires de bases de données orientées transport. D'autre part, il y a le développement d'applications, de fonctions et de méthodes.

En somme, la concrétisation de la méthodologie adoptée est faite en se servant de fonctions analytiques et de gestionnaires de bases de données. Le présent chapitre décrit le cadre méthodologique désagrégé utilisé pour mener l'analyse et présente quelques exemples de fonctions de transport et de méthodes de gestion de bases de données.

6.1 Cadre méthodologique d'analyse

Il s'agit de concevoir une méthode analytique permettant d'apprécier et de mesurer la redistribution des coûts et des bénéfices de l'usage d'un réseau routier urbain selon plusieurs perspectives, et plus précisément selon les perspectives suivantes: territoire, réseau, temps et catégories d'usagers. Cette méthode analytique consiste en une classe de fonctions analytiques dont certaines sont adoptées à partir de méthodes d'analyse déjà existantes, et d'autres sont construites spécialement pour les fins de ce projet de recherche.

De par sa nature, cette méthode d'analyse exige des données fines et détaillées sur le territoire, l'offre et la demande. Ce type de données est accessible en adoptant l'approche totalement désagrégée. Le point de départ de cette analyse est donc:

- ◆ Un territoire finement géocodé au niveau des coordonnées x et y. Les limites des objets spatiaux ainsi que de tous les territoires, au sens ontologique, sont connues d'une manière mathématique ou thématique.
- ◆ Un réseau finement modélisé par des nœuds au niveau de leurs coordonnées x et y. Chaque lien est identifié par ses deux nœuds extrêmes. Le réseau est hiérarchisé en classes de routes. Chaque route est définie par une succession de liens, appartient à une classe hiérarchique et possède un niveau de service donné.
- ◆ Une demande totalement désagrégée contenue dans un fichier général de déplacements. Ce fichier contient également un certain nombre d'attributs socio-économiques de la personne qui se déplace ainsi que les coordonnées x et y de tous les objets spatiaux relatifs au déplacement.
- ◆ Un équilibre entre l'offre et la demande qui correspond à une reconstitution des déplacements déclarés ou observés. Pour chaque déplacement, sont connus: le point d'origine, le point de destination, les points d'accès au réseau et la séquence

des noeuds utilisés, et par conséquent, la séquence des liens empruntés ainsi que leurs hiérarchies.

- ◆ Un fichier de statistiques générales qui peut être utilisé pour enrichir tous les aspects du système de transport par recouplements de données à l'aide de dictionnaires ou des requêtes spéciales.
- ◆ Une description du mécanisme de financement des infrastructures de transport pour l'évaluation du système actuel.

Les données de base peuvent avoir subi des traitements plus ou moins avancés. Les seuls traitements considérables sont supposés être la validation des données sur le territoire, le réseau et la demande en plus de la reconstitution et la simulation de l'équilibre entre l'offre et la demande.

La suite de ce chapitre contient une tentative de développement d'une méthodologie pragmatique pour le traitement et l'exploitation de ces données afin d'analyser les effets redistributifs de l'usage d'un réseau routier urbain.

6.2 Formalisation du problème

6.2.1 Formulation ontologique

La formulation ontologique du problème consiste à identifier les substances et les accidents du domaine des transports routiers urbains. Autrement dit, cette formulation identifie les éléments systémiques fondamentaux, leurs propriétés, leurs attributs et les relations qui les gouvernent. Le regroupement de substances constitue des classes et des systèmes. La notion de territoire est utilisée dans le cas de la perspective spatiale, tandis que la notion d'agglomération est mieux adaptée quand il s'agit des perspectives: temps, réseau ou demande.

6.2.2 Points et polylignes

L'élément ontologique fondamental d'une modélisation spatiale objective du système de transport routier urbain est le point qui est défini par ses coordonnées dans un référentiel spatial arbitrairement choisi. Le point est aussi au cœur de l'approche totalement désagrégée, car il permet de se débarrasser de toute limitation qui serait due à un système zonal par exemple.

Le deuxième élément fondamental est la polyligne. Une polyligne droite est une séquence de segments de droites qui relient deux points successifs d'une séquence ordonnée de points. Une polyligne peut être utilisée pour modéliser la frontière d'un territoire donné, comme elle peut modéliser une rue, un lien, une route ou un chemin. Traitées à partir d'une perspective territoriale, les polylignes peuvent représenter les découpages géopolitiques, les découpages de statistiques générales ou les codes postaux.

Selon l'approche ontologique, des accidents non-relationnels et relationnels caractérisent le point et la polyligne. Ainsi, des attributs sont associés à ces deux substances. Un point est naturellement caractérisé par ses coordonnées x et y. Les attributs d'une polyligne dépendent de la réalité qu'elle représente. Une polyligne qui représente une route a comme attribut son niveau de service, sa largeur ou le nombre de voies qu'elle contient. Par ailleurs, des méthodes (accidents relationnels) peuvent être appliquées à cette polyligne comme, par exemple, le calcul de sa longueur. Dans certains cas, des méthodes peuvent affecter à la fois des points et des polylignes. La distance cartésienne entre un point est une droite en est un exemple. Le Tableau 6.1 contient quelques éléments d'une modélisation ontologique des points et des polylignes.

Tableau 6.1 : Modélisation des éléments ontologiques de base

Substance	Accidents non-relationnels	Accidents relationnels
Point	<ul style="list-style-type: none"> ◆ x ◆ y 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Analyse de proximité ◆ Analyse d'appartenance ◆ Plus proche voisin
Polyligne	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Séquence de sommets ◆ Identificateur ◆ Largeur ◆ Niveau de service ◆ Vitesse d'écoulement libre 	<ul style="list-style-type: none"> ● Longueur, périmètre ◆ Surface ◆ Centre de gravité, centroïde ◆ Appartenance d'un point ◆ Agrégation d'attributs ◆ Analyse statistique ◆ Fusion ◆ Analyse de juxtaposition ◆ Analyse de voisinage ◆ Analyse de connexité ◆ Matrice d'adjacence ◆ Densité de noeuds

6.2.3 Modélisation du territoire

Un territoire est un objet spatial fiat qui doit son existence à une intervention humaine. Il est défini par une ou plusieurs polylinéaires qui délimitent sa frontière. Un territoire possède d'abord un certain nombre d'attributs intrinsèques tels que son identificateur ou les coordonnées de ses sommets. Par ailleurs, il est possible de définir deux types de méthodes qui s'appliquent à un territoire :

- ◆ Des méthodes analytiques intrinsèques et élémentaires telles que le calcul du périmètre, de la surface, du centre de gravité, des moments d'inertie ou de la variance écologique.
- ◆ Des méthodes analytiques plus complexes entre deux ou plusieurs territoires telles que les relations méréotopologiques de juxtaposition, d'appartenance, et de chevauchement ou des méthodes plus sophistiquées comme la fusion de territoires.

6.2.4 Modélisation du réseau

Le réseau est modélisé par des nœuds, des liens et des routes hiérarchisées avec des attributs intrinsèques tels que la vitesse à l'écoulement libre ou le débit de saturation. Les méthodes appliquées au réseau sont aussi de deux ordres. D'abord, il y a les méthodes non-relationnelles qui fournissent des descriptions de l'élément du réseau. A ce sujet, des méthodes analytiques peuvent calculer la longueur d'un lien ou d'une route ou le temps d'écoulement libre. Ensuite, il y a les méthodes relationnelles plus sophistiquées qui peuvent, par exemple, fournir l'appartenance territoriale d'un nœud ou d'un lien ou faire une analyse de proximité.

6.2.5 Modélisation des déplacements

Les déplacements sont identifiés par un identificateur unique et possèdent des attributs intrinsèques tels que le lieu de résidence de la personne qui se déplace. Les méthodes sur les déplacements fournissent l'appartenance territoriale du lieu de résidence ou regroupent des déplacements selon des critères sur leurs attributs. Ontologiquement, il serait question d'agglomérations telles que les femmes, les hommes, les groupes d'âge, les classes de revenu ou les déplacements effectués pendant une période donnée de la journée.

6.2.6 Modélisation de l'équilibre

L'application de méthodes sur les itinéraires des déplacements désagrégés est sans doute la plus importante. Ces méthodes peuvent faire appel à d'autres méthodes qui s'appliquent sur le territoire, le réseau et les déplacements.

Des méthodes pouvant être appliquées selon différentes perspectives sont considérées. Pour un territoire donné, tous les liens qui le traversent sont identifiés ainsi que leurs attributs, et surtout leurs classes hiérarchiques. Ensuite, pour chaque lien, tous les

déplacements qui l'empruntent sont identifiés. Puis, pour chaque déplacement, son point d'origine, son point de destination, son lieu de résidence et tous les autres attributs socio-économiques sont extraits. Ces méthodes d'identification et d'extraction des utilisateurs du réseau permettent d'évaluer :

- ◆ L'usage du réseau routier situé sur un territoire donné par des déplacements selon leurs territoires d'origine, de destination et de résidence.
- ◆ L'usage du réseau ou d'une partie du réseau selon des agglomérations de la demande qui correspondent à des classes de déplacements, selon leurs motifs, ou de personnes qui se déplacent selon leurs attributs socio-économiques (niveau de revenu, genre et âge par exemple).
- ◆ L'usage d'une classe hiérarchique du réseau ou d'une infrastructure selon l'appartenance géopolitique et juridictionnelle des personnes qui se déplacent.
- ◆ Les patrons des usagers et des déplacements telles que la distribution des distances ou des heures de départ.

Dans le cas d'une perspective territoriale, il est possible d'évaluer les effets de débordement entre des territoires différents ainsi que le bilan de consommation d'un territoire donné par rapport à tous les autres territoires tel qu'illustré à la Figure 6.1. Ce bilan peut être fait pour différentes variables de consommation telles que la variable véhicules-kilomètres. Le bilan peut également être fait pour une classe spéciale du réseau. Si le bilan est positif, le territoire en question déborde sur les autres territoires, s'il est négatif, le territoire accuse un déficit de consommation. Un bilan peut aussi être réalisé pour évaluer le débordement entre deux territoires.

L'usage peut également être mesuré par rapport à la population du territoire en question; il s'exprime dans ce cas en véhicules-kilomètres per capita par exemple.

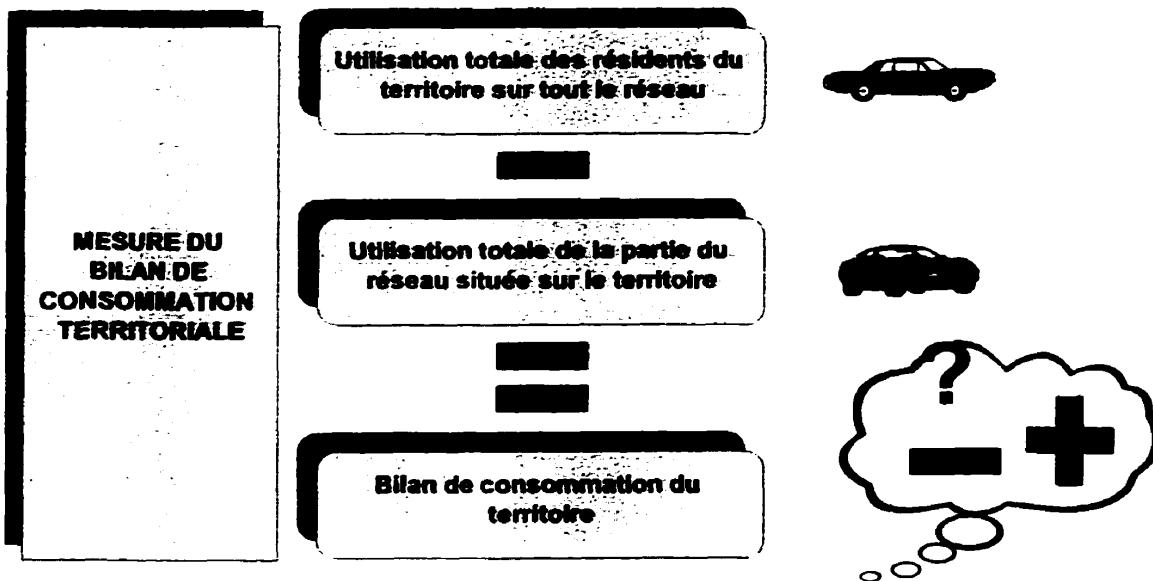


Figure 6.1 : Bilan de consommation territoriale

6.3 Quelques méthodes analytiques sur les points et sur les polylignes

La formulation du problème de redistribution comprend le traitement analytique des objets de base à savoir : les points et les polylignes. Cette partie contient la description de quelques fonctionnalités analytiques utilisées pour le traitement de bases de données sur ces deux types d'objets.

Un point M est défini par ses coordonnées (x,y) dans un référentiel donné. Une polyligne est une succession de n segments joignant dans un ordre donné des points A_1, A_2, \dots, A_n , ou de $n-1$ segments si la polyligne est ouverte. Les coordonnées d'un point A_i sont notées (x_i, y_i) . Une polyligne peut représenter un lien, une route ou une ligne

de transport en commun. Quant au territoire, il est défini par une ou plusieurs polylinéaires fermées qui sont aussi appelées polygones.

- ◆ La méthode Polyligne.Longueur : cette méthode calcule la longueur euclidienne d'une polylinéaire. Elle sert à calculer la longueur d'un lien ou d'une route par exemple ou le périmètre d'un territoire. Sa formulation mathématique est simple. Il s'agit tout simplement de calculer les distances entre les sommets successifs de la polylinéaire et de les additionner.

$$\text{Polyligne.Longueur} = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} + \delta \sqrt{(x_1 - x_n)^2 + (y_1 - y_n)^2}$$

Avec $\delta=1$ si la polylinéaire est fermée, et 0 sinon

- ◆ La méthode Polyligne.Surface : cette méthode calcule la surface de l'aire définie par la polylinéaire. Si cette dernière n'est pas fermée, la surface est nulle. Cette méthode appliquée aux territoires par exemple permet d'évaluer les densités par unité de surface. La formulation mathématique adoptée ici calcule l'aire selon la formule du produit vectoriel et suppose que le polygone n'est pas croisé.

$$\text{Polyligne.Surface} = \left| \sum_{i=1}^n (x_i y_{i+1} - y_i x_{i+1}) \right|$$

Avec $(x_{n+1}, y_{n+1}) = (x_1, y_1)$

- ◆ La méthode Polyligne.Centroïde : cette méthode calcule les coordonnées du centroïde de la polylinéaire. Elle est appliquée aux territoires et aux zones. La formulation mathématique utilise la formule du centre de gravité.

$$\text{Polyligne.Centroïde} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right)$$

- ◆ La méthode Polyligne.Point : cette méthode permet de vérifier si un point donné est à l'intérieur ou à l'extérieur d'un polygone. Elle est d'une utilité extrêmement importante quand il s'agit d'analyser l'appartenance d'un point à un territoire donné. Soit un polygone quelconque mais défini par une séquence ordonnée de points qui représentent ses sommets. Soit un point donné M. L'idée est de tracer une demi-droite infinie quelconque d'origine M, et de compter le nombre k d'intersections entre cette demi-droite et les côtés du polygone. Si k est pair, alors le point M est à l'extérieur du polygone. Si k est impair, alors le point M est à l'intérieur du polygone. Cette méthode est valable quel que soit le type du polygone. La Figure 6.2 montre quelques situations souvent rencontrées.

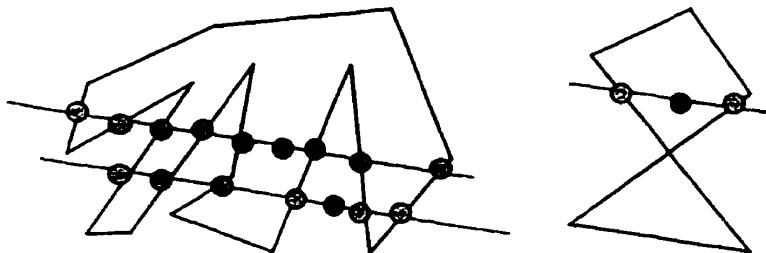


Figure 6.2 : Vérification si un point est intérieur à un polygone

- ◆ La méthode AgrégationSpatiale : cette méthode effectue une agrégation spatiale d'un ou de plusieurs attributs de points intérieurs à un polygone donné. L'agrégation peut être une sommation simple, comme elle peut consister à appliquer une fonction plus avancée, et plus particulièrement les fonctions statistiques. La formulation analytique consiste en une requête spéciale effectuée sur la base de données.
- ◆ La méthode CheminLePlusCourt : cette méthode est appliquée à un réseau et calcule le chemin le plus court entre deux points en tenant compte des coûts sur chaque lien. Il s'agit d'une méthode analytique avancée qui utilise l'algorithme de Dijkstra par exemple.

Enfin, la plupart des fonctions appliquées aux bases de données utilisent des requêtes spéciales ou des tableaux croisés dynamiques.

6.4 Les systèmes de gestion des bases de données

La méthodologie utilisée dans le cadre de cette recherche utilise des bases de données assez importantes. Afin d'en tirer le maximum d'informations, un système de gestion de bases de données (SGBD) est indispensable. En effet, un système de gestion de bases de données permet de réaliser trois fonctions fondamentales : la consolidation, le partage et la protection des données. Dans le cas d'un SGBD orienté transport, la consolidation permet de combiner et d'unifier des données qui proviennent de différentes sources, et qui traitent des objets différents. La consolidation permet de structurer les fichiers de déplacements tels que ceux des enquêtes origine-destination ainsi que les fichiers sur les territoires, le réseau et les itinéraires simulés. Le partage permet l'accès intelligent aux données par l'analyste selon sa perspective d'analyse. Enfin, la protection permet de conserver l'intégrité des données et de les récupérer en cas d'accidents.

L'organisation des données concerne la forme de leur structure. Plusieurs modèles d'organisation existent, et l'organisation peut être hiérarchique, sous forme de réseau ou relationnelle. La structure relationnelle reste très bien adaptée au cas des bases de données orientées transport.

L'extraction et le traitement des données sur la mobilité reste un défi majeur dans le cadre d'une approche informationnelle. En effet, il s'agit d'adopter des méthodes sophistiquées, et d'user dans les méthodes intelligentes d'exploitation pour utiliser les données d'une manière pertinente dans le contexte de la mesure des effets redistributifs. Le schéma de la Figure 6.3 illustre les principales étapes de l'exploitation des données pour les utiliser dans le cadre du présent projet. Il est question de données sur le territoire, le réseau et les déplacements. Ces données sont validées, et celles pertinentes pour cette recherche sont extraites et analysées.

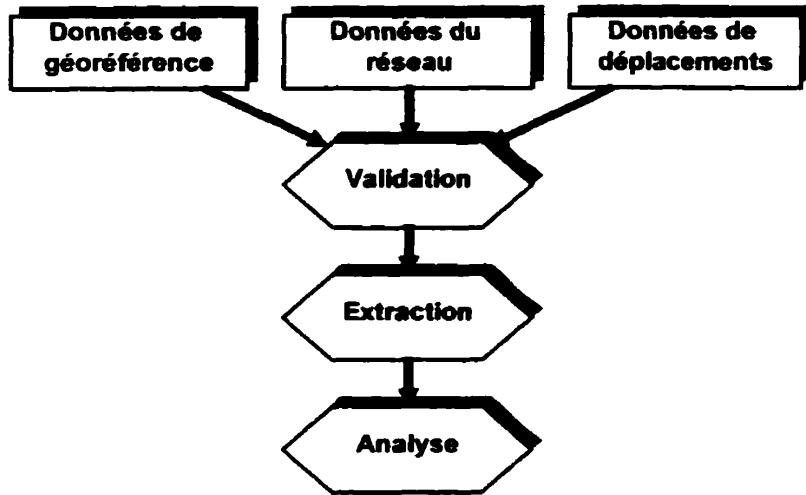


Figure 6.3 : Exploitation des données pour la mesure des effets redistributifs

6.5 Conclusion

Ce chapitre a exposé quelques applications orientées transport qui permettent d'analyser les effets redistributifs de l'usage d'un réseau routier urbain. La modélisation est basée sur des données individuelles sur la mobilité. Les fonctionnalités analytiques utilisent les notions de point et de polyligne. Les objets du système de transport sont définis d'une manière thématique ou mathématique. L'expérimentation se sert de bases de données structurées et relationnelles. La gestion de ces bases données et l'application de procédures de sélection, d'extraction et d'exploitation permettent l'évaluation objective des variables de redistribution.

CHAPITRE 7 : EXPÉRIMENTATION ET RÉSULTATS

Afin de vérifier la méthodologie développée pour l'analyse des effets redistributifs de l'usage d'un réseau routier urbain, une expérimentation est réalisée en utilisant des données sur la mobilité dans la Grande région de Montréal.

La méthodologie se sert des informations issues de l'enquête téléphonique origine-destination réalisée dans la Grande région de Montréal en 1993. Elle considère un sous-ensemble de déplacements correspondants à ceux effectués en automobile en période de pointe du matin (entre 6 h 00 et 8 h 59). Elle utilise également un réseau routier hiérarchisé. Les impédances sur les liens correspondent aux temps de parcours à l'équilibre. Des pénalités de correspondances entre classes de routes sont ajoutées. La méthodologie utilise le modèle MADITUC comme cadre général d'analyse. Elle se sert du sous-modèle MAD(strat)² pour reconstituer les itinéraires déclarés.

La mesure des effets redistributifs exploite le fichier général des itinéraires et se fait selon différentes perspectives. Tout d'abord, l'utilisation du réseau selon les quatre types de routes est mesurée. Puis, la mesure des débordements entre secteurs et régions est entreprise. Ensuite, l'évaluation de l'usage de quelques tronçons ou types d'infrastructures est réalisée selon le lieu de résidence et la destination. Enfin, l'analyse s'intéresse à l'usage du réseau selon le sexe et l'âge de la personne qui se déplace.

Les exemples de ce chapitre sont donnés à titre d'illustration seulement et ne peuvent par conséquent se substituer à une démarche systémique plus rigoureuse.

7.1 Données de l'expérimentation

7.1.1 Le contexte

L'expérimentation de la méthodologie adoptée est réalisée en analysant le système de transport de la Grande région de Montréal (GRM). Ce choix a été entrepris en raison de la longue tradition unique à la Grande région de Montréal en matière des enquêtes de mobilité qui fournissent des données extrêmement riches et détaillées sur les patrons de déplacements dans la région. En outre, cette analyse utilise le modèle totalement désagrégé MADITUC (Modèle d'Analyse Désagrégée des Itinéraires de Transport Urbain Collectif) développé à l'École Polytechnique de Montréal et utilisé quotidiennement pour les fins de planification et d'analyse du système de transport montréalais.

Depuis 1970, la Grande région de Montréal réalise une enquête téléphonique origine-destination à grande échelle tous les 5 ans environ. L'échantillon moyen des ménages faisant l'objet de l'enquête est de 5%. L'enquête porte sur les déplacements effectués par chaque membre du ménage pendant une journée moyenne de la semaine. A la suite de chaque enquête, les déplacements d'environ 60 000 ménages sont validés parmi les 3 millions d'habitants que compte la Grande région de Montréal.

Depuis les années 1980, les enquêtes ont utilisé le système MADITUC comme instrument de géocodification et de validation interactives. L'enquête 1998 s'est servi d'une technologie informationnelle intégrée nouvelle. Elle est centrée autour de diverses composantes du système MADITUC pour la saisie des données; la géocodification et la validation interactives; le contrôle de l'échantillon; et le suivi et le contrôle de la qualité et de la productivité.

Le Tableau 7.1 présente une description sommaire des enquêtes origine-destination montréalaises avec la dernière en date réalisée en automne 1998.(Chapleau, 1995b et Chapleau et al., 1999).

Tableau 7.1 : Historique et méthodes des enquêtes téléphoniques origine-destination de la Grande région de Montréal

Enquête	Territoire	Population	Ménages	Échantillon	Enregistrements valides
1998	4 520 km ²	3 491 979	1 415 816	4,51%	ND
1993	3 500 km ²	3 132 054	1 268 336	4,65%	433 113
1987	3 297 km ²	2 930 273	1 141 866	4,68%	337 408
1982	3 341 km ²	2 895 899	1 071 305	6,98%	491 805
1978	2 331 km ²	2 954 184	1 031 975	5,31%	305 244
1974	2 331 km ²	2 835 403	899 918	4,78%	264 789
1970	1 286 km ²	2 484 462	730 158	3,62%	198 988

Méthodes

1998	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Saisie directe sur PC connectés au réseau ◆ Géocodification et validation interactives ◆ Contrôle continu de l'échantillon, de la qualité et de la productivité
1993	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Saisie directe sur terminal ; transmission de fichiers quotidiens; réalisation du terrain par une firme de sondage ◆ Géocodification interactive avec base géomatique (monuments, adresses, intersections, codes postaux) ◆ Récupération et validation interactive ◆ Validation interactive graphique des itinéraires TC
1987	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Géocodification des localisations au niveau du code postal : 70 000 points ◆ Formulaire manuscrits transcrits sur disquettes ◆ Traitement des données sur PC autour de bases de données générales ◆ Validation interactive des variables, et interactive graphique des déplacements TC à l'aide de MADITUC
1982	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Découpage zonal ad hoc (bassins des lignes de transport) : 1 500 zones ◆ Formulaire manuscrits transcrits sur fichiers ◆ Validation par terminal sous CMS ◆ Codification réseau façon MADITUC ◆ Traitement TRANSCOM pour validation ◆ Implication d'autres organismes
1978	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Découpage zonal ad hoc (bassins des lignes de transport) : 1 400 zones ◆ Formulaire manuscrits transcrits sur cartes perforées ◆ Validation par listing et cartes ◆ Précodification du réseau TC pour validation TRANSCOM
1974	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Découpage zonal : 1 200 zones ; ◆ Formulaire manuscrits transcrits sur cartes perforées ◆ Validation par listing et cartes
1970	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Découpage zonal ad hoc (bassins des lignes de transport) : 900 zones ◆ Formulaire manuscrits transcrits sur cartes perforées ◆ Validation par listing et cartes

Les données utilisées pour réaliser le présent exercice proviennent des informations tirées de l'enquête origine-destination 1993 de la Société de Transport de la Communauté Urbaine de Montréal (STCUM) et du Ministère des Transports du Québec (MTQ).

Les informations disponibles à partir de l'enquête 1993 sont:

- ◆ Pour chaque ménage, la localisation de la résidence, la taille du ménage, le nombre d'automobiles.
- ◆ Pour chaque personne du ménage, l'âge, le sexe, le statut, la possession automobile ou le permis de conduire.
- ◆ Pour chaque déplacement effectué par une personne du ménage, l'origine, la destination, le motif, les modes de déplacement et les heures de départ et de retour à domicile. Si le déplacement est effectué en transport en commun, le chemin emprunté et les points de correspondances. Si le déplacement est effectué en voiture en tant que conducteur, le pont emprunté si le déplacement en comprend un.

Ces informations sont traitées par une série de programmes de codification et de validation qui filtrent les éventuelles erreurs dans les itinéraires, les lieux ou les descriptions. Les fichiers résultants constituent une base de données de déplacements totalement désagrégés.

7.1.2 La demande utilisée dans l'expérimentation

La présente recherche utilise un sous-ensemble de déplacements correspondant à ceux effectués en mode voiture particulière en période de pointe du matin. Il s'agit donc des déplacements utilisant le mode automobile, et dont le départ est effectué entre 6h 00 et 8 h 59 inclusivement. L'extraction ne considère que la portion effectuée sur le réseau routier. En ce qui concerne les déplacements bimodaux, seule la partie automobile est conservée. Le fichier de déplacements contient typiquement les coordonnées d'origine et

de destination ainsi qu'un identificateur pour chaque déplacement. Au total, 49604 enregistrements ont été extraits correspondant à 967 916 déplacements.

7.1.3 Le territoire

L'objet spatial global de cette analyse est l'Île de Montréal et ses environs. Le territoire de l'analyse, au sens ontologique, est la Grande région de Montréal. Toutes les données territoriales sont traitées au niveau de leurs coordonnées x et y (système UTM et codes postaux). Les frontières des codes postaux et des entités géopolitiques sont définies par des polylinéaires de manière mathématique ou thématique.

Plusieurs sous-territoires sont considérés pour des fins d'analyse, et plus particulièrement 65 secteurs municipaux sont définis en plus d'au moins 6 secteurs correspondant à l'espace extérieur de la GRM ou aux parties des couronnes nord et sud ajoutées lors des enquêtes de 1993 et 1998 (Figure 7.1).

En plus du découpage à 65 secteurs, deux décompositions de la Grande région de Montréal ont été décidées. La première décomposition comporte huit sous-régions telles qu'illustrées sommairement à la Figure 7.1. Dans ce cas, le centre-ville de Montréal est isolé, et il est entouré d'une partie du Montréal-centre; les deux autres sous-régions de la Communauté urbaine de Montréal (CUM) sont l'Est de l'Île, d'une part, et l'Ouest et le Sud-ouest de l'Île, d'autre part. A l'extérieur de la CUM, il y a les deux territoires de la ville de Laval et de la Rive sud proche en plus des deux territoires des couronnes nord et sud éloignées. La deuxième décomposition consiste à traiter la CUM comme une sous-région entière, ce qui aboutit à cinq sous-régions comme illustrées à la Figure 7.1.

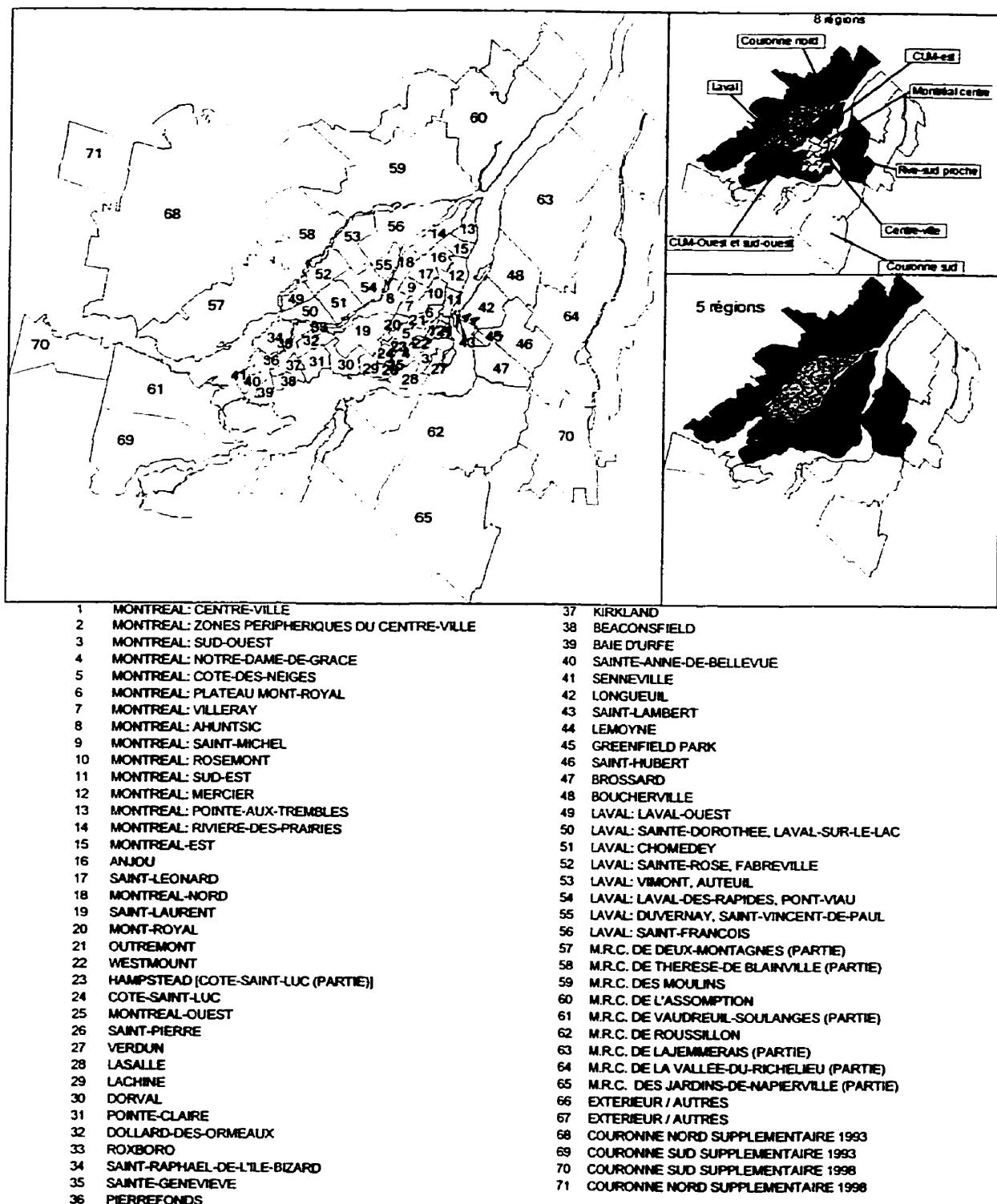


Figure 7.1 : Les territoires d'analyse de la Grande région de Montréal

7.1.4 Le réseau routier utilisé

La présente recherche s'intéresse au réseau routier de la Grande région de Montréal. Le réseau analysé est illustré à la Figure 7.2 et correspond à celui employé dans le logiciel MAD(strat)² du modèle MADITUC (Chapleau, 1994). Il comporte 514 rues, 8079 nœuds et 14 878 liens. Il est hiérarchisé selon quatre niveaux: 1) les autoroutes, 2) les routes principales, 3) les routes secondaires et 3) les rues locales. Ces niveaux hiérarchiques correspondent à des caractéristiques d'opération et à une appartenance juridictionnelle propre. Les temps de parcours associés aux liens sont des temps de congestion à l'équilibre.

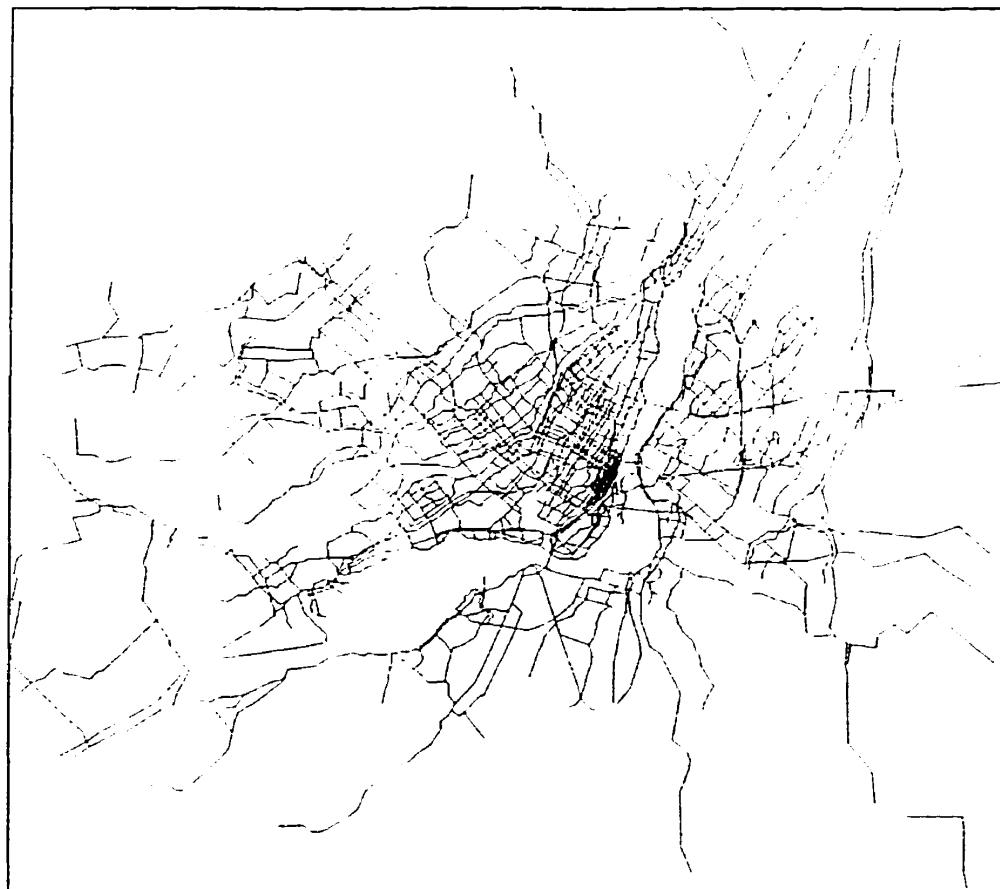


Figure 7.2 : Le réseau de simulation

7.1.5 La procédure de simulation

Les flots sont chargés sur le réseau à l'aide d'une affectation tout-ou-rien tenant compte des temps à l'équilibre sur les liens. Le module CHEMIN du logiciel MAD(strat⁹) est utilisé pour cette fin. Cette procédure a été expliquée au paragraphe 4.2.4. La Figure 7.3 est une représentation en trois dimensions, à l'aide de MADCADD, du profil de charge correspondant à la simulation de la présente analyse. Ce profil de charge met en évidence l'usage des axes routiers urbains principaux et en particulier les autoroutes urbaines. Il montre aussi l'usage des ponts reliant l'Île de Montréal aux rives nord et sud.



Figure 7.3 : Profil de charge en trois dimensions du réseau routier de la GRM en pointe du matin dans les deux directions

7.1.6 Les bases de données

Les données de l'analyse sont organisées dans plusieurs bases de données structurées et relationnelles. Le Tableau 7.2 contient la description des bases de données utilisées.

Tableau 7.2 : Les bases de données de l'expérimentation

Base de données	Champs
La base de données des déplacements	identificateur unique IPERE; feuillet, taille du ménage, nombre d'automobiles, secteur de résidence, coordonnées x et y de la résidence, âge et sexe de la personne qui effectue le déplacement, motif du déplacement, heure du départ, un attribut spécifiant si le déplacement est effectué en tant que conducteur ou passager, secteur d'origine du déplacement, les coordonnées x et y de l'origine du déplacement, secteur de destination, les coordonnées x et y de la destination du déplacement, facteurs d'expansion, statut dérivé décrivant si le déplacement est effectué par un travailleur, étudiant ou autre
La base de données des nœuds	le numéro du nœud, ses coordonnées x et y, les secteurs d'appartenance municipale ou de recensement
La base de données des liens	numéro du lien, les numéros des deux nœuds formant les extrémités du lien, la longueur du lien, un identificateur de la rue, le nom de la rue, la vitesse d'équilibre, la vitesse d'écoulement libre, la capacité du lien, le nombre de voies et la classe hiérarchique
La base de données des itinéraires	l'identificateur du déplacement IPERE, la séquence du déplacement, le numéro du lien emprunté, l'identificateur de la rue, la distance parcourue sur le lien, les secteurs d'appartenance de la première extrémité du lien: municipal et de recensement ainsi que les coordonnées de cette extrémité, les secteurs d'appartenance de la deuxième extrémité du lien et ses coordonnées
La base de données des secteurs municipaux et de recensement	Identification du secteur et description

7.2 Analyse multi-perspective

7.2.1 Perspective réseau

En considérant les quatre classes de routes, à savoir: les autoroutes, les routes principales, les routes secondaires et les rues locales, l'usage du réseau a été mesuré en termes de plusieurs variables, et plus particulièrement en passagers-kilomètres et véhicules-kilomètres. Le premier résultat qui ressort de cette analyse concerne l'usage dominant des autoroutes pour les déplacements simulés (Figure 7.4). En effet, comme le montre le Tableau 7.3, plus de la moitié des quelques 11 millions de véhicules-kilomètres consommés sur le réseau de la Grande région de Montréal est réalisée sur les autoroutes. La deuxième classe de routes la plus utilisée concerne les rues locales avec environ 25% de la consommation en véhicules-kilomètres.

La différence constatée quand la consommation est mesurée en termes de personnes-minutes vient du fait que la vitesse d'écoulement est plus élevée sur le réseau autoroutier. En effet, le Tableau 7.3 donne aussi la vitesse moyenne sur chacune des classes de routes. Elle est d'environ 66 km/h sur les autoroutes et n'est que de 35 km/h pour les rues locales. Quant au taux d'occupation, il est en moyenne égale à 1,20 passagers par véhicule. Cette valeur a été confirmée dans d'autres études sur la mobilité montréalaise.

Tableau 7.3 : Utilisation du réseau routier de la GRM en période de pointe du matin selon les types de route

	Consommation en personnes-kilomètres		Consommation en véhicules-kilomètres		Consommation en personnes-minutes		Occupation automobile moyenne	Vitesse moyenne (km/h)
Autoroutes	7 418 177	58%	6 286 048	59%	6 793 970	45%	1,18	66
Routes principales	1 632 787	13%	1 359 907	13%	2 063 260	14%	1,20	47
Routes secondaires	426 573	3%	362 115	3%	679 838	4%	1,18	38
Rues locales	3 327 504	26%	2 690 662	25%	5 628 696	37%	1,24	35
Tout le réseau	12 850 042	100%	10 698 733	100%	15 165 766	100%	1,20	51

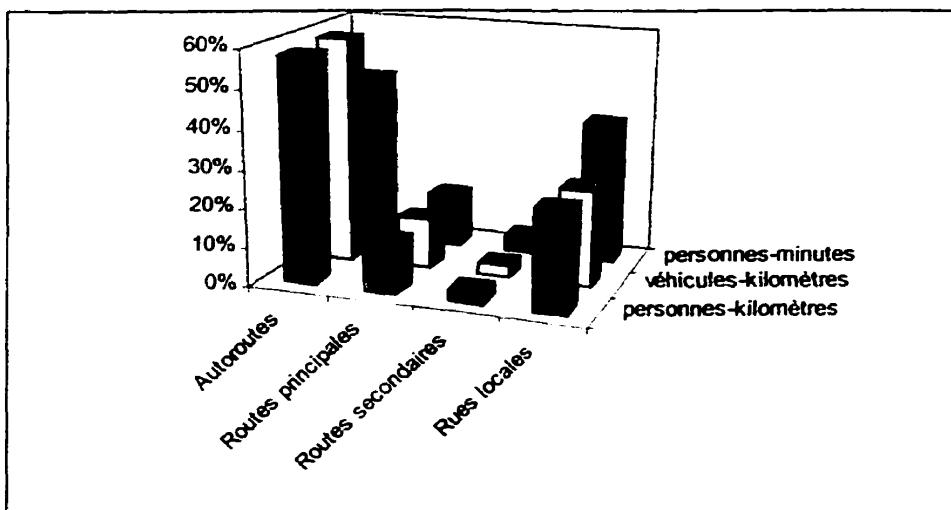


Figure 7.4 : Utilisation du réseau routier de la GRM en période de pointe du matin selon les types de route

7.2.2 Perspective territoire de résidence

L'analyse de l'usage du réseau routier selon le territoire de résidence est sans doute une des analyses les plus importantes dans l'évaluation des effets redistributifs.

L'analyse des résultats de la simulation permet de faire une première constatation concernant la distance moyenne de déplacement qui augmente quand l'origine du déplacement s'éloigne du centre-ville. En effet, les résultats de cette analyse montrent que les résidents des banlieues consomment la majeure partie du réseau routier. Plus encore, lors de leurs déplacements, ils utilisent des sous-réseaux situés sur des territoires de transit. Ce résultat est surtout vrai pour des territoires liés par des relations méréotopologiques de type séparation. Ainsi, par exemple, la ville de Laval enregistre un déficit par rapport à la Couronne nord. Selon la variable de consommation considérée, les résidents de la Couronne nord utilisent entre cinq et neuf fois plus le réseau situé sur le territoire de la ville de Laval que ce qu'utilisent les résidents de Laval sur le territoire de la Couronne nord. Cependant, la grande partie de la consommation est réalisée sur le

réseau autoroutier. De la perspective financement, le réseau autoroutier n'est pas pris en charge par les municipalités, ce qui réduit le débordement financier de la Couronne nord sur Laval. Néanmoins, Laval supporte des impacts indirects tels que les effets liés à la pollution par exemple.

Afin de mesurer les coûts supportés et les bénéfices reçus par les résidents d'un territoire donné, la variable population est ajoutée pour estimer la consommation et le bilan en véhicules-kilomètres per capita. La Figure 7.5 contient les résultats pour les cinq sous-régions de la GRM, pour chacun des quatre types de routes et pour le réseau global. Il en ressort que les résidents des deux couronnes nord et sud de Montréal ont un taux de consommation par résident au moins trois fois plus important que celui des résidents de la CUM. Ainsi, la CUM se retrouve avec un bilan par résident négatif traduisant un déficit par rapport aux autres sous-régions.

Le déficit par résident de la CUM se traduit en terme absolu par un débordement des quatre sous-régions sur le territoire de la CUM. La Figure 7.6 illustre ce phénomène et montre comment le rapport entre chacune des consommations des résidents des deux couronnes nord et sud et la consommation des résidents de la CUM sur ces deux territoires dépasse 500%. Dans la même perspective, Laval et la Rive sud proche débordent sur le territoire de la CUM de 232% et 137% respectivement.

Ce résultat est à mettre en parallèle avec les bénéfices de la CUM qui proviennent des attracteurs de déplacements situés sur son territoire tels que les industries et les centres d'affaires.

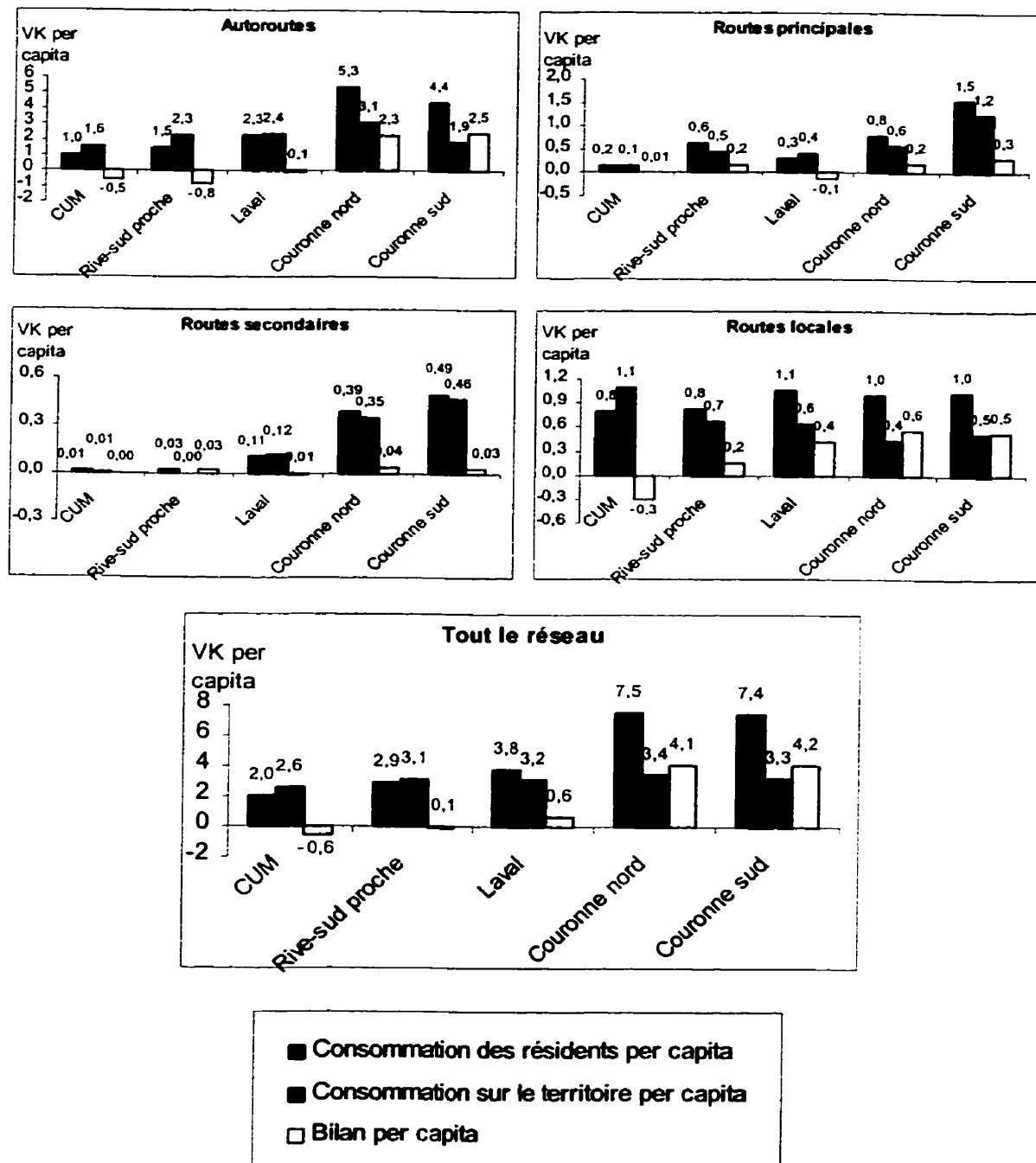


Figure 7.5 : Analyse de l'usage du réseau routier de la GRM en véhicules-kilomètres per capita pour les cinq régions en pointe du matin

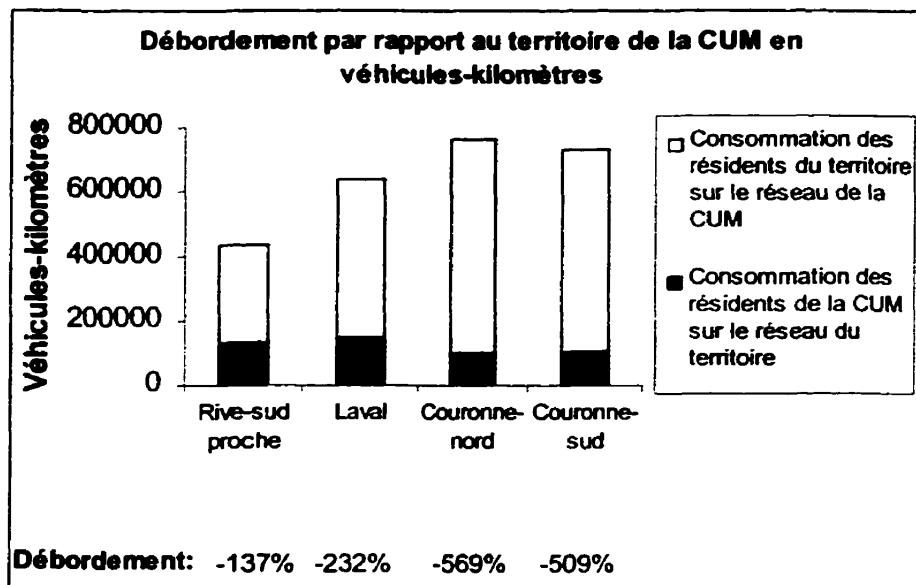


Figure 7.6 : Mesure du débordement des régions périphériques sur le territoire de la CUM en véhicules-kilomètres en pointe du matin

Dans le cas où les 65 secteurs sont considérés, et en considérant l'usage global des quatre types de routes, il apparaît que la plupart des secteurs situés sur le territoire de la CUM enregistrent un déficit de consommation tel qu'illustre à la Figure 7.7. Les secteurs éloignés du centre-ville utilisent le réseau routier d'une manière intense et sont les principaux bénéficiaires directs.

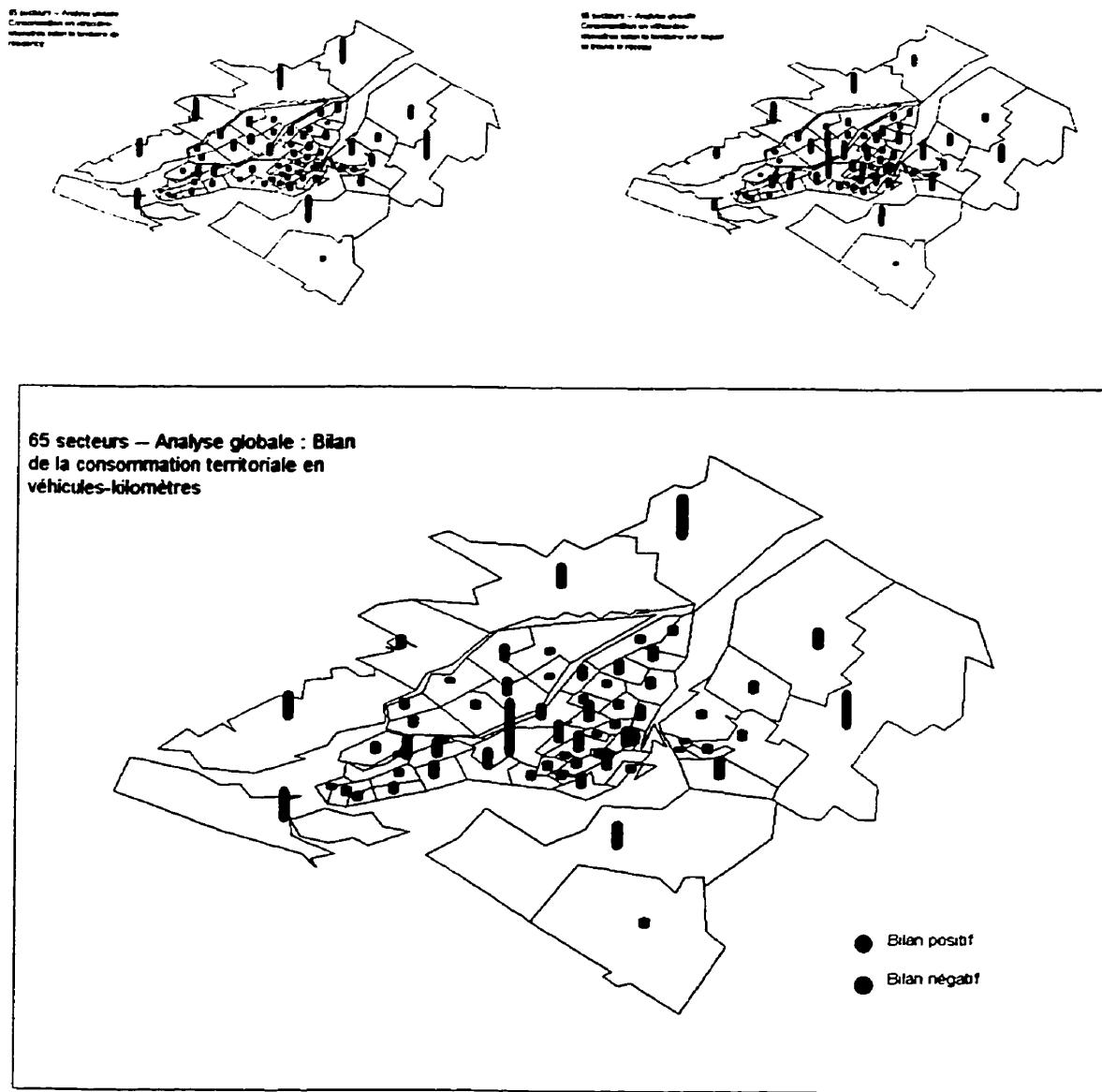


Figure 7.7 : Analyse de la consommation en véhicules-kilomètres pour les 65 secteurs de la GRM en pointe du matin

7.2.3 Perspectives Tronçon-Domicile-Destination

L'analyse de l'utilisation d'un tronçon en particulier selon le territoire de résidence et le territoire de destination combiné éventuellement avec le motif du déplacement permet de déduire les bénéficiaires directs et indirects de l'usage du tronçon en question. En effet, dans le cas d'un pont par exemple, cette analyse permet d'estimer la consommation selon le domicile des personnes qui se déplacent et en déduire les bénéficiaires directs. En analysant l'usage du pont selon la destination du déplacement, les bénéficiaires indirects tels que les générateurs de déplacements sont identifiés.

Dans le cadre de cette recherche, trois tronçons représentant chacun un type particulier d'infrastructure ont été choisis. Il s'agit du pont Champlain, du tronçon de l'autoroute Métropolitaine entre l'autoroute Décarie et l'autoroute des Laurentides et de la rue Notre-Dame.

7.2.3.1 Analyse de l'usage du pont Champlain

Le pont Champlain où se joignent les trois autoroutes 10, 15 et 20 relie la Rive sud à l'île de Montréal. En 1991, le pont Champlain avait un DJMA de l'ordre de 107200 véhicules (Bergeron et al., 1996).

La reconstitution des déplacements à l'aide du modèle MAD(strat) fait ressortir un usage du pont Champlain d'un peu plus de 150 000 véhicules-kilomètres en période de pointe du matin avec un taux d'occupation moyen de véhicule de 1,20. Cet usage correspond à environ 38 000 véhicules qui utilisent le pont entre 6 h 00 et 8 h 59 dans les deux directions. La méthode utilisée permet aussi de mesurer l'âge et le sexe moyens des usagers du pont. En effet, comme le montre le Tableau 7.4, l'âge moyen des usagers du pont Champlain est de 37,7 ans, alors que leur sexe moyen est de 1,36, où la valeur 1 correspond au sexe masculin et 2 au féminin. L'analyse permet en outre de montrer comment les conducteurs sont en majorité des hommes (sexe moyen: 1,29) alors que les passagers sont en majorité des femmes (sexe moyen: 1,69).

Tableau 7.4 : Quelques caractéristiques des usagers du pont Champlain

	Âge moyen	Sexe moyen
Passager	34,1	1,69
Conducteur	38,4	1,29
Total	37,7	1,36

L'utilisation du pont Champlain est dominée par les résidents de la Couronne sud avec 45% des véhicules-kilomètres enregistrés et de la Rive sud proche avec 39%. La Figure 7.8 illustre cette situation puisque les résidences des voyageurs qui empruntent le pont Champlain sont concentrées dans la rive sud de Montréal. Il faut préciser que la variable de résidence n'est pas une variable de transport mais un attribut du voyageur. Sans un modèle désagrégé, une analyse selon cette perspective ne serait pas possible.

Quand la perspective destination du déplacement est considérée, c'est la CUM qui domine avec 79% des véhicules-kilomètres, suivie de la Rive sud proche avec 10%. La Figure 7.9 montre une concentration des destinations dans le territoire de la CUM, et plus particulièrement au centre-ville : véritable attracteur de déplacements. En effet, le centre-ville attire pour lui seul environ 30% de tous les déplacements qui empruntent le pont Champlain.

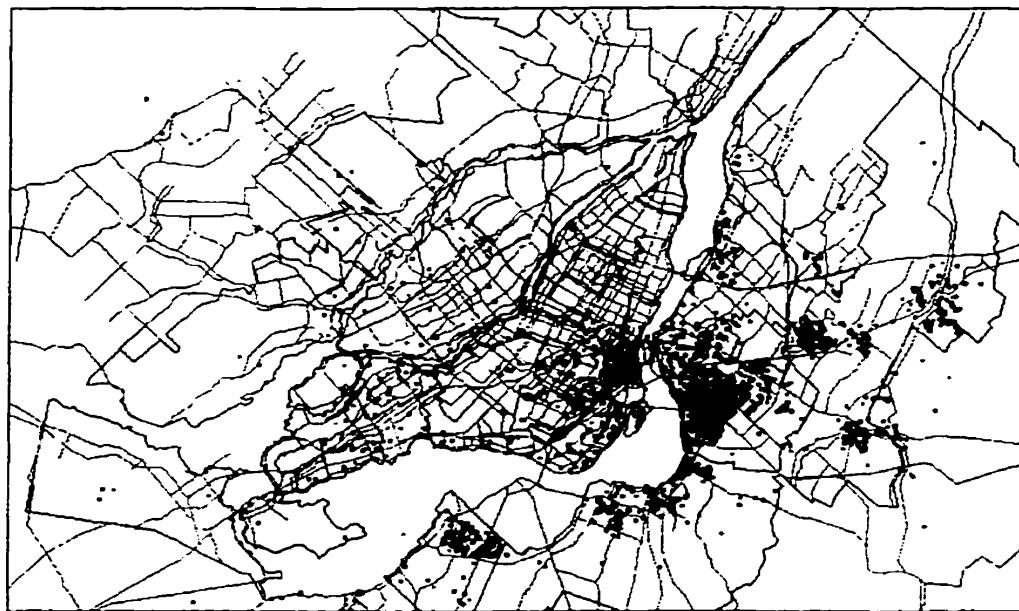


Figure 7.8 : Dispersion des résidences des voyageurs qui empruntent le pont Champlain en pointe du matin

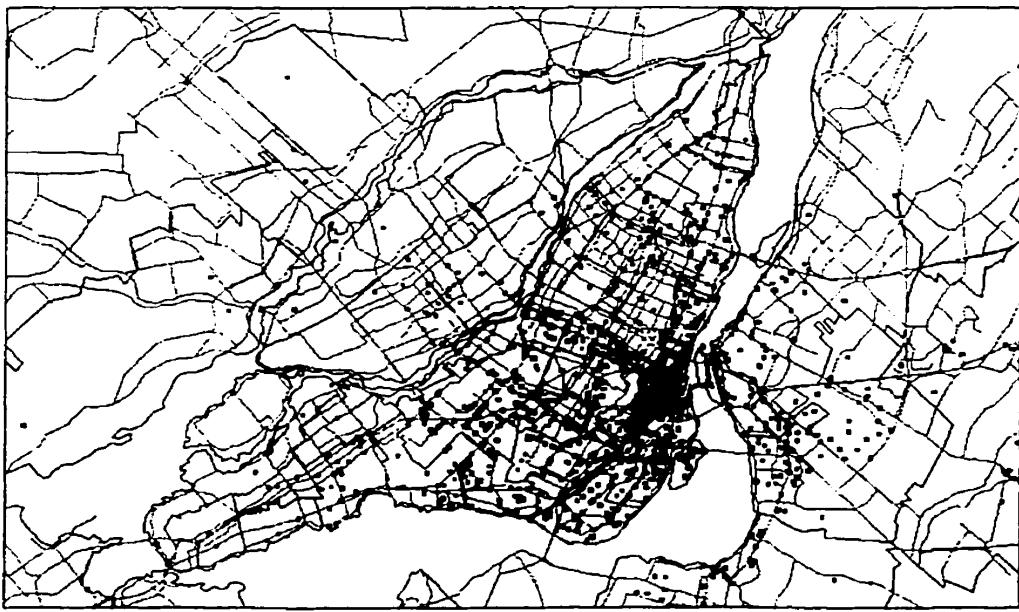


Figure 7.9 : Dispersion des destinations des voyageurs qui empruntent le pont Champlain en pointe du matin

7.2.3.2 Analyse de l'usage de l'autoroute Métropolitaine entre l'autoroute Décarie et l'autoroute des Laurentides

L'autoroute Métropolitaine est la section urbaine de l'autoroute 40. Le tronçon en étude concerne la section délimitée par les deux intersections avec l'autoroute 15. La reconstitution des déplacements à l'aide de MAD(strat)² montre qu'environ 86 000 véhicules-kilomètres sont consommés sur ce tronçon en pointe du matin chaque jour normal de la semaine. Cette consommation correspond à environ 34 000 véhicules qui utilisent la section dans les deux sens. Le modèle permet aussi de calculer l'âge et le sexe moyens des usagers de ce tronçon qui sont respectivement de 37,6 et 1,34 comme illustrés au Tableau 7.5. Le taux d'occupation moyen est de 1,18 passagers par véhicule.

Ce tronçon est majoritairement utilisé par les résidents de la CUM avec environ 66% des véhicules-kilomètres consommés. Les résidents de Laval viennent en deuxième position, avec 17%, suivis des résidents de la Couronne nord, avec 10%. Parmi les résidents de la CUM qui utilisent ce tronçon, ceux de la CUM centre consomment 29%, de la CUM ouest et sud-ouest 22%, et de la CUM est 15%. La Figure 7.10 montre que les résidences des usagers de ce tronçon se situent généralement sur le territoire de la CUM mais aussi à Laval avec, dans les deux cas, une concentration à proximité des axes routiers majeurs : les autoroutes 13, 15, 19 et 40, et les routes 117 et 335.

Ce même tronçon est utilisé à 87% par des déplacements à destination de la CUM, et à 5% à destination de Laval. À l'intérieur de la CUM, chacune des deux sous-régions CUM centre et CUM ouest et sud ouest attire des déplacements qui représentent environ 38% des véhicules-kilomètres consommés. La Figure 7.11 montre les situations des destinations des usagers de cette section d'autoroute. Elles sont en général sur les territoires de la CUM centre et de la CUM ouest et sud ouest en plus de Laval centre.

Tableau 7.5 : Quelques caractéristiques des usagers du tronçon de l'autoroute Métropolitaine entre Décarie et des Laurentides

	Âge moyen	Sexe moyen
Passager	30,7	1,63
Conducteur	38,8	1,29
Total	37,6	1,34



Figure 7.10 : Dispersion des résidences des voyageurs qui empruntent le tronçon de la Métropolitaine entre Décarie et des Laurentides en pointe du matin



Figure 7.11 : Dispersion des destinations des voyageurs qui empruntent le tronçon de la Métropolitaine entre Décarie et des Laurentides en pointe du matin

7.2.3.3 Analyse de l'usage de la rue Notre-Dame

La rue Notre-Dame est une artère principale du réseau routier urbain de l'Île de Montréal. Elle relie l'extrême nord-est au sud de l'Île. Il s'agit donc d'analyser le cas d'un tronçon urbain.

La reconstitution des déplacements qui empruntent la rue Notre-Dame montre qu'environ 270 000 véhicules-kilomètres sont consommés en période de pointe du matin d'une journée normale. L'âge moyen des usagers est de 38 ans alors que leur sexe moyen est de 1,39 comme le montre le Tableau 7.6.

Tableau 7.6 : Quelques caractéristiques des usagers de la rue Notre-Dame

	Âge moyen	Sexe moyen
Passager	33,5	1,71
Conducteur	38,9	1,32
Total	38,0	1,39

La Figure 7.12 montre l'intensité de l'utilisation de la rue Notre-Dame pendant la période de simulation qui correspond à la pointe du matin. Il en ressort que les résidents de Pointe-aux-Trembles sont les premiers utilisateurs avec plus de 16% en termes de véhicules-kilomètres suivis des résidents de la MRC de l'Assomption avec un peu plus de 10% de la consommation et enfin de Mercier avec environ 10% aussi. Les résidents des secteurs de Montréal Sud-ouest sont aussi d'importants utilisateurs de la rue Notre-Dame.

Quant à la perspective destination, c'est le centre-ville qui attire le plus de déplacements qui utilisent la rue Notre-Dame avec environ 31% des véhicules-kilomètres consommés. En second rang, la zone périphérique du centre-ville en attire quelques 12%.

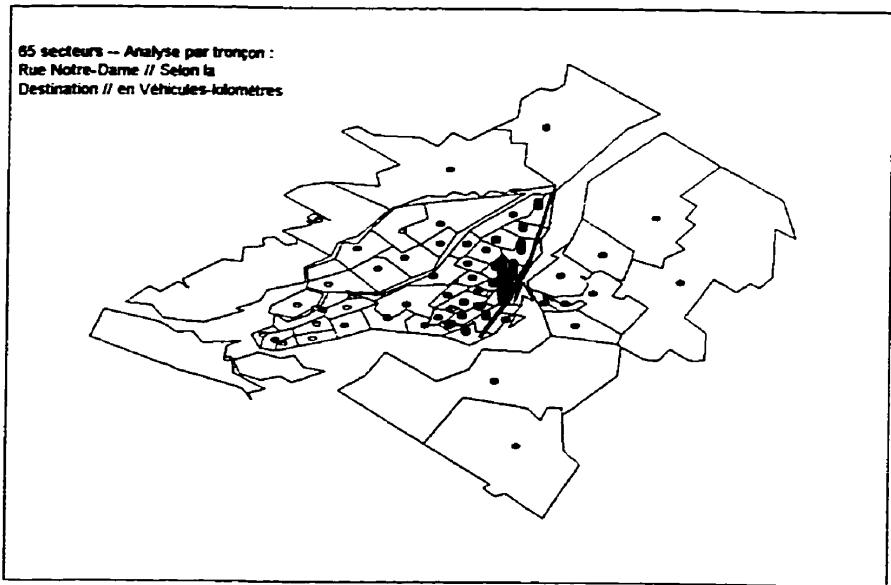
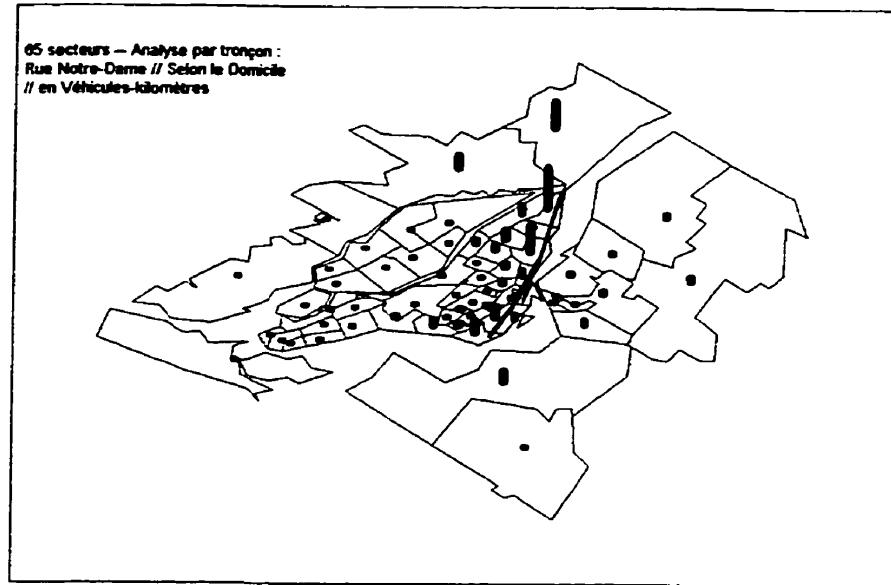


Figure 7.12 : Utilisation de la rue Notre-Dame selon les territoires de résidence et de destination en pointe du matin en véhicules-kilomètres

7.2.4 Perspectives sexe et âge

La perspective sexe examine l'usage du réseau routier selon le genre de la personne qui se déplace. Elle permet ainsi de comprendre les éventuelles différences en matière de la mobilité entre les femmes et les hommes. Quant à la perspective âge, elle s'intéresse à l'usage du réseau routier selon l'âge de la personne qui se déplace. Ainsi, des comparaisons avec le pouvoir fiscal des groupes d'âge peuvent être réalisées. L'examen des caractéristiques de l'usage du réseau par groupes d'âge, tels que les personnes âgées, est également possible.

Parmi les quelques 967 916 déplacements simulés, 58% sont effectués par des hommes contre 42% par les femmes. L'analyse de la consommation en adoptant la variable personnes-kilomètres fait ressortir une consommation totale d'environ 62% par les hommes et 38% par les femmes. Cette différence peut être expliquée par la distance de déplacement, qui est plus élevée chez les hommes. La distance moyenne de déplacement est de 13,4 km pour les femmes et de 15,9 km pour les hommes. La Figure 7.13 montre la distance moyenne de déplacement par sexe et par groupe d'âge. Cette distance est plus grande chez les hommes pour tous les groupes d'âge de moins de 65 ans. La différence est surtout marquée chez les 25-45 ans. Ces derniers sont les grands consommateurs comme l'illustre la Figure 7.14. En effet, cette dernière figure montre comment le sommet de la consommation est atteint pour les personnes entre 25 et 45 ans. S'il est vrai que le diagramme de la population enregistre lui aussi un sommet aux alentours de ces mêmes groupes d'âge, il faut cependant mettre cette consommation en parallèle avec le pouvoir fiscal de cette catégorie d'usagers.

Une autre différence entre les deux sexes est constatée quand il s'agit d'examiner l'usage du réseau selon que le déplacement est effectué en tant que conducteur ou passager. L'évaluation de l'usage global de tout le réseau fait ressortir, en effet, que le sexe du conducteur est de 1,35 alors qu'il est de 1,64 pour le passager (la valeur 1 correspond au sexe masculin, et la valeur 2 correspond au sexe féminin).

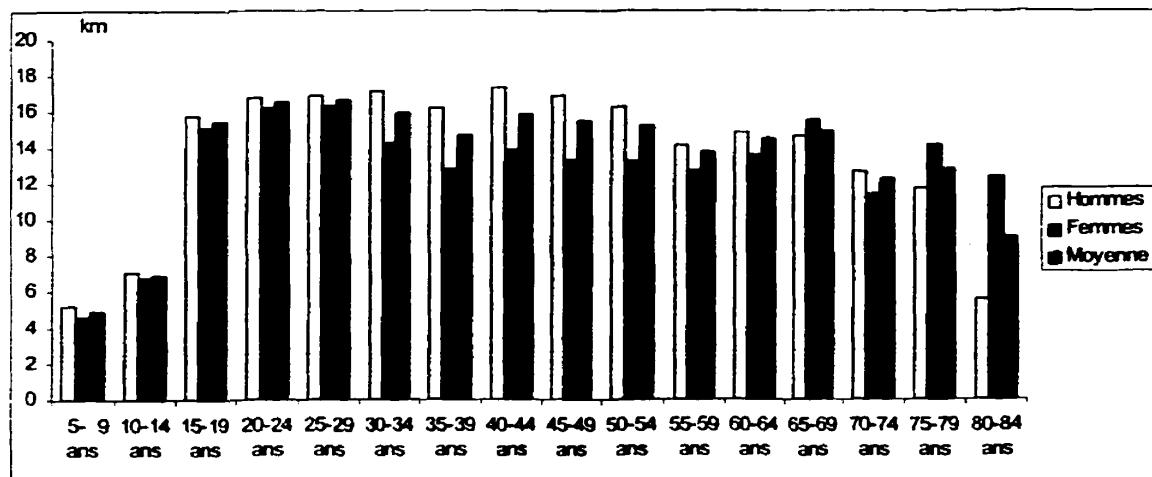


Figure 7.13 : Distance moyenne du déplacement selon le groupe d'âge et le sexe en pointe du matin

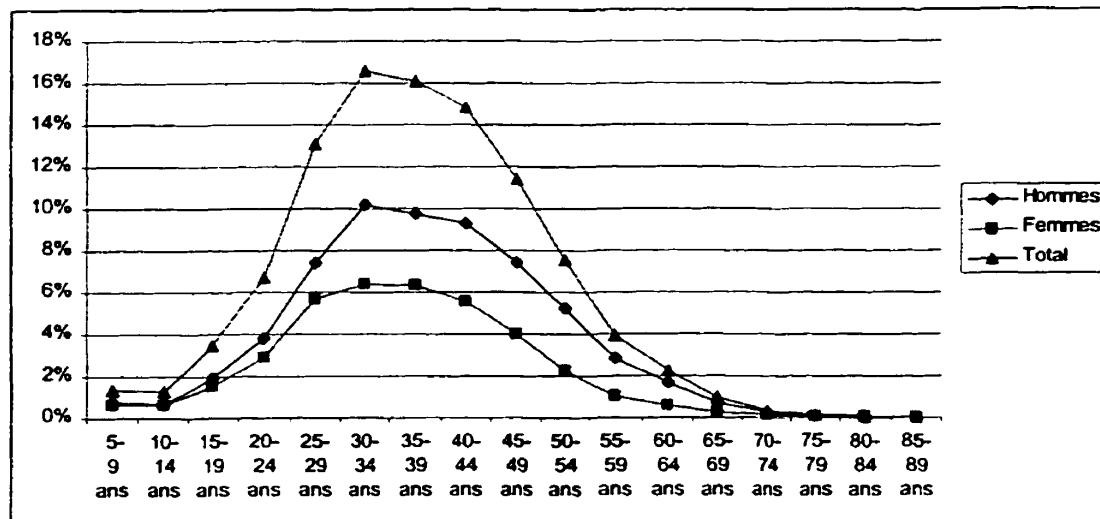


Figure 7.14 : Pourcentage de consommation en personnes-kilomètres selon le sexe et les groupes d'âge en pointe du matin

La Figure 7.15 montre les résultats d'une tentative de mesurer l'usage du réseau routier de la GRM selon les groupes d'âge. La première constatation concerne les groupes d'âge 25-40 ans qui consomment plus que ce qu'ils représentent à l'intérieur des personnes qui se déplacent en automobile en pointe du matin. Cependant, il serait imprudent de tirer des conclusions de ce constat tant qu'il n'est pas mis dans son contexte et combiné avec d'autres données telles que les données sur le pouvoir fiscal de cette catégorie d'usagers par exemple.

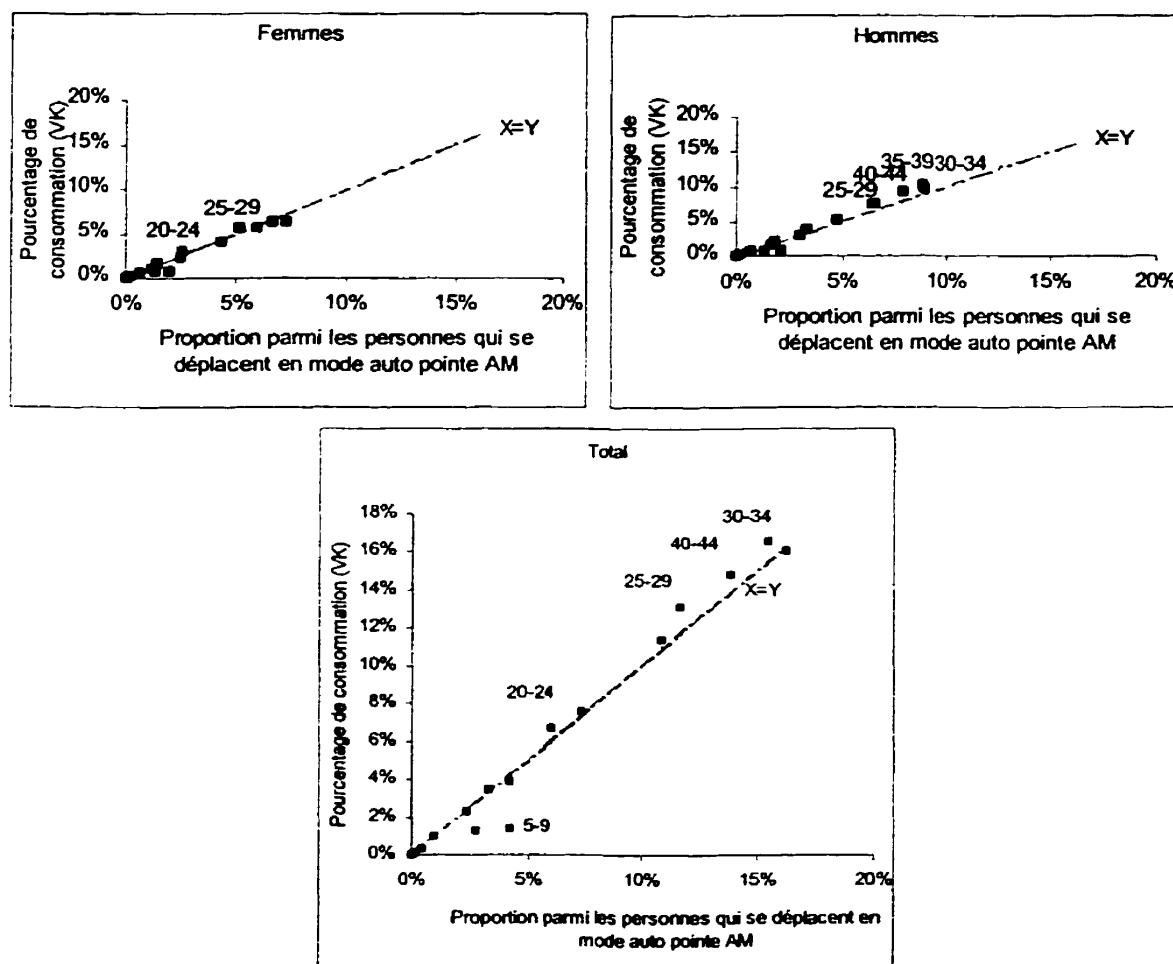


Figure 7.15 : Mesure de la redistribution de l'usage du réseau routier de la GRM selon les groupes d'âge et le sexe en pointe du matin

7.3 Validation de la méthode

La validation de la méthode se fait en plusieurs étapes: données, modèles et résultats. En ce qui concerne les données, leur validation a été déjà réalisée lors du traitement des données de l'enquête origine-destination 1993. Le modèle utilisé se sert de données réelles sur la mobilité. La reconstitution des déplacements en se servant d'une approche totalement désagrégée et d'une affectation tout-ou-rien qui tient compte des temps de parcours sur les liens à l'équilibre est crédible mais pose en même temps un défi majeur qui va au-delà du cadre de cette recherche: la nécessité d'un modèle qui reproduirait le comportement réel des automobilistes à l'instar du modèle MADITUC pour les transports en commun.

Par ailleurs, l'expérimentation a pris en compte les déplacements effectués en point du matin uniquement pour ne pas alourdir ce mémoire. La méthodologie utilisée reste la même pour examiner l'usage sur une période de 24 heures.

7.4 Conclusion

La méthodologie d'analyse des effets redistributifs de l'usage d'un réseau routier urbain a été expérimentée dans le cadre de cette recherche, et les résultats ont été illustrés et expliqués dans ce chapitre. En guise de conclusion partielle, il faut signaler que:

- Le modèle utilisé fait partie de la famille MADITUC et utilise une approche totalement désagrégée.
- ◆ Les données de l'expérimentation proviennent des informations tirées de l'enquête origine-destination réalisée en 1993 dans la Grande région de Montréal.
- L'analyse est réalisée selon différentes perspectives en adoptant une démarche quantitative.

- ◆ Les résultats sont sous formes absolues et relatives et montrent les différents aspects du débordement territorial ainsi que l'usage du réseau selon des variables socio-économiques.
- ◆ Les autoroutes urbaines représentent près de la moitié de la consommation en pointe du matin.
- ◆ Globalement, les territoires des banlieues éloignées du centre-ville débordent sur les territoires les plus proches du centre-ville. Ainsi, la CUM accuse un bilan de consommation négatif par rapport à chacune des quatre sous-régions périphériques. La Couronne nord déborde pour sa part sur le territoire de la ville de Laval.
- ◆ Les hommes se déplacent plus que les femmes en automobile. La distance moyenne de déplacement est plus élevée chez les hommes que chez les femmes.
- ◆ Les groupes d'âge 25-45 ans sont les principaux consommateurs du réseau routier.
- ◆ Les déplacements effectués en tant que conducteur sont majoritairement masculins, alors que ceux effectués en tant que passagers sont majoritairement féminins.

Les résultats de l'expérimentation sont donnés à titre d'illustration seulement. Ils démontrent néanmoins la possibilité de la mesure fine et détaillée des effets de débordement entre les territoires et les juridictions, et de la redistribution des bénéfices et des coûts parmi les usagers à l'aide d'une approche informationnelle totalement désagrégée.

CONCLUSION

Cette recherche avait pour objectif principal l'exploration et l'expérimentation d'une méthodologie pour l'évaluation des effets redistributifs associés à l'usage d'un réseau routier urbain. Pour atteindre cet objectif, il fallait comprendre le système de transport, clarifier la problématique des effets redistributifs, analyser les instruments de modélisation potentiellement utilisables, choisir une approche valide et enfin expérimenter la méthode.

Aspect systémique

Le système de transport est un tout composé d'éléments en interactions dynamiques en vue d'un but. En effet, la revue de littérature a permis de cerner les enjeux et les défis systémiques. Dans ce contexte, l'analyse systémique sert à évaluer les impacts liés à des changements dans les options du système.

Une démarche systémique utilise souvent des instruments basés sur des modèles. Ces derniers doivent être valides, pertinents et surtout probants.

La modélisation des interactions du système de transport peut se faire en se servant d'un modèle micro-économique. La transposition de ce modèle permet de distinguer la demande qui est conditionnée par le système d'activité, et l'offre qui représente le système de transport. Les interactions entre ces deux composantes aboutissent à des équilibres à court terme puis à un équilibre global à long terme.

L'offre de transport soulève le problème des coûts associés. Une démarche valide doit considérer le coût social et éviter toutes sortes de déséconomies qui puissent résulter de l'existence d'externalités dans le système.

La problématique de redistribution

L'analyse des effets redistributifs du système de transport est le résultat de la considération des deux principes d'équité et d'efficacité. Le premier repose sur des théories de la justice et exige que les usagers du système de transport contribuent à son financement en rapport avec l'usage qu'ils en font en tenant compte de leur pouvoir fiscal. Dans sa version rawlsienne, un système de transport qui bénéficie plus aux groupes défavorisés est souhaitable. Quant au principe d'efficacité, il repose sur la théorie du surplus et exige que le bien-être collectif soit maximisé. La considération des deux principes ensemble aboutit souvent à des contradictions.

L'analyse du système de transport ne doit pas reposer sur le seul principe d'efficacité. Elle doit évaluer la redistribution des coûts et des bénéfices associés au système en vue de l'analyse de son équité.

Les effets redistributifs du système de transport ont au moins deux aspects. Le premier a trait avec le caractère territorial et géopolitique du système, ce qui requiert l'identification des coûts et des bénéfices directs et indirects selon le territoire de résidence ou de destination en plus du territoire qui fournit une partie du système. La contribution financière territoriale doit être en rapport avec l'usage fait du système. Une analyse systémique selon cette perspective permet d'identifier des phénomènes de débordement territorial, et parfois d'évasion fiscale. Le second aspect des effets redistributifs concerne les catégories d'usagers en général. Dans ce sens, un grand défi serait la mesure du niveau d'équité sociale du système de transport en examinant les bénéfices et les coûts selon les niveaux de revenu, ou encore selon l'âge et le sexe des usagers.

La redistribution des bénéfices et des coûts du système de transport se fait par l'intermédiaire de systèmes de financement adéquats. Différents scénarios de financements existent selon qu'ils tiennent compte du coût total ou marginal, social ou privé.

Réflexion sur les instruments

Les instruments d'analyse sont certes un outil qui aide à clarifier les enjeux, cependant, il faut choisir ceux qui sont valides pertinents et valables. Le cadre de cette recherche exige des instruments capables de reproduire la réalité d'une manière transparente. En particulier, les données désagrégées sur le territoire, le réseau et les déplacements sont nécessaires.

Cette recherche a conclu que, pour les transports urbains de personnes, des instruments traditionnels basés sur la procédure séquentielle classique ne peuvent pas servir à mener l'analyse des bénéficiaires du système de transport urbain. Ceci est vrai pour deux raisons. La première concerne l'aspect agrégé de ces méthodes, ce qui ne permet pas de traiter les déplacements d'une façon individuelle. La deuxième raison a trait à la structure même de ces modèles, qui reste basée sur des modèles algébriques simplistes qui résistent mal à une confrontation avec des données réelles sur la mobilité.

Pour réaliser l'objectif de cette recherche, il a fallu donc chercher des modèles désagrégés plutôt qu'agrégés, informationnels plutôt qu'algébriques. L'enjeu est devenu donc la collecte, la préparation, la gestion, l'extraction et l'analyse des données. Cette recherche a donc décidé d'utiliser l'approche totalement désagrégée développée depuis le début des années 1980 dans le contexte montréalais.

L'approche totalement désagrégée est un système d'information dédié à la planification des transports. Elle est basée sur cinq éléments: le personnel, les procédures, le matériel, les logiciels et les bases de données. Cette approche utilise des données désagrégées sur le territoire, le réseau et les déplacements. Avec cette approche, il est possible de retracer tous les déplacements sur le réseau et de retrouver leurs attributs spatiaux, temporels et socio-économiques.

La méthodologie

En se servant du système totalement désagrégé, cette recherche a exploré une approche d'analyse dite multi-perspective. Il a été conclu qu'une telle approche est intéressante puisqu'elle permet d'analyser le problème de redistribution selon plusieurs perspectives tout en manipulant des outils d'analyse variés et complémentaires. Cette approche multi-perspective est basée sur quatre éléments : les choses, les propriétés, les conceptions et les perspectives. Une manière de formaliser cette approche consiste à appliquer un modèle dit ontologique.

Le modèle conceptuel ontologique définit le monde comme une réunion de substances élémentaires. Il explique les propriétés et les interactions par des accidents non-relationnels et relationnels. Le modèle ontologique s'applique au territoire pour expliquer les relations spatio-temporelles. Il est aussi appliqué au réseau et aux déplacements pour conceptualiser leurs éléments de base.

En identifiant les exigences de l'analyse multi-perspective, et en utilisant le système totalement désagrégé, cette recherche a développé des fonctions transport qui opèrent sur des bases de données et présentent les résultats sous différents formats interactifs. Ces fonctions ont permis de faire :

- ◆ L'analyse des effets de débordement entre les territoires. Il s'agit de mesurer la consommation du réseau à l'aide de plusieurs variables, d'évaluer les consommations réciproques entre territoires, et de calculer les bilans de consommation.
- ◆ L'analyse de l'usage d'une partie du réseau, d'une classe hiérarchique du réseau ou d'une infrastructure particulière selon une perspective territoriale ou selon les attributs des usagers.
- ◆ L'analyse de l'usage de tout le réseau selon les catégories d'usagers.

À propos de l'expérimentation

L'expérimentation de la méthodologie a été faite en analysant le réseau routier de la Grande région de Montréal, et en exploitant les informations sur la mobilité issues de l'enquête origine-destination réalisée en 1993. Le système MADITUC a été utilisé pour mener cette analyse. Ces expérimentations servent à illustrer la méthodologie sans pour autant se substituer à une analyse systémique plus fine.

Cette expérimentation a permis de mesurer l'usage du réseau routier selon plusieurs perspectives : réseau global et classes de routes; liens et tronçons particuliers; territoires selon plusieurs définitions géopolitiques; et catégories d'usagers.

Suite à cette expérimentation, et en tenant compte des hypothèses sous-jacentes au modèle utilisé, les conclusions globales suivantes ont été déduites :

- ♦ La perspective réseau : les autoroutes représentent l'infrastructure la plus utilisée par les déplacements en pointe du matin en termes de véhicules-kilomètres. L'usage des autoroutes représente plus de 50% de la consommation totale.
- ♦ La perspective territoire : les territoires situés loin du centre-ville débordent sur ceux qui se situent sur leurs chemins en direction du centre-ville, et leurs résidents enregistrent un taux de consommation en véhicules-kilomètres per capita plus élevé. Par exemple, la CUM enregistre un déficit de consommation par rapport aux quatre sous-régions qui l'entourent à savoir : la Couronne nord, la Couronne sud, Laval et la Rive sud proche.
- ♦ La perspective tronçon de route ou infrastructure : le pont Champlain est majoritairement utilisé par les résidents de la rive sud. La majorité de ses utilisateurs ont pour destination le centre-ville. La section de l'autoroute Métropolitaine entre les autoroutes Décarie et des Laurentides est surtout utilisée par les résidents des municipalités qui l'entourent en plus des résidents de Laval. La rue Notre-Dame est

utilisée par les résidents de Pointe-aux-Trembles, l'Assomption et Mercier à destination du centre-ville.

- ◆ La perspective classes d'usagers : les hommes consomment 62% du réseau contre 38% pour les femmes. Les hommes ont une distance moyenne de déplacement plus grande que celle des femmes. En plus, les conducteurs sont majoritairement des hommes, tandis que les passagers sont pour la majorité des femmes. Les classes d'âge 25-45 ans dominent, pour leur part, la consommation du réseau en pointe du matin.

Conclusion générale

Ce projet de recherche a été motivé par le fait qu'une analyse unidimensionnelle basée sur le seul principe d'efficacité du système de transport n'est pas suffisante. En effet, au-delà de l'efficacité, il faut analyser comment les coûts et les bénéfices du système de transport sont distribués parmi les usagers et les non-usagers, d'une part, et parmi les différentes entités territoriales et géopolitiques, d'autre part. Cette analyse permet d'évaluer l'équité sociale du système selon les catégories d'usagers, et de mesurer les effets de débordements territoriaux et d'évasion fiscale du système.

Ce projet de recherche a démontré la possibilité de mener une analyse fine et détaillée des effets redistributifs de l'usage d'un réseau routier urbain. Pour ce faire, une approche informationnelle désagrégée a été utilisée. Cette approche se sert de données désagrégées sur la mobilité telles que celles qui proviendraient d'enquêtes origine-destination à grande échelle. La reconstitution des déplacements et l'identification des itinéraires dans le cas d'un réseau routier sous congestion reste le défi majeur.

Dans le cadre de cette recherche, le modèle MAD(strat)² a été utilisé. Ce dernier reproduit les déclarations des personnes interrogées lors de l'enquête téléphonique en utilisant une affectation tout-ou-rien qui tient compte des temps de parcours à l'équilibre

sur les liens et de pénalités de correspondances entre les différentes classes hiérarchiques du réseau routier. La reproduction est ensuite validée et la méthode est calibrée.

L'expérimentation dans le contexte montréalais a permis de mesurer plusieurs variables d'usage du réseau routier. Elle a également permis d'analyser les effets de débordement selon plusieurs perspectives. La perspective territoriale a pu considérer plusieurs définitions des territoires géopolitiques au niveau des secteurs et des sous-régions. La perspective sociale a pu s'intéresser à différentes catégories d'usagers, et de les combiner avec des variables spatio-temporelles.

Enfin, l'approche de systématisation informationnelle totalement désagrégée s'est avérée parfaitement adaptée pour l'évaluation des bilans économiques et financiers associés à un réseau routier urbain.

RÉFÉRENCES

- ATKINS, S. T. (1986). Transportation planning models – what the papers say, Traffic Engineering + Control, Londres, 460-467.
- BERGERON, D. (1991). Approche désagrégée appliquée à l'analyse interactive des réseaux de transport urbain, Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada, 134 pages.
- BERGERON, D. et CHAPLEAU, R. (1996). Modélisation de l'accessibilité à l'île de Montréal depuis l'enquête-ménage Origine-Destination STCUM-MTQ de 1993, Exposé des communications du 31^e congrès annuel de l'AQTR - Québec, Tome 2, 523-540.
- BONNAFOUS, A et MASSON, S. (1999). Évaluation des politiques de transports et équité spatiale, Document de travail 99/02, LET, Lyon.
- BUNGE, M. (1977). Treatise on Basic Philosophy, Volume 3, Ontology I: The Furniture of the World, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Pays-Bas, 352 pages.
- BUNGE, M. (1979). Treatise on Basic Philosophy, Volume 4, Ontology II: A World of Systems, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Pays-Bas, 314 pages.
- BUTTON, K. (1994). Overview of Internalising the Social Costs of Transport, in Internalising the Social Costs of Transport, Chapitre 1, Séminaire OCDE-CEMT, 1993, Paris.

- CHAPLEAU, R. (1988). Mesure de la redistribution des bénéfices et des coûts associés à un réseau de transport en commun, Exposé des communications du 23^e congrès annuel de l'AQTR - Montréal, 53-77.
- 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, no. 24, Éditions Paradigmes, 27-51.
- CHAPLEAU, R. (1992). La modélisation de la demande de transport urbain avec une approche totalement désagrégée, Compte-rendu des communications de la Conférence mondiale sur la recherche dans les transports (WCTR), Lyon, 937-948.
- CHAPLEAU, R. (1994). MAD(strat)² : L'approche totalement désagrégée appliquée au transport urbain des marchandises, Groupe MADITUC, École Polytechnique de Montréal.
- CHAPLEAU, R. (1995a). Measuring Impacts of Transit Financing Policy in Geopolitical Context : Montreal Case, Transportation Research Record 1496, Washington, 52-58.
- CHAPLEAU, R. (1995b). Symphonie d'usage des grandes enquêtes origine-destination, en totalement désagrégé majeur, opus Montréal 87 et 93, Les enquêtes de déplacements urbains : mesurer le présent, simuler le futur, Entretiens du Centre Jacques Cartier Rhône-Alpes, Les chemins de la recherche, Lyon, 33-59.
- CHAPLEAU, R. et ALLARD, B. (1990). L'Approche Désagrégée Appliquée aux Réseaux avec Congestion : Esquisse Méthodologique, Exposé des communications du 25^e congrès annuel de l'AQTR - Montréal, 227-251.

- CHAPLEAU, R. et ALLARD, B. (1992). L'ère des systèmes d'information fondés sur une analyse désagrégée pour la prise de décision en transport urbain, Exposé des communications du 27^e congrès annuel de l'AQTR - Québec, 20 pages.
- CHAPLEAU, R., ALLARD, B., TRÉPANIER, M. et MORENCY, C. (1999). Telephone Interview Origin-Destination Survey Software: the State of the Art, Exposé des communications du 34^e congrès annuel AQTR - Montréal, CD-ROM.
- CHAPLEAU, R., TRÉPANIER, M., et ALLARD, B. (1998). Practical implementation of object-oriented GIS-T, Communication présentée à la Conférence mondiale sur la recherche dans les transports (WCTR), Anvers, Belgique.
- DOMENCICH, T. A. et MCFADDEN, D. (1975), Urban Travel Demand: A Behavioral Analysis, Contributions to economic analysis, North-Holland Publishing, Amsterdam, 215 pages.
- GANNON, C. A. et LIU, Z. (1997). Poverty and Transport, Discussion Paper, TWU Papers, Banque mondiale, Washington, 57 pages.
- GRETU (1980). « Une étude économique à Montréal ... » Mythes et réalités des études de transport, éditions Cujas, Paris, 204 pages.
- KANAFANI, A. K. (1983). Transportation Demand Analysis, McGraw Hill, New York, 320 pages.
- KHISTY, C. J. (1996). Operationalizing Concepts of Equity for Public Project Investments, Transportation Research Record 1559, 94-99.
- MANHEIM, M. L. (1979). Fundamentals of Transportation Systems Analysis, Volume 1: Basic Concepts. 2nd printing, the MIT Press, Cambridge, 658 pages.

- MERLIN, P. (1991). Géographie, économie et planification des transports, Presses universitaires de France, Paris, 472 pages.
- MEYER, M. D. et MILLER, E. J. (1984). Urban Transportation Planning : A Decision-Oriented Approach. McGraw-Hill, New York, 525 pages.
- OPDHAL, A. L. (1997). A Comparison of Four Families of Multi-Perspective Problem Analysis Methods, Communication présentée à la 20^e conférence IRIS du 9 au 12 août 1997, www.ifi.uio.no/iris20/proceedings/49.htm
- ORTUZAR, S. J. de D. et WILLUMSEN, L. G. (1994). Modelling Transport, Wiley, Toronto, 2^e édition, 438 pages.
- POTTS, R. B. et OLIVER, R. M. (1972). Flows in Transportation Networks, Academic Press, New York, 192 pages.
- QUINET, E. (1990). Analyse économique des transports, 1^{re} édition, Presses universitaires de France, Paris, 302 pages.
- RAWLS, J. (1971). A Theory of Justice, Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, 607 pages.
- RAWLS, J. (1999). A Theory of Justice, Édition révisée, Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, 538 pages.
- SMITH, B. (1999a). Objects and Their Environments: From Aristotle to Ecological Ontology, à paraître dans les éditions Andrew Frank, *The Life and Motion of Socioeconomic Units*, London: Taylor and Francis, <http://wings.buffalo.edu/philosophy/faculty/smith>.

SMITH, B. (1999b). Agglomerations, à paraître dans les éditions C. Freksa, *Spatial Information Theory*. International Conference COSIT '99 (Springer Lecture Notes in Computer Science), <http://wings.buffalo.edu/philosophy/faculty/smith>

TRÉPANIER, M. (1995). Référentiels spatiaux et opérationnels pour la caractérisation de la mobilité en transport urbain, Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada, 192 pages.

TRÉPANIER, M. et CHAPLEAU, R. (1997). SIG-TOO, applications pragmatiques sur des technologies légères, Exposé des communications du 32^e congrès annuel AQTR - Trois-Rivières, Tome 1, 92-109.

WARDROP, J. G. (1952). Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research, Road Paper No. 36, Proceedings of the Institution of Civil Engineers Part II, Londres, 325-378.

WEISS, S. M. et INDURKHYA N. (1998). Predictive Data Mining, A Practical Guide, Morgan Kaufman Publishers, San Francisco, 228 pages.