

Titre: Modélisation totalement désagrégée et orientée-objet appliquée
Title: aux transports urbains

Auteur: Martin Trépanier
Author:

Date: 1999

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Trépanier, M. (1999). Modélisation totalement désagrégée et orientée-objet
Citation: appliquée aux transports urbains [Ph.D. thesis, École Polytechnique de Montréal].
PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/8672/>

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

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/8672/>
PolyPublie URL:

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

Programme: Unspecified
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**MODÉLISATION TOTALEMENT DÉSAGRÉGÉE ET ORIENTÉE-OBJET APPLIQUÉE
AUX TRANSPORTS URBAINS**

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

**THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph.D.)
(GÉNIE CIVIL)
AOÛT 1999**

© Martin Trépanier, 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.

0-612-48896-9

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée:

MODÉLISATION TOTALEMENT DÉSAGRÉGÉE ET ORIENTÉE-OBJET APPLIQUÉE
AUX TRANSPORTS URBAINS

présentée par: TRÉPANIÉ Martin
en vue de l'obtention du diplôme de: Philosophiae Doctor
a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de:

M. BAASS Karsten, Ph.D., président

M. BONNEL Patrick, Ph.D., membre et examinateur externe

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

MME LAPIERRE Sophie, Ph.D., membre

M. TANGUAY Marc G., Ph.D., représentant du doyen

REMERCIEMENTS

L'auteur désire remercier tout particulièrement le professeur Robert Chapleau pour l'avoir appuyé pour les dimensions méthodologique, académique et financière tout au cours de cette recherche. Des remerciements également pour Bruno Allard, Daniel Bergeron, Pierre Lavigueur et Catherine Morency, associés de recherche au groupe MADITUC au cours de la période 1995-1999, qui ont su apporter leur aide technique et morale.

L'auteur gratifie le support financier du Fonds pour la Formation de Chercheurs et l'Aide à la Recherche (FCAR) du Québec et le Conseil National de la Recherche en Science et en Génie du Canada (CRSNG).

Un mot enfin pour remercier la Société de transport de la Communauté urbaine de Montréal, la Société de transport de la ville de Laval et la Société de transport de la Rive-sud de Montréal qui, sous divers aspects et par leurs ententes avec le groupe MADITUC, ont permis la réalisation de ce projet, notamment en permettant l'accès aux données.

RÉSUMÉ

Les modèles de planification des transports urbains sont majoritairement basés sur l'approche agrégée et la procédure séquentielle classique. Cette thèse présente plutôt une approche totalement désagrégée et orientée-objet visant à améliorer les outils et les procédures de modélisation et de planification des transports. Ses principales contributions sont la définition d'une nomenclature orientée-objet en transport, l'architecture de nouvelles méthodes et le montage d'outils logiciels associés.

L'avènement des nouvelles technologies dans les systèmes d'information géographique, les grandes enquêtes ménage et divers instruments de cueillette de données remettent en cause le bien-fondé des modèles agrégés, basés sur des découpages zonaux grossiers et l'agrégation des données. Vu sous la perspective d'un processus de planification devant considérer toute l'information disponible au sein des systèmes informationnels d'entreprise, cette thèse définit des méthodes de planification interactive fondées sur l'intégration et la conservation de l'information dans la modélisation ("informodèle").

La première étape consiste à définir les concepts de l'approche orientée-objet en transport. Quatre méta-classes sont explicitées : les objets dynamiques, cinétiques, statiques et systémiques. Les objets qui en découlent sont utilisés dans la thèse dans diverses expérimentations touchant l'offre et la demande de transport, le but étant d'améliorer et de multiplier les usages des modèles de l'approche totalement désagrégée.

Des expérimentations sur les objets de l'offre de transport (réseaux) démontrent que l'approche orientée-objet offre, par son caractère évolutif et adaptatif, une réponse favorable à l'ajout de nouvelles données sans affecter l'utilisation des propriétés et méthodes existantes. Dans le cas du réseau de transport collectif, l'approche compte sur les acquis de la modélisation totalement désagrégée dans l'exploitation de

l'information. Le logiciel MADTOO (*Modèle d'analyse désagrégée transport orienté-objet*) est le résultat expérimental d'un montage simultané de réseaux viaire et collectif.

Les objets de la demande font également l'objet d'expérimentations. Dans le contexte montréalais, l'attention est portée sur les données des grandes enquêtes origine-destination, qui sondent la demande de transport des personnes dans ses aspects de mobilité, de socio-démographie et d'utilisation de l'offre. Par l'attribution de propriétés et de méthodes aux objets Ménage, Personne et Déplacement, l'approche orientée-objet constitue une suite naturelle à l'esprit de la modélisation totalement désagrégée. Le traitement de l'objet individuel et la constitution de collections d'objets provenant soit de groupes homogènes (personnes d'un ménage), d'agréations spatiales ou de tout autre regroupement sont expérimentés à l'aide du logiciel MADAME (*Module d'analyse désagrégée des attributs et méthodes de données d'enquêtes*).

Enfin, la thèse décrit la réutilisation des méthodes développées lors des expérimentations en vue de construire des modèles d'une complexité supérieure typiques de l'approche totalement désagrégée, tel que l'affectation de déplacements sur un réseau de transport collectif et la répartition modale par seuils incrémentaux.

On peut difficilement douter de l'importance grandissante que prendront les systèmes informationnels dans les organismes de transport au cours des prochaines années. On peut donc miser sur la part majeure que devra prendre l'approche de modélisation orientée-objet et totalement désagrégée dans le domaine des transports, dans un souci d'utilisation efficiente des ressources et des données à la disposition du planificateur.

ABSTRACT

Transportation planning models are mostly based on the "Transportation Planning Process" and aggregate models. In counterpart, this thesis presents an object-oriented and totally disaggregate approach aimed to improve the modelling tools and procedures in transportation planning. Its main contributions are the definition of a transportation object-oriented vocabulary, the architecture of new methods and the creation of related software.

The upcoming of new technologies in geographic information systems, the large origin-destination surveys and many new data querying tools are questioning the usage of aggregate models, based on zone data aggregation. In order to consider all available information within the organization information system, this thesis defines interactive planning methods based on data integration and conservation into modelling ("informodels").

The first step is to define transportation object-oriented concepts. Four meta-classes are explained: dynamic, kinetic, static and systemic objects. The resulting objects are used in several experiments on transportation supply and demand. The goal is to improve and multiply the usage of totally disaggregate models.

The experiments made on transportation supply objects (networks) demonstrate that the evolutive and adaptive object-oriented approach can conduct to new data integration without disturbing existing systems. In transit modelling, the approach benefits from the totally disaggregate modelling in information processing. The MADTOO software (MADITUC Transportation Object-Oriented) is the result from experiments conducted on transit and road networks objects.

The transportation demand objects are also used for experiments. In the Montreal context, large origin-destination surveys are achieved to obtain several data on population mobility, socio-demographics and supply use. The object-oriented approach completes the totally disaggregate approach by giving properties and methods to

Household, Person and Trip objects in order to conduct deep survey data analysis. The processing of individual objects and collection of objects are experimented in the MADAME software (MADITUC data survey attributes and methods).

Finally, the thesis describes the reusability of methods in the construction of more complex models typically used in the totally disaggregate approach, like individual trip assignment on networks and incremental modal split models.

Since the information systems will tremendously grow in transportation organisation in the next years, planners should rely on an object-oriented modelling, combined with the totally disaggregate approach, to develop better ways to obtain a maximal use of available information.

TABLES DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ	V
ABSTRACT	VII
TABLES DES MATIÈRES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XVII
LISTE DES FIGURES	XIX
LISTE DES ANNEXES.....	XXIV
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1: LES AXES DE MODÉLISATION EN TRANSPORT	5
1.1 L'approche agrégée.....	5
1.1.1 La procédure séquentielle classique	6
1.1.2 Le découpage zonal.....	9
1.1.3 État actuel et critiques.....	10
1.1.4 Réflexions sur l'approche agrégée	11
1.2 L'approche désagrégée	11
1.2.1 Fondements	11
1.2.2 Caractérisation fine des déplacements.....	13
1.3 L'approche totalement désagrégée	13
1.3.1 Le déplacement individuel totalement désagrégé.....	14
1.3.2 Les éléments totalement désagrégés.....	15
1.3.3 Les niveaux de désagrégation.....	17
CHAPITRE 2: LES SYSTÈMES INFORMATIONNELS EN TRANSPORT	20
2.1 Le système d'information totalement désagrégé.....	20
2.1.1 Composantes	20

2.1.2	Relations entre les éléments du système informationnel.....	22
2.1.3	Bases de données	22
2.1.4	Relations entre les éléments de la base de données	25
2.2	Les systèmes d'information géographique en transport.....	26
2.2.1	Définition	26
2.2.2	Les quatre états de la donnée	27
2.2.3	Topologie des SIG	28
2.2.4	Fonctions d'un SIG	30
CHAPITRE 3: LES INSTRUMENTS DE PLANIFICATION DES TRANSPORTS.....		32
3.1	Les processus de cueillette de données	32
3.1.1	Les inventaires (registres)	32
3.1.2	Les enquêtes ménages origine-destination	33
3.1.3	Les enquêtes <i>in situ</i> origine-destination	34
3.1.4	Préférences énoncées ou révélées?	35
3.1.5	Les comptages (ou comptes)	36
3.1.6	Les données externes	37
3.2	Les logiciels de modélisation agrégée	37
3.2.1	UTPS	38
3.2.2	QRS II	38
3.2.3	TRANSCAD	40
3.2.4	EMME/2	40
3.3	Les instruments de modélisation totalement désagrégée	40
3.3.1	Planification des transports urbains.....	41
3.3.2	Opération des systèmes de transport.....	43
3.3.3	Information aux usagers.....	44
3.3.4	Transport des marchandises	47
3.3.5	Travaux publics	47
3.4	Les instruments génériques.....	48

CHAPITRE 4: L'APPROCHE ORIENTÉE-OBJET	51
4.1 Modélisation et programmation.....	51
4.1.1 La modélisation orientée-objet	51
4.1.2 La programmation orientée-objet	52
4.2 Sémantique	52
4.2.1 L'objet	53
4.2.2 La classe.....	53
4.2.3 Les propriétés	54
4.2.4 Les méthodes	54
4.2.5 L'abstraction et l'encapsulation.....	55
4.3 Les relations entre les objets	56
4.3.1 Héritage	56
4.3.2 Agrégation et généralisation.....	57
4.3.3 Association et collaboration.....	57
4.3.4 Contraintes.....	58
4.4 Quelques approches orientées-objet	58
4.4.1 Berard	59
4.4.2 Booch.....	59
4.4.3 Coad et Yourdon	60
4.4.4 Colbert	60
4.4.5 Embley, Kurtz et Woodfield.....	61
4.4.6 Martin et Odell.....	61
4.4.7 Rumbaugh	62
4.4.8 Shlaer et Mellor.....	62
4.4.9 Wirfs-Brock	63
4.5 Critique de l'approche orientée-objet	63
4.5.1 Avantages	64
4.5.2 Inconvénients.....	64
CHAPITRE 5: L'APPROCHE ORIENTÉE-OBJET EN TRANSPORT.....	66

5.1	Quelques approches existantes.....	66
5.1.1	PoeT	66
5.1.2	STROBOSCOPE	68
5.1.3	Système d'information objet à la RATP	68
5.1.4	Système d'information géographique orienté-objet	69
5.2	L'objet de transport.....	70
5.2.1	Définitions	70
5.2.2	Définition mathématique.....	71
5.2.3	Notation employée	73
5.3	Les métaclassees d'objets de transport.....	74
5.3.1	Les objets dynamiques.....	74
5.3.2	Les objets cinétiques.....	75
5.3.3	Les objets statiques	76
5.3.4	Les objets systémiques.....	76
5.3.5	Polymorphisme	77
5.3.6	Temporalité	77
5.4	Les propriétés des objets de transport.....	77
5.4.1	Les propriétés d'identification	78
5.4.2	Les propriétés de dénomination	78
5.4.3	Les propriétés géométriques	79
5.4.4	Les propriétés pseudo-géométriques	79
5.4.5	Les propriétés spatiales	80
5.4.6	Les propriétés temporelles	81
5.4.7	Les propriétés socio-écono-démographiques.....	81
5.4.8	Les propriétés opérationnelles	81
5.4.9	Les propriétés contextuelles.....	82
5.4.10	Les propriétés de classification	83
5.4.11	Les valeurs de propriétés	83
5.5	Les méthodes des objets de transport.....	85

5.5.1	Les méthodes de propriété.....	85
5.5.2	Les méthodes intrinsèques	85
5.5.3	Les méthodes géométriques	86
5.5.4	Les méthodes de visualisation	86
5.5.5	Les méthodes génératrices	87
5.5.6	Les méthodes statistiques.....	88
5.5.7	Les méthodes spatiales.....	89
5.5.8	Les méthodes associatives	90
5.5.9	Les méthodes complexes.....	90
5.6	Les relations entre les objets de transport	91
5.6.1	La relation "1 à n".....	91
5.6.2	La collection	92
5.6.3	La collection orientée	93
5.6.4	Le modèle-objets, un outil de représentation des objets et des relations	93
CHAPITRE 6: PROPRIÉTÉS ET MÉTHODES ASSOCIÉES À DES RÉSEAUX DE TRANSPORT VIAIRE ET COLLECTIF		96
6.1	Le réseau de voirie	97
6.1.1	Définition	97
6.1.2	Connexité et opérabilité.....	97
6.1.3	De la représentation cartographique à la création de l'objet Réseau.....	98
6.1.4	Hiérarchisation du réseau de voirie	99
6.1.5	Modèle-objets du réseau de voirie.....	102
6.1.6	Propriétés du réseau de voirie.....	103
6.2	Le réseau de transport collectif.....	104
6.2.1	Définition	104
6.2.2	Modèle-objets: cas montréalais.....	104
6.2.3	Niveaux de résolution.....	107
6.2.4	Réseau à géométrie variable.....	108

6.2.5	La chromatique et la table de temps de marche.....	109
6.2.6	Le diagramme espace-temps.....	110
6.3	Méthodes associées aux réseaux viaire et collectif.....	111
6.3.1	Calcul d'arbre sur un réseau de voirie.....	111
6.3.2	Le calcul de chemin.....	114
6.3.3	Problèmes du commis-voyageur et du postier chinois.....	114
6.3.4	Fusion de la table des temps de marche au réseau de voirie.....	116
6.4	L'approche floue en transport.....	119
6.4.1	Présentation.....	119
6.4.2	Exemple d'utilisation de l'approche floue.....	120
6.4.3	Propriétés, méthodes et objets dérivés.....	122
CHAPITRE 7: PROPRIÉTÉS ET MÉTHODES LIÉES À LA DEMANDE DE		
TRANSPORT.....		124
7.1	La demande de transport.....	125
7.1.1	Définition.....	125
7.1.2	Obtention des objets de la demande à l'aide d'une enquête origine-destination.....	125
7.1.3	Intégration des objets de la demande.....	126
7.2	Propriétés des objets individuels d'enquêtes origine-destination.....	128
7.2.1	Propriétés de l'objet Ménage individuel.....	128
7.2.2	Propriétés de l'objet Personne individuel.....	129
7.2.3	Propriétés de l'objet Déplacement individuel.....	129
7.2.4	Autres objets individuels.....	130
7.3	Méthodes appliquées aux individus et aux collections d'objets d'enquêtes origine-destination.....	130
7.3.1	Méthodes appliquées aux déplacements individuels.....	131
7.3.2	Méthodes appliquées à la collection de déplacements individuels.....	132
7.3.3	Méthodes applicables aux objets Personne.....	134
7.3.4	Méthodes applicables aux objets Ménage.....	135

7.4	La visualisation	135
7.4.1	Modèle-objets du déplacement individuel désagrégé	136
7.4.2	Visualisation du déplacement	137
7.4.3	Visualisation de la personne	139
7.4.4	Visualisation du ménage	140
7.5	Le traitement de données spatialisées	140
7.5.1	Premier niveau: adjacence, proximité, inclusion, connexité	141
7.5.2	Deuxième niveau: agrégation, union, soustraction	143
7.5.3	La désagrégation artificielle	146
7.6	La création de nouvelles classes d'objets de demande	149
7.6.1	La création de l'objet Activité	150
7.6.2	La création de l'objet Statut	151
7.6.3	La création de l'objet Automobile	153
7.6.4	La création de l'objet Générateur	155
7.6.5	Modèle-objets de l'enquête origine-destination (enrichi)	156
CHAPITRE 8: APPLICATION DE L'APPROCHE ORIENTÉE-OBJET À LA MODÉLISATION TOTALEMENT DÉSAGRÉGÉE		158
8.1	Affectation des déplacements	159
8.1.1	Extraction	159
8.1.2	Validation	160
8.1.3	Simulation	161
8.1.4	Chargement	162
8.2	Modèles prévisionnels axés sur la socio-démographie	164
8.2.1	Prévision de la demande	164
8.2.2	Répartition modale	164
8.3	Statistiques agrégées	166
8.3.1	Compilations de statistiques sur la mobilité	166
8.3.2	Statistiques sur les générateurs de déplacements	167

8.4	Procédures avancées	168
8.4.1	Effets de débordement (ressources consommées)	168
8.4.2	Information à l'utilisateur (calcul de chemins)	168
CONCLUSION		170
RÉFÉRENCES		178
ANNEXES		188

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Sigles utilisés dans le domaine des SIG	27
Tableau 3.1: Variables d'enquêtes ménage origine-destination de la STCUM	33
Tableau 4.1: Avantages de l'approche orientée-objet.....	64
Tableau 4.2: Inconvénients de l'approche orientée-objet.....	64
Tableau 5.1: Propriétés d'identification	78
Tableau 5.2: Propriétés de dénomination	79
Tableau 5.3: Propriétés géométriques.....	79
Tableau 5.4: Propriétés pseudo-géométriques	80
Tableau 5.5: Propriétés spatiales	80
Tableau 5.6: Propriétés temporelles	81
Tableau 5.7: Propriétés socio-écono-démographiques.....	81
Tableau 5.8: Propriétés opérationnelles	82
Tableau 5.9: Propriétés contextuelles.....	82
Tableau 5.10: Propriétés de classification	83
Tableau 5.11: Méthodes de propriété	85
Tableau 5.12: Méthodes intrinsèques.....	85
Tableau 5.13: Méthodes géométriques	86
Tableau 5.14: Méthodes de visualisation.....	86
Tableau 5.15: Méthodes génératrices	87
Tableau 5.16: Méthodes statistiques	88
Tableau 5.17: Méthodes spatiales.....	90
Tableau 5.18: Méthodes associatives.....	90

Tableau 5.19: Méthodes complexes	91
Tableau 6.1: Classes de rue du réseau de voirie montréalais	101
Tableau 6.2: Extrait de la table des temps de marche (STCUM)	109
Tableau 6.3: Transposition objet de l'algorithme de Dijkstra.....	112
Tableau 7.1: Quelques méthodes applicables aux objets Personne.....	134
Tableau 7.2: Quelques méthodes applicables aux objets Ménage	135
Tableau 7.3: Quelques propriétés et méthodes des objets d'enquête origine- destination.....	137
Tableau 7.4: Quelques propriétés et méthodes de l'objet Activité	151
Tableau 7.5: Quelques propriétés et méthodes de l'objet Statut.....	153
Tableau 7.6: Quelques propriétés et méthodes de l'objet Automobile	154
Tableau 7.7: Quelques propriétés et méthodes de l'objet générateur.....	155
Tableau 8.1: Méthode ExtraireItinéraires	160
Tableau 8.2: Méthode Validation et ses dépendants	161
Tableau 8.3: Méthodes de simulation	162
Tableau 8.4: Méthode de chargement.....	163
Tableau 8.5: Méthode de statistiques sur les noeuds	163
Tableau 8.6: Méthode de statistiques sur les nœuds	165
Tableau 8.7: Méthode de répartition modale par seuils incrémentaux	165
Tableau 8.8: Méthode de compilation de statistiques agrégées sur la mobilité.....	166
Tableau 8.9: Méthode de compilation de statistiques agrégées sur la mobilité.....	167
Tableau 8.10: Méthode de statistiques sur les noeuds.....	168
Tableau 8.11: Méthode de calcul de chemins dans le cadre d'un système d'information à l'usager	169

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Entités analytiques de l'approche agrégée	9
Figure 1.2: Étapes de détermination du comportement individuel des usagers (KANNEL et HEATHINGTON, 1973)	12
Figure 1.3: Le déplacement individuel totalement désagrégré	15
Figure 1.4: Grandes lignes du totalement désagrégré	17
Figure 1.5: Les niveaux de désagrégation	18
Figure 2.1: Le système informationnel (CHAPLEAU, 1996)	21
Figure 2.2: Relations entre les éléments du système informationnel (basé sur CHAPLEAU, 1996)	22
Figure 2.3: Le territoire	24
Figure 2.4: Les réseaux de transport	24
Figure 2.5: La demande	24
Figure 2.6: L'opération	25
Figure 2.7: Relations entre les éléments de données	25
Figure 2.8: Les quatre états de la donnée dans un SIG	28
Figure 2.9: Exemple d'utilisation du point	28
Figure 2.10: Exemples d'utilisation de la ligne	29
Figure 2.11: Exemples d'utilisation du polygone	29
Figure 2.12: Exemple de cartographie thématique à l'aide d'un SIG	31
Figure 3.1: Les enquêtes ménage	34
Figure 3.2: Les enquêtes <i>in situ</i> origine-destination	35
Figure 3.3: Les comptages et les comptes	36

Figure 3.4: Composantes fonctionnelles d'UTPS	39
Figure 3.5: Le logiciel GNE.....	39
Figure 3.6: Environnement MADCADD sous AutoCAD Windows.....	42
Figure 3.7: Écran principal de MADIGAS (version DOS)	43
Figure 3.8: Écran principal du logiciel MADPREP.....	45
Figure 3.9: Écran type de MADEOD sous Excel.....	46
Figure 3.10: Écran type de MADGEN sous Excel.....	46
Figure 3.11: Environnement Maptitude.....	49
Figure 3.12: Facilités de quelques outils d'analyse spatiale.....	50
Figure 4.1: Exemple de réutilisation d'un objet programmé	52
Figure 4.2: Classes et objets	54
Figure 4.3: Objet, propriété, méthode et évènement	55
Figure 4.4: Abstraction et encapsulation.....	56
Figure 4.5: Distinction entre agrégation et généralisation.....	57
Figure 4.6: Distinction entre succession, association et collaboration.....	58
Figure 4.7: Exemple d'utilisation de la notation de Booch (par SCHNEIDER).....	59
Figure 4.8: Éléments de la notation de Coad.....	60
Figure 4.9: Modélisation d'un club vidéo en notation Martin et Odell (STRIJBOS et al.)	61
Figure 4.10: Extrait d'un diagramme utilisant la notation OMT et la méthode Rumbaugh (HINSHAW et ARNAUD).....	62
Figure 4.11: Exemple de notations de la méthode Shlaer et Mellor (SHLAER et MELLOR, 1996)	63
Figure 5.1: Exemple de modèle-objets dans PoeT	67

Figure 5.2: Utilisation du modèle STROBOSCOPE.....	68
Figure 5.3: Évolution de l'objet de transport dans l'univers informationnel.....	71
Figure 5.4: Aperçu de la notation utilisée pour les modèles-objets.....	73
Figure 5.5: Quelques objets de transport par métaclasse.....	74
Figure 5.6: Superposition d'objets cinétiques aux objets statiques.....	75
Figure 5.7: Application de propriétés pseudo-géométriques.....	80
Figure 5.8: Exemple de propriétés contextuelles.....	82
Figure 5.9: Les valeurs de propriétés.....	84
Figure 5.10: Méthodes intrinsèques de l'objet collection.....	86
Figure 5.11: Méthode de visualisation d'un système d'information géographique.....	87
Figure 5.12: Exemple de méthode génératrice: la création d'un objet Arbre à partir d'un objet Nœud.....	88
Figure 5.13: Exemple de méthode statistique.....	89
Figure 5.14: MADGEN, autre exemple de méthode statistiques.....	89
Figure 5.15: Exemple d'objet système.....	91
Figure 5.16: Quelques relations "1 à n".....	92
Figure 5.17: Deux représentations de la même collection.....	92
Figure 5.18: Exemples de collections orientées (chronologique et géométrique).....	93
Figure 5.19: Fichier unifié d'enquête origine-destination.....	94
Figure 5.20: Modèle-objets de l'enquête origine-destination.....	95
Figure 6.1: De la topologie à l'objet RéseauViaire.....	99
Figure 6.2: Hiérarchisation du réseau de voirie pour fins de transport.....	100

Figure 6.3: Modèle-objets élargi du réseau de voirie	102
Figure 6.4: Propriétés des nœuds du réseau de voirie	103
Figure 6.5: Propriétés des liens et des arcs selon la fonction du réseau de voirie	103
Figure 6.6: Modèle-objets du réseau de transport collectif (cas montréalais)	105
Figure 6.7: Système-objets de la tournée de transport collectif	106
Figure 6.8: Quelques niveaux de résolution disponibles pour le réseau de transport collectif montréalais	108
Figure 6.9: Géométrie variable du réseau TC: la naissance quotidienne du réseau montréalais	109
Figure 6.10: Diagramme espace-temps de la ligne 10, direction nord (jour de semaine)	110
Figure 6.11: Diagramme espace-temps de la ligne 67, direction nord (jour de semaine)	111
Figure 6.12: Calcul d'arbre du chemin le plus court sur réseau de voirie	113
Figure 6.13: Fabrication d'un "gauche-droite" à partir d'un objet Chemin	114
Figure 6.14: Transposition objet du problème du commis-voyageur	116
Figure 6.15: Transfert de propriétés entre le réseau de transport collectif et le réseau de voirie	117
Figure 6.16: Modèle-objets associé au transfert de propriétés	118
Figure 6.17: Système-objets et modèle-objets de l'opérateur dans le cadre du système informationnel	121
Figure 6.18: Système et modèle-objets du réseau piétonnier de l'utilisateur de transport collectif	121
Figure 7.1: Modèle-objets de la demande de transport	127

Figure 7.2: Méthodes de traitement de l'objet déplacement individuel dans l'approche totalement désagrégée	133
Figure 7.3: Modèle-objets du déplacement individuel désagrégé (sans objet dérivé)	136
Figure 7.4: Lignes de temps	138
Figure 7.5: Symbolique et coloration des déplacements.....	138
Figure 7.6: Deux représentations d'un déplacement.....	138
Figure 7.7: Représentation spatio-temporelle des déplacements	139
Figure 7.8: Diagramme d'activité en barres	140
Figure 7.9: Opérateurs spatiaux de premier niveau.....	141
Figure 7.10: Proximité des objets cinétiques et dynamiques	142
Figure 7.11: Quelques référentiels appliqués à des distances.....	142
Figure 7.12: L'agrégation d'objets de transport.....	144
Figure 7.13: Méthode générale d'agrégation orientée-objet	146
Figure 7.14: Principes de la désagrégation artificielle.....	147
Figure 7.15: Exemple d'application de la désagrégation artificielle	149
Figure 7.16: Activités et patron de déplacements	150
Figure 7.17: Exemple simplifié de dérivation de statuts	152
Figure 7.18: Déplacements-personnes VS déplacements-voitures.....	154
Figure 7.19: Modèle-objets enrichi de l'information provenant des enquêtes origine-destination	156

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A.	MODÈLES-OBJETS.....	188
ANNEXE B.	SUPPLÉMENT SUR LES RÉSEAUX DE VOIRIE	205
ANNEXE C.	MADTOO: MODÈLE D'ANALYSE DÉSAGRÉGÉE	
	TRANSPORT ORIENTÉ OBJET.....	208
ANNEXE D.	MADAME: MODULE D'ANALYSE DÉSAGRÉGÉE DES	
	ATTRIBUTS ET MÉTHODES DE DONNÉES D'ENQUÊTES.....	214
ANNEXE E.	LA VISUALISATION INTÉGRÉE DES DONNÉES D'ENQUÊTE	
	À L'AIDE D'UNE APPLICATION EXCEL.....	224

INTRODUCTION

Les méthodes agrégées de planification des transports ont été développées lorsque les données étaient rares et les moyens limités. Aujourd'hui, le planificateur de transport doit arriver à synthétiser la quantité d'information dont il dispose afin de l'intégrer dans une modélisation axée sur les données. Cette utilisation efficace des données vise de plus à appuyer son rôle de leader au sein du système informationnel de son organisation.

En transport, peu de chercheurs s'intéressent aux nouvelles méthodes de traitement de l'information et à la validité des données disponibles, et ce même si ces dernières s'avèrent de plus en plus nombreuses et complexes. L'apport des nouvelles technologies de cueillette d'information (GPS, cartes à puce, comptes à bord automatiques, etc.) est certes bénéfique sur le plan pratique; elle confronte cependant le praticien à une masse d'information qu'il ne peut traiter efficacement à l'aide des outils et modèles de "l'époque" agrégée. En effet, la procédure séquentielle classique (PSC), le fer de lance de l'approche agrégée, reste tenacement implantée en tant que paradigme dominant du milieu de la planification des transports.

Durant les dernières années, on a assisté à une extraordinaire évolution des outils informatiques (matériel, logiciels) et de télécommunication (mesure, information). L'utilisation de langages de programmation dits "d'application" et de l'approche orientée-objet sont en croissance dans plusieurs domaines scientifiques. Pour leur part, les systèmes d'information géographique dans les organismes de transport ne font plus de doute quant à leur utilité.

Le défi compte donc plusieurs facettes: quantité et qualité des données, technologies émergentes et systèmes informationnels en mutation versus des modèles fondés sur des approches agrégées. Les enjeux ne sont donc pas que technologiques. Sous la perspective d'un processus où les prévisions (long terme) se mêlent aux aspects opérationnels (court terme) par le recoupage des données, les méthodes de

planification fondées sur des approches agrégées doivent laisser place à des méthodes de planification interactive, basées sur l'intégration et la conservation de l'information.

Le présent document décrit un processus de recherche conduisant à la dérivation d'une *approche orientée-objet appliquée à la modélisation totalement désagrégée en transport urbain*. Cette approche propose une vision novatrice du domaine de la modélisation en transport en ce qui concerne l'utilisation des données disponibles à bon escient. Elle confirme également la présence depuis plus d'une décennie d'un nouveau paradigme en planification des transports: l'approche totalement désagrégée. Cette approche se veut un remplacement des modèles agrégés et désagrégés classiques, jugés inadéquats face aux nouveaux défis méthodologiques du planificateur. *La thèse pose comme hypothèse fondamentale que l'approche totalement désagrégée permet de faire face aux défis du planificateur grâce à la présence d'une approche orientée-objet à ses côtés.* Elle vise à développer les aspects conceptuels, architecturer et identifier les méthodes actuelles et futures de traitement et d'analyse des composantes de l'offre (réseaux) et de la demande (déplacements) dans un cadre totalement désagrégé et orienté-objet. Elle vise également la création et l'expérimentation d'outils logiciels associés.

En premier lieu, une revue de littérature permet de vérifier l'état actuel des connaissances en planification des transports urbains. Un survol des grandes approches de modélisation y est effectué: approche agrégée par zones, modèles d'équilibre et approche désagrégée visant la modélisation individuelle des comportements des usagers. Une insistance particulière est apportée sur l'approche totalement désagrégée, plus récente et réceptive à l'analyse par objets. Un chapitre traite exclusivement des systèmes informationnels en transport, qui sont les instruments de support à la modélisation totalement désagrégée. Un accent est porté sur les systèmes d'information géographique (SIG), devenus essentiels dans l'examen, la modélisation et la planification des transports. Les instruments de planification des transports sont ensuite décrits, ce qui permet de constater l'éventail d'outils accessibles

au praticien, qui vont des enquêtes et autres processus de cueillette aux logiciels de modélisation totalement désagrégée.

Une brève description de la méthodologie orientée-objet est présentée: définition, nomenclature, notation. La dissertation présente ensuite une approche orientée-objet dite "de transport", c'est-à-dire propre à la modélisation et à la planification des transports et basée sur les assises de l'approche totalement désagrégée. Parmi les sujets traités, il y a la description de quelques utilisations de l'approche orientée-objet en transport, la définition de l'objet de transport et de la notation associée ainsi que l'identification des quatre métaclasse de transport et les propriétés et méthodes qui leur sont propres.

Le cœur expérimental de cette thèse est présenté dans trois chapitres.

Le premier de ces chapitres traite des propriétés et méthodes associées à des réseaux de transport viaire et collectif et démontre l'aptitude de l'approche préconisée à manier les aspects topologiques et spatio-temporels des réseaux de transport. Le réseau de voirie y est décrit à l'aide d'un modèle-objets et des éléments nécessaires à sa caractérisation, tel que sa topologie et sa hiérarchie. La description du réseau de transport collectif fait état de la problématique des niveaux de résolution et de la temporalité qui l'habitent. Une approche floue de construction d'information est quelquefois requise pour mieux intégrer, sinon compléter, les données disponibles. L'expérimentation utilise le logiciel MADTOO, créé pour appuyer la manipulation des objets de réseaux, dont les caractéristiques sont décrites en annexe.

Le chapitre "Propriétés et méthodes liées à la demande de transport" dresse son argumentation sur les capacités de l'approche orientée-objet, couplée à l'approche totalement désagrégée, à mettre en forme les données des grandes enquêtes origine-destination, à y appliquer des méthodes de visualisation et de traitement des données spatiales ainsi que plusieurs autres méthodes applicables en cascade aux objets de demande. Le chapitre énonce également une des forces de l'approche orientée-objet façon transport, qui est son habileté à créer de nouveaux objets applicables à de

nouvelles analyses. Le logiciel MADAME vient y appuyer les expérimentations par la création de rapports constitués de nœuds-méthodes appliqués aux collections et aux objets individuels de la demande. Les détails de cette expérimentation sont présentés en annexe.

Les modèles disponibles dans l'approche totalement désagrégée sont présentés en termes objets dans le dernier chapitre. Des applications aussi variées que l'affectation sur les réseaux de transport collectif, la prévision de la demande de transport et l'analyse des générateurs y sont exposées afin de démontrer la dualité qui existe entre la modélisation totalement désagrégée, liée à l'individu, et la modélisation par objets.

Cette thèse offre au lecteur non seulement un éventail de nouveaux concepts liés à la modélisation orientée-objet en transport, mais également une série de pistes sur les extensions de l'approche totalement désagrégée et orientée objet dans le domaine de la planification des transports.

CHAPITRE 1: LES AXES DE MODÉLISATION EN TRANSPORT

Les méthodes de planification des transports urbains s'appuient sur peu de paradigmes. La procédure séquentielle classique, premier véritable effort de modélisation en transport, est toujours largement utilisée. Les nombreuses retouches et "améliorations" qui y ont été apportées n'ont jamais ébranlé le schème initial, basé sur une synthèse spatiale de la génération, de la distribution, de la répartition modale et de l'affectation des déplacements. Cette vision séquentielle des choses avait certes du mérite à l'ère pré-informatique, où les ressources en temps machine étaient limitées. Aujourd'hui, il demeure nécessaire de remettre en question l'utilisation de la procédure séquentielle classique (ATKINS, 1986). Ce chapitre présente successivement les approches agrégée, désagrégée et totalement désagrégée afin de permettre au lecteur de bien cerner les différences (quelquefois fondamentales) entre ces méthodes de planification des transports.

1.1 L'approche agrégée

L'approche agrégée est de loin la plus utilisée dans le domaine de la planification des transports urbains. Elle est directement dérivée des premières préoccupations liées aux études de transport rendues nécessaires face au développement anarchique du réseau autoroutier américain dans les années 50. Les planificateurs ont tiré profit de la simplicité de l'approche et de ses modèles préconisés pour la disséminer et la mettre en application (STOPHER, MEYBURG, 1975). Ces méthodes ont ensuite été informatisées, ce qui fait que les logiciels actuels sont directement dérivés de la méthode manuelle sur papier.

L'approche repose essentiellement sur l'application, dans le cadre d'études de transport, de la procédure séquentielle classique (PSC), aussi appelée "chaîne globale transport" (CGT). Cette méthodologie de traitement de l'information possède quelques variantes s'appuyant sur des données, des applications et des logiciels particuliers,

mais toutes s'identifient aux étapes suivantes (DOMENCICH et MCFADDEN, 1975): génération des déplacements, distribution, répartition modale et affectation sur le réseau.

1.1.1 La procédure séquentielle classique

La procédure séquentielle classique (PSC), ou chaîne globale transport (CGT), permet d'estimer la demande de transport pour un territoire donné et de "simuler" les effets engendrés par les déplacements sur les réseaux. Les planificateurs reconnaissent qu'il s'agit d'une estimation, mais la jugent suffisante pour l'analyse (DICKY, 1983). La PSC compte habituellement quatre étapes (paragraphe suivants).

La génération des déplacements permet de déterminer, pour chaque centroïde de zone, le nombre de déplacements émis et attirés. Les taux de génération sont choisis afin de considérer les caractéristiques socio-démographiques et économiques de chaque zone. La génération se fait habituellement à partir du nombre de personnes ou de ménages, tandis que l'attraction considère des attributs économiques tel que le nombre d'emplois et d'inscriptions scolaires. Les deux équations suivantes résument l'étape de génération.

$$P_i = p * H_i$$

où P_i est le nombre de déplacements émis par la zone i , p le taux de génération et H_i la population (ou une autre caractéristique pertinente).

$$A_{ik} = A_{ik}^* + b_k E_i^r + c_k E_i^n + d_k H_i$$

où A_{ik} est le nombre de déplacements attirés par la zone i pour le motif k , déterminé par les variables économiques E et H , affectées des poids b , c et d .

Les paramètres de génération peuvent provenir d'enquêtes sur les déplacements effectuées sur le terrain ou être obtenus à la suite d'un traitement de données d'enquêtes origine-destination. Toutefois, un grand nombre de planificateurs utilisent

des tables de paramètres de génération, tel que celle publiée par l'Institute of Transportation Engineers (ITE).

La distribution des déplacements consiste à répartir les déplacements entre les points d'origine et de destination (centroïdes de zones) grâce à une fonction de friction permettant de calculer la pénibilité entre deux zones. Les équations suivantes démontrent un exemple de calcul de distribution utilisé dans le logiciel QRS II (HOROWITZ, 1992).

$$T'_{ijk} = P_{ik} \frac{B_{jk}^s f_k(t_{ij})}{\sum_{j=1}^n B_{jk}^s f_k(t_{ij})} \left| \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n T'_{ijk} = A_{jk} \text{ pour } j=1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n T'_{ijk} = P_{ik} \text{ pour } i=1, \dots, n \end{array} \right.$$

où les T_{ij} sont les cellules de la matrice origine-destination, les B_{jk} des facteurs d'ajustement permettant de "balancer" la matrice et f_k la fonction d'impédance (friction). Cette fonction peut prendre quelques formes, habituellement exponentielles. Une de ces formes est le modèle de gravité, tiré de la loi de Newton de 1686, où les zones éloignées sont moins enclines à partager des déplacements.

$$f_k(t_{ij}) = e^{-\beta_k t_{ij}} \quad (\text{forme exponentielle})$$

où les t_{ij} sont des distances ou des temps.

$$\frac{f_k(t_{ij})}{f_k(t_{ij})=1} = \frac{1}{t_{ij}^{\beta_k}} \quad \text{pour } t_{ij} > 0 \quad (\text{forme puissance})$$

$$\frac{f_k(t_{ij})}{f_k(t_{ij})=1} = 1 \quad \text{pour } t_{ij} = 0$$

La répartition modale effectue le partage des déplacements distribués entre les modes existants (auto, transport collectif) grâce à une fonction de répartition fondée sur le comportement des usagers. Le modèle "logit" est souvent utilisé comme fonction de répartition. Son équation est la suivante:

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

où $P(i)$ est la probabilité d'utilisation du mode i et U_i l'utilité de ce mode.

L'affectation des déplacements est l'action d'associer les déplacements aux réseaux routiers et de transport collectif. Il ne s'agit pas d'une étape de modélisation semblable aux trois précédentes, mais bien d'une tentative de refléter les flots sur les liens du réseau (STOPHER et MEYBURG, 1975). Cette opération s'effectue par l'attribution de chemins les plus courts à l'aide d'algorithmes tels ceux de Ford ou Dijkstra, couplés à des algorithmes d'équilibrage des flots et temps tels que ceux de Frank-Wolfe et Monte Carlo (LEURENT, 1995). Les temps γ sont exprimés en fonctions de flots, tel que l'équation suivante du Bureau of Public Roads (BPR).

$$T = T_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{V}{C} \right)^\beta \right]$$

où T_0 est le temps en écoulement libre, V le débit et C la capacité du lien. Les valeurs de α et β (paramètres de lissage) sont le plus souvent 0,015 et 4. L'affectation à l'équilibre des déplacements constitue l'un des domaines de recherche les plus actifs en transport. Après avoir offert des algorithmes permettant d'obtenir une convergence en régime permanent, les travaux portent maintenant sur les algorithmes dynamiques, avec recalcul des chemins à chaque point de jonction (BEN-AKIVA et al., 1996), ce qui vise, selon les auteurs, à refléter les comportements des usagers.

La procédure séquentielle classique compte plusieurs variantes, tel que le retour en arrière ("feed-back") vers une des étapes, ou la combinaison d'opérations (SLAVIN, 1996). Par exemple, la génération et la distribution peuvent se voir remplacées par une matrice origine-destination obtenue à la suite d'une enquête origine-destination.

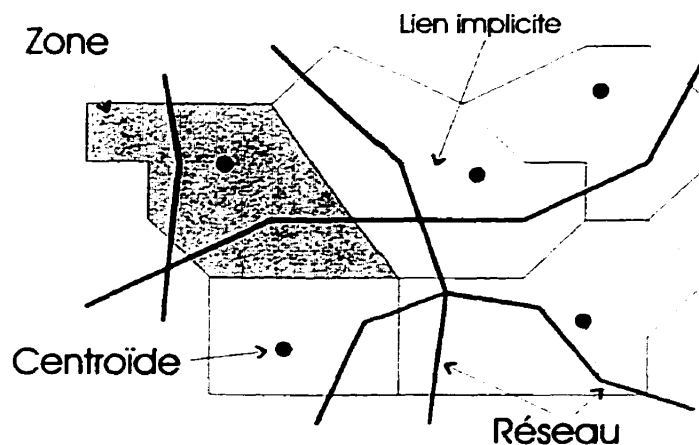


Figure 1.1: Entités analytiques de l'approche agrégée

1.1.2 Le découpage zonal

La modélisation agrégée implique le découpage du territoire d'étude en zones analytiques de transport (TAZ, "traffic analysis zones"). Ces éléments visent à représenter les caractéristiques de mobilité (génération et attraction) regroupées d'un secteur géographique donné. Cela permet 1) de pallier le manque de résolution des données disponibles (et afin de respecter les règles de signifiante statistique) et 2) de répondre aux hypothèses des modèles utilisés. Le nombre de zones peut varier énormément d'une étude à l'autre, tout dépendant entre autres du logiciel et de la méthode utilisés. Elles sont déterminées en vue de maximiser les regroupements de caractéristiques socio-démographiques homogènes et minimiser le nombre de déplacements intra-zonaux. Elles s'efforcent de respecter les limites physiques, géographiques, politiques ou économiques, lorsque possible (ITE, 1994). Pour fins de modélisation, chaque zone (et ses attributs) sont symbolisés par un seul point: le centroïde. L'accès aux zones est représenté par des liens implicites, codés pour relier les centroïdes aux réseaux utilisés pour les études. Dans les modèles agrégés, toutes les distances sont définies par rapport aux centroïdes de zone.

1.1.3 État actuel et critiques

Bien qu'elle soit utilisée par la grande majorité des planificateurs de transport, l'approche agrégée en transport fait face, depuis plusieurs années, à de nombreuses critiques. En fait, même avec les plus récents développements technologiques et certains réarrangements au sein des étapes de modélisation, il semble que l'approche – et en particulier la procédure séquentielle classique – n'arrive pas à satisfaire les intervenants (ATKINS, 1986). L'essence de la modélisation agrégée a été remise en cause par STOPHER et MEYBURG dès 1975. Ceux-ci doutent de sa flexibilité et sa réponse aux besoins des services de planifications, qui requièrent souvent des solutions multiples et facilement adaptables aux réalités du milieu. En outre, non seulement les réponses données par la méthode ne sont pas satisfaisantes, mais on se questionne sur les objectifs du processus et la structure de modélisation, jugée trop rigide.

Chaque étape de la procédure séquentielle classique présente des éléments discutables. La génération des déplacements démontre des lacunes en ne considérant pas l'offre de transport (réseau, routes, etc.) et en utilisant des taux fixes souvent trop élevés ou inapplicables à la région étudiée (DICKY, 1983). Dans ce cas, l'agrégation des données pose un problème en masquant la véritable nature causale des variables (KANNEL et HEATHINGTON, 1973). Pour sa part, la distribution est une opération extrêmement sensible au découpage zonal, à la configuration du réseau et à la fonction de friction utilisée. Plusieurs critiquent le fait que malgré leur capacité de répartir les déplacements entre les zones, les modèles de distribution classiques ne puissent pas modifier le nombre total de déplacements. Les étapes de répartition modale et d'affectation sont également un point de mire de certains chercheurs. La répartition modale, bien qu'elle puisse introduire l'effet des politiques de transport, ne peut pas interagir sur ses étapes précédentes et ne fait que diviser les déplacements entre les modes (DOMENCICH et MCFADDEN, 1975). Les modèles d'affectation à l'équilibre sont aussi remis en question, tant au point de vue mathématique que conceptuel. Par exemple, une affectation à l'équilibre dépend de l'état de chaque lien

du réseau routier. Cela signifie que pour une légère perturbation (exemple, enlèvement ou ajout d'un lien), tous les autres liens voient leurs attributs modifiés.

1.1.4 Réflexions sur l'approche agrégée

Aujourd'hui encore, des milliers de praticiens se penchent sur les diverses composantes de la procédure séquentielle classique en vue de l'adapter à leurs préoccupations. Les modèles de génération et de distribution ont été examinés surtout au cours des années 70; ils ont été vite délaissés car leur application ne représente pas de défi mathématico-conceptuel important. Les modèles de répartition modale et d'affectation ont profité des développements en statistique et en informatique. Ils font encore l'objet de recherches intensives, comme en font foi la majorité des logiciels de planification et de simulation. Les planificateurs effectuent des simulations sur des réseaux de plus en plus denses en termes de nombre de zones, mais peu se demandent si cette agrégation en zones a un effet quelconque sur les résultats obtenus. Le paradigme initial demeure: les praticiens continuent à utiliser des séries de modèles appliqués en cascade, chaque modèle étant supposé fournir des données "parfaites" au suivant, alors que les opérations de découpage zonal affectent dès le départ le niveau de résolution des données et l'information qu'il est possible d'en tirer.

1.2 L'approche désagrégée

Face à certaines lacunes de l'approche agrégée en transport, des économistes tels que DOMENCICH et MC FADDEN (1975) ont transposé des modèles économiques au domaine des transports pour donner naissance à l'approche désagrégée au début des années 1970.

1.2.1 Fondements

L'approche désagrégée vise à modéliser le comportement individuel des usagers de transport. Ainsi, par une série d'équations et d'hypothèses, le planificateur détermine les caractéristiques de mobilité de chaque usager (ou série d'usagers). La Figure 1.2 présente les principaux éléments de modélisation de cette approche.

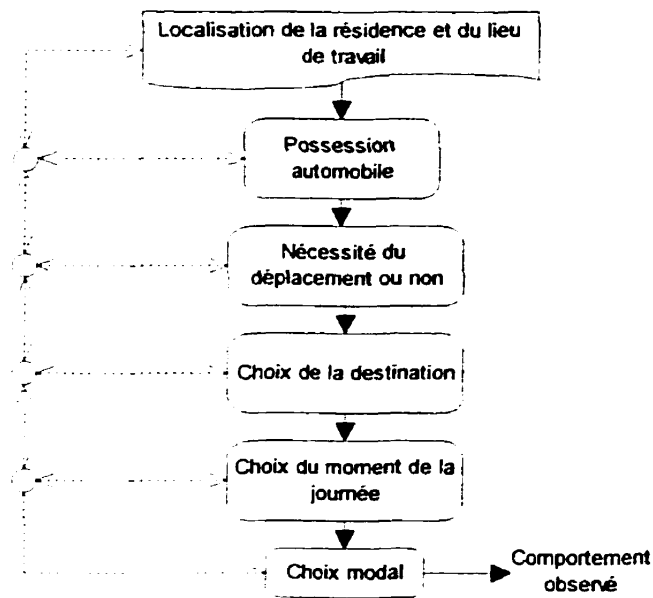


Figure 1.2: Étapes de détermination du comportement individuel des usagers (KANNEL et HEATHINGTON, 1973)

Ces différentes étapes prennent la forme d'équations d'utilité nourries de caractéristiques socio-démographiques de l'utilisateur et des attributs des différentes alternatives. L'équation suivante permet de calculer l'utilité totale d'une série d'alternatives de déplacement, une alternative étant, par exemple, de se déplacer ou non, de prendre l'auto ou non, etc.

$$U(x, s) = \psi \left(\sum_i \phi'(x_{(i)}, s) \right)$$

où $x_{(i)}$ est le vecteur d'attributs d'une alternative de déplacement, s le vecteur socio-démographique, ϕ et ψ des fonctions permettant l'addition des utilités. Le calibrage d'une telle série d'équations s'effectue à l'aide d'une enquête origine-destination de type ménage, où les questions sont axées sur les aspects socio-démographiques communs: âge, sexe, statut, revenu. L'utilisation complète de l'approche permet d'obtenir une pléiade de matrices origine-destination pouvant être cumulées pour les procédures d'affectation. Certains planificateurs préfèrent n'employer que certaines

parties de la modélisation, notamment la répartition modale (MANHEIM, 1979). Bien qu'elles semblent plus "adaptées" aux problématiques traitées, les méthodes désagrégées sont essentiellement des approches algébriques, et leur usage s'effectue sans tenter de comprendre efficacement les phénomènes sous-jacents.

1.2.2 Caractérisation fine des déplacements

Les systèmes d'information géographiques montés sur des logiciels commerciaux permettent maintenant, notamment aux États-Unis, de localiser rapidement l'origine et la destination d'un déplacement. Bien que de tels outils aient été utilisés dans la géocodification d'enquêtes origine-destination dans le développement de modèles désagrégés (HSIAOS et STERLING, 1993), ils n'ont pas réellement contribué à leur essor car ils supportent eux-mêmes des programmes de modélisation agrégée (voir section 3.2) et n'encouragent pas le traitement individuel de l'information.

1.3 L'approche totalement désagrégée

L'approche totalement désagrégée en transport urbain est issue du traitement des données d'enquêtes origine-destination. L'approche s'étend maintenant à d'autres questions, tel que les travaux publics et l'opération des systèmes de transport collectif, où la quantité phénoménale de données nécessite un examen rigoureux et adapté. Cette section traite de la modélisation totalement désagrégée du transport urbain, tel que préconisée dans les travaux de recherche du groupe MADITUC (*modèle d'analyse désagrégée des itinéraires de transport urbain collectif*) de l'École Polytechnique de Montréal. Une brève présentation des concepts de base, accompagnés de figures et de tableaux, permettra une compréhension et un aperçu des innovations conceptuelles. Les chapitres subséquents de cette thèse traiteront plus en profondeur des systèmes informationnels et des instruments de planification, deux composantes essentielles dans l'utilisation de l'approche.

1.3.1 Le déplacement individuel totalement désagrégé

L'analyse totalement désagrégée est liée à la définition, à l'identification et au traitement individuel des déplacements (de personnes ou de marchandises) (CHAPLEAU, 1992). La première interprétation d'une enquête origine-destination consiste donc à identifier les éléments du déplacement individuel totalement désagrégé. Pour ce faire, chaque déplacement enquêté est décortiqué en trois groupes de variables:

- les variables sur le *ménage*: taille (nombre de personnes), possession automobile, lieu de domicile, etc.
- les variables sur la *personne*: âge, sexe, statut, possession du permis de conduire, etc.
- les variables sur le *déplacement*: origine, destination, heures de départ, motif, modes utilisés, lignes et routes empruntées, points de jonction, etc.

La Figure 1.3 schématise le déplacement individuel totalement désagrégé pour le cas du transport de personnes, en identifiant notamment la multiplicité des modes, l'intermodalité et les considérations face à l'accès à l'origine et à la destination. On remarque que les références spatiales de chaque déplacement sont déterminées à la paire de coordonnées X-Y près selon les géoréférences disponibles.

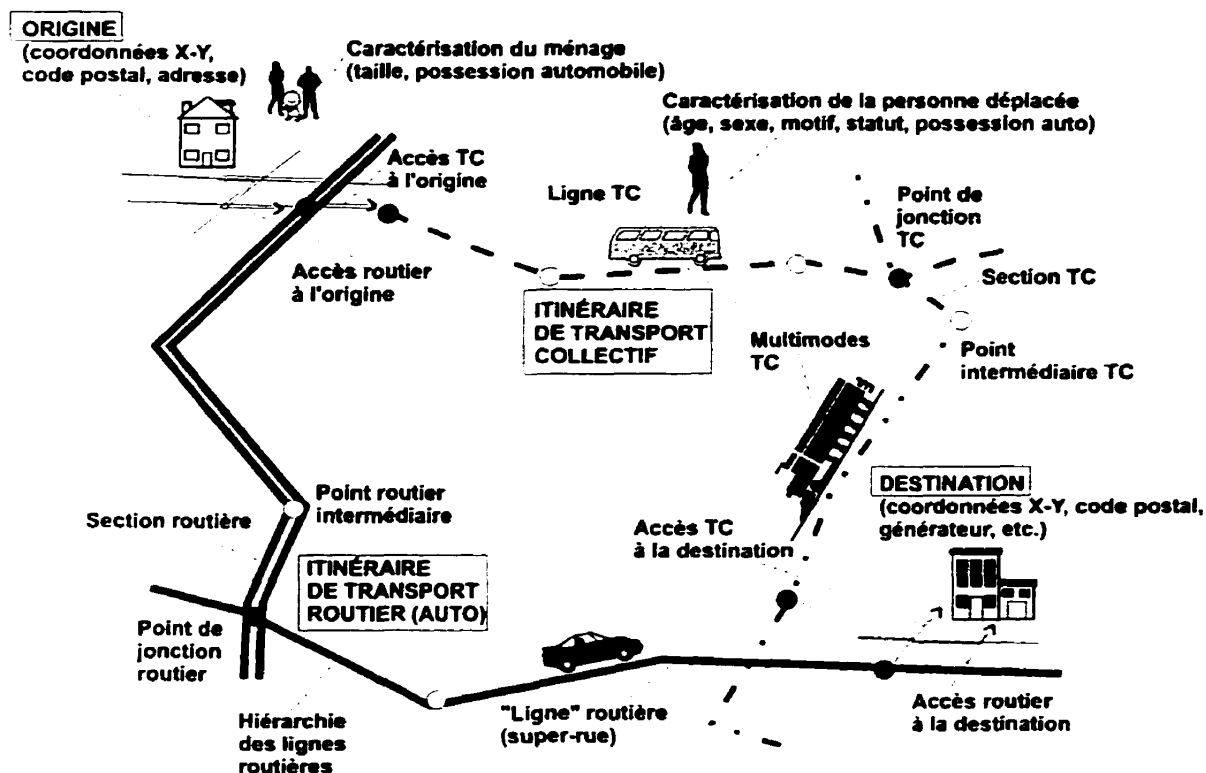


Figure 1.3: Le déplacement individuel totalement désagrégé

1.3.2 Les éléments totalement désagrégés

Le concept de désagrégation ne s'applique pas qu'aux dimensions spatiales et temporelles. Voici une liste descriptive de quelques éléments totalement désagrégés:

- *Désagrégation spatiale.* La méthode affranchit l'association des origines et des destinations à des centroïdes de zones pour passer à une localisation beaucoup plus précise (à la coordonnée X-Y) de toute extrémité de déplacement et point de jonction. Par exemple, le nombre de lieux spatialement différenciés utilisés dans les grandes enquêtes montréalaises a augmenté de 1500 zones (en 1982) à plus de 100000 codes postaux (enquête 1998). Les géoréférences spatiales comprennent maintenant, en plus des codes postaux, les adresses, les intersections et les générateurs de déplacements (édifices).

- *Désagrégation des caractéristiques socio-démographiques des déplacements.* Le traitement individuel de chaque élément déclaré (et même dérivé) lors des enquêtes origine-destination permet de distinguer efficacement les déplacements effectués par chaque personne et d'attacher une caractérisation précise à chacun de ceux-ci (âge, sexe, motif, statut, possession automobile, etc.).
- *Désagrégation chronologique.* La finesse des informations obtenues des grandes enquêtes origine-destination permet de considérer l'heure de départ chaque déplacement quotidien. Des procédures supplémentaires permettent également de déterminer l'heure d'arrivée. Les possibilités de compilations et agrégations s'en voient alors multipliées. Il en est de même pour les analyses touchant le jour de la semaine.
- *Désagrégation des itinéraires.* La conservation de tous les maillons des chaînes de déplacements permet l'analyse de chaque composante en relation avec les antécédents et les suivants. Il est possible de vérifier et étudier chaque lien de chaque ligne de transport collectif (il en est de même pour les liens routiers).
- *Désagrégation des flots.* La désagrégation des itinéraires amène naturellement la décomposition des flots mesurés sur les liens. Les représentations graphiques associées utilisent habituellement une couleur différente pour identifier, pour chaque lien, la provenance et la destination de chaque élément de flot.
- *Désagrégation des modes.* La méthode peut considérer les déplacements multimodaux, ce qui offre une analyse d'un seul ou de plusieurs modes simultanément (autobus, métro, train, automobile, marche, camionnage, etc.).
- *Validation de l'information.* La structuration apportée par l'approche désagrégée au fichier d'enquête origine-destination permet la validation de l'information qui s'y retrouve. En effet, il est possible de vérifier la justesse des réponses au sujet des itinéraires empruntés, des caractéristiques socio-démographiques, etc.

- *Création de variables dérivées.* En plus de la validation, la manipulation informationnelle peut aller jusqu'à la dérivation de statuts pour un individu en vertu de ses habitudes de déplacements (travailleur, étudiant ou autre). En outre, il est possible de dériver des informations manquantes tel que la possession automobile (pour 1993).

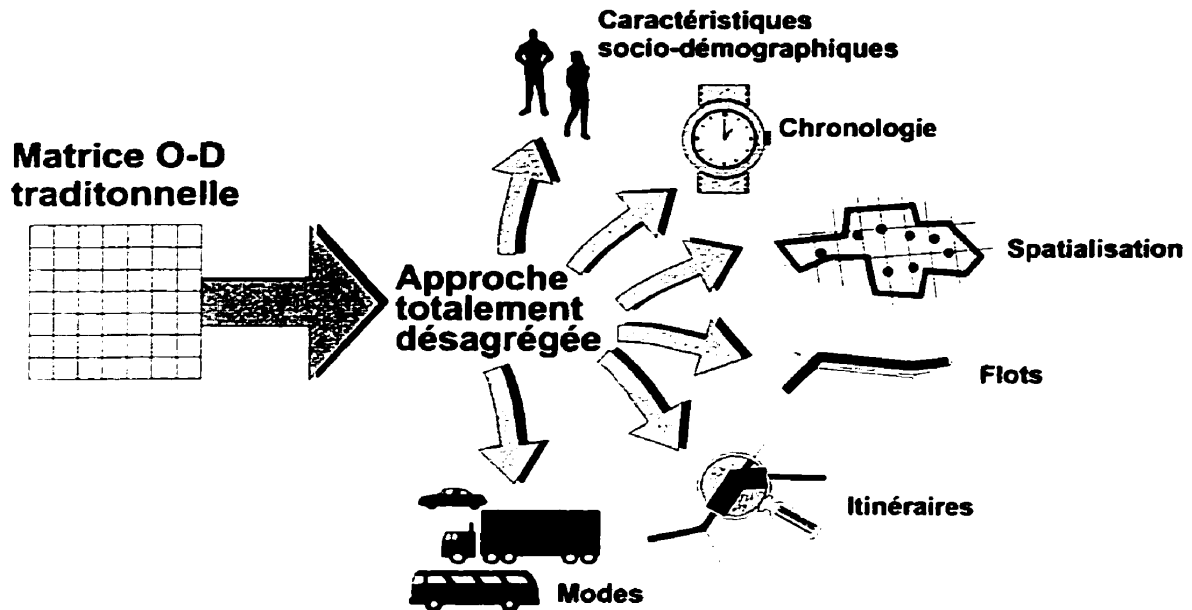


Figure 1.4: Grandes lignes du totalement désagrégé

1.3.3 Les niveaux de désagrégation

La désagrégation informationnelle s'applique sous diverses formes. L'approche totalement désagrégée tente de tirer profit du niveau de désagrégation disponible pour caractériser les données et permettre, si nécessaire, leur agrégation ultérieure. La Figure 1.5 illustre l'univers multidimensionnel qui en découle. Les deux axes horizontaux y représentent le temps et l'espace, cette dernière étant la composante généralement associée au processus d'agrégation. Cependant, toutes les autres variables sont susceptibles de faire l'objet de la désagrégation. En effet l'âge peut être exprimé en années, en cohortes ou en groupes. Le mode peut être agrégé en doublés privé/public, motorisé/non-motorisé, etc. Sur la Figure 1.5, deux opérations

d'agrégation exemplaires sont représentées par des surfaces finies (voir également la section 3.3.3). Ces opérations d'agrégation bénéficient *a priori* des données disponibles sous la forme désagrégée.

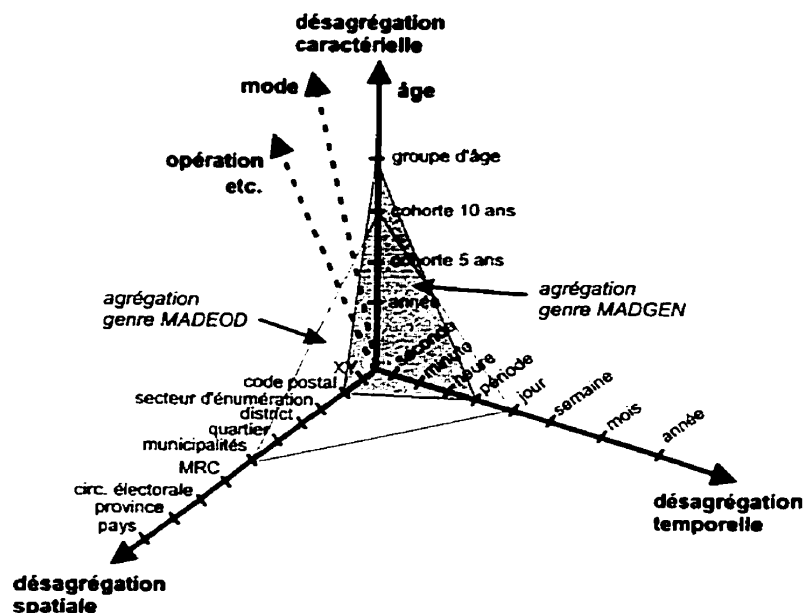


Figure 1.5: Les niveaux de désagrégation

Par exemple:

- **MADGEN** (*modèle d'analyse désagrégée des générateurs de déplacements*) s'attarde à l'étude des générateurs, classe les déplacements par période (8 au cours d'une journée), par code postal (pour identifier chaque monument) et par groupe d'âge (pour maintenir la signifiante des données) (TRÉPANIÉ et CHAPLEAU, 1996);
- **MADEOD** (*modèle d'analyse désagrégée des enquêtes origine-destination*) s'intéresse plutôt aux grandes périodes (4 par jour), aux secteurs (souvent des municipalités) et aux cohortes d'âge (LAVIGUEUR et CHAPLEAU, 1990).

En plus des axes de modélisation en transport, d'autres concepts doivent être examinés afin de mieux comprendre les implications de l'approche totalement

désagrégée dans la planification des transports urbains. À cet effet, le prochain chapitre décrit le rôle des systèmes informationnels en transport au sein de cette approche.

CHAPITRE 2: LES SYSTÈMES INFORMATIONNELS EN TRANSPORT

Les modèles agrégés classiques s'appuient généralement sur une faible quantité de données. L'analyse totalement désagrégée présente une vision diamétralement opposée. Elle utilise toutes les données disponibles, sans en faire de réduction, dans l'application de modèles appliqués à l'individu (personne, ménage, déplacement). Évidemment, cette utilisation extensive de l'information doit être encadrée par des règles, procédures et infrastructures aptes à tenir compte de toute donnée disponible: le système informationnel.

2.1 Le système d'information totalement désagrégé

Dans cette section, un accent sera porté sur les composantes du système d'information totalement désagrégé en transport urbain et les éléments des bases de données sur lequel il s'appuie.

2.1.1 Composantes

L'approche totalement désagrégée offre une définition complète du système informationnel de transport urbain, en ajoutant une dimension "transport" aux définitions classiques (OLSON et al., 1986). Ce système possède les cinq composantes suivantes (CHAPLEAU, 1992):

- *Le personnel technique.* Un certain nombre de professionnels sont liés à la gestion du système informationnel; ils servent de lien entre la réalité et le système informationnel. Eux seuls peuvent efficacement soupeser les intrants et les "extrants" nécessaires au système. Cependant, ils doivent savoir composer avec les influences politiques externes et développer leur champ d'action en établissant des contacts inter-institutionnels.

- *Les procédures.* Il s'agit de l'ensemble des connaissances, méthodes et processus qui s'intègrent au sein de la tradition institutionnelle. Il s'agit d'une composante éminemment culturelle, ponctuée de jugements de valeur et d'éléments qualitatifs devant faire partie du système informationnel.
- *Le matériel.* En constante évolution, les équipements microinformatiques et leurs périphériques apportent au système le support nécessaire à sa gestion. Les technologies émergentes tel que le courrier électronique, les sites INTERNET et les échanges virtuels contribuent à cet essor.
- *Les logiciels.* Ce sont les outils disponibles pour les opérations de gestion, d'analyse et de traitement. Les logiciels sont dits génériques ou d'application, selon leur fonction. Les logiciels sont confondus (à tort) avec les procédures. Ici, on distingue l'aspect "interpréteur de langage" des logiciels dits génériques, lesquels sont "nourris" du langage amené par la transcription en code de la procédure.
- *Les bases de données.* Elles ne constituent qu'une pièce du puzzle et doivent demeurer interreliées avec les autres composantes. La section 2.1.3 développe les thèmes de données utilisés dans l'approche totalement désagrégée: le territoire, les réseaux, la demande et l'opération.

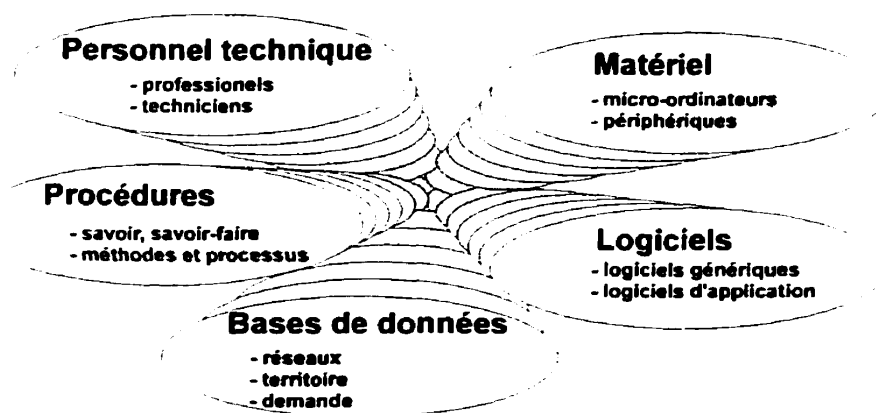


Figure 2.1: Le système informationnel (CHAPLEAU, 1996)

2.1.2 Relations entre les éléments du système informationnel

Les cinq composantes du système informationnel sont interdépendantes en tout point. Aucun système informationnel ne peut être viable si un de ses cinq éléments s'avère manquant ou inadéquat. La Figure 2.2 indique la dualité des relations du système.

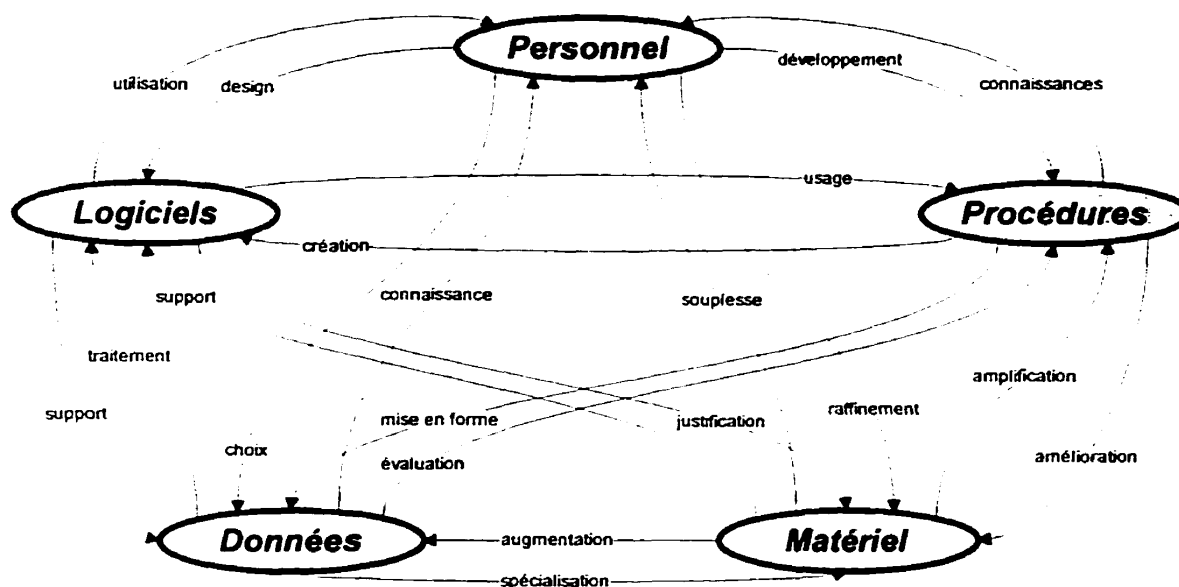


Figure 2.2: Relations entre les éléments du système informationnel (basé sur CHAPLEAU, 1996)

2.1.3 Bases de données

En transport, on peut identifier quatre grands domaines de couverture des données (TRÉPANIER, 1995). Cette classification n'est pas nécessairement rigide. En effet, la cohérence de l'intégration des données dans des logiciels tel que MADITUC en occasionne des usages variés; l'information devient tantôt spatiale (territoriale), tantôt analytiquement multi-fonctionnelle (opération et réseau).

Le territoire. Ces bases couvrent l'ensemble des données touchant les découpages géopolitiques, privés ou analytiques pertinents à l'évolution du système. On y retrouve les systèmes de coordonnées géographiques (UTM, MTM, longitude/latitude), les frontières géographiques et politiques, les unités de recensement ainsi que le code

postal. Ce dernier référentiel est particulièrement important dans le cas canadien puisque l'unité postale y est définie au côté d'ilot, ce qui permet une codification rapide de l'information spatiale.

Les réseaux. Le déplacement des entités de transport est rendu possible grâce aux réseaux définis dans le système. Ceux-ci existent en plusieurs modes (métro, autobus, train, automobile, marche) et sont définis en vertu d'une hiérarchie permettant de cerner des sous-réseaux (exemple: artères, autoroutes). Les réseaux peuvent posséder une configuration dynamique, comme dans le cas du transport en commun, où le nombre et la géométrie des lignes actives varient en fonction du temps. Ils peuvent demeurer géométriquement statiques mais posséder des attributs temporellement variables tel que le temps de parcours des liens dans le cas du réseau routier.

La demande. Les techniques de prise de données en transport sont multiples: enquêtes origine-destination, enquêtes écrans, enquêtes cordons, comptes, comptes à bord, etc. Il en résulte une panoplie de formats informationnels intégrés dans les fichiers de demande, dont les plus importants peuvent atteindre des centaines de mégaoctets. Ils font partie du système informationnel en tant que base informationnelle structurante sur les habitudes de déplacements, l'utilisation des infrastructures, la socio-démographie, etc.

L'opération. Ce sujet regroupe l'information associée à la supervision de l'opération et à la gestion des grandes activités: transport collectif (horaires, parcours, trajets), déneigement (parcours, relevé des opérations, etc.), ou autres. Les bases opérationnelles maintiennent leur importance dans le système en demeurant en constante interrelation avec les autres groupes de données.

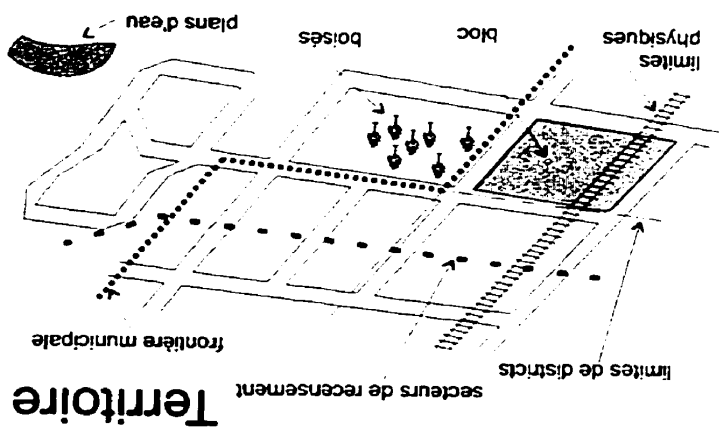


Figure 2.3: Le territoire

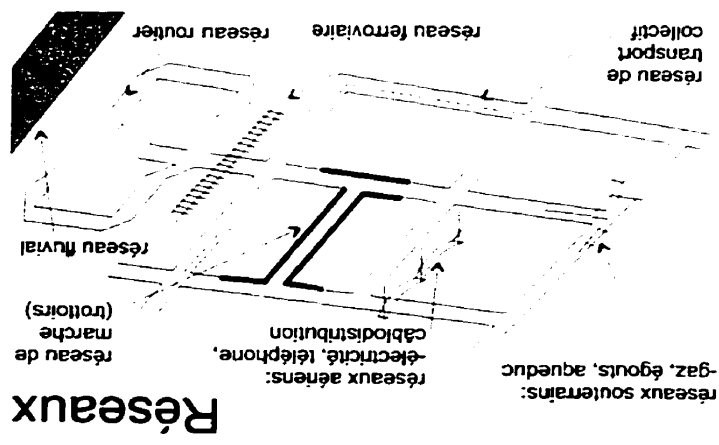


Figure 2.4: Les réseaux de transport

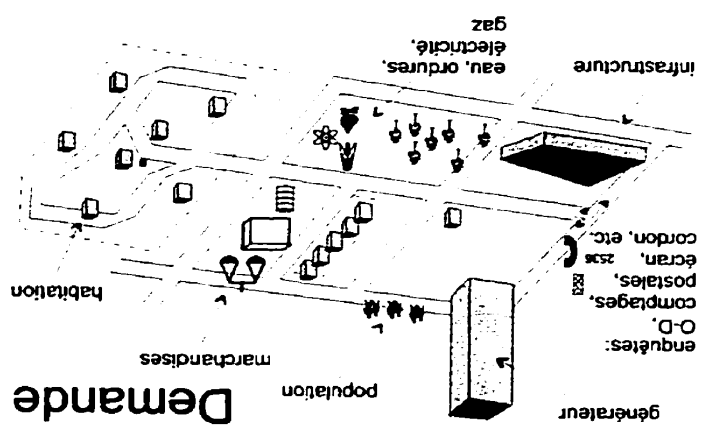


Figure 2.5: La demande

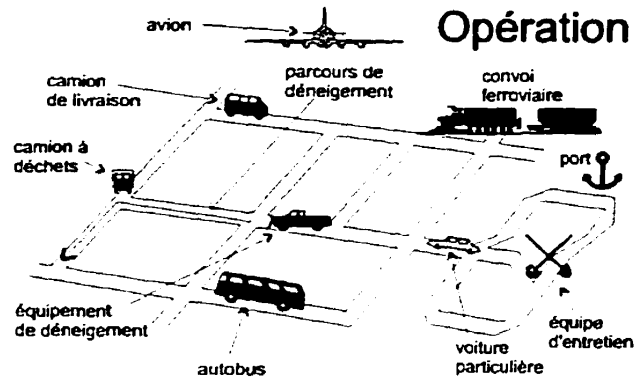


Figure 2.6: L'opération

2.1.4 Relations entre les éléments de la base de données

La Figure 2.7 présente les relations habituellement observées entre les éléments de la donnée. On remarque que le territoire, élément structurant de l'opération et du réseau, peut être également tributaire de ceux-ci, soit par son utilisation ou sa transformation. De même, la demande, virtuellement satisfaite par l'opération, tend à modifier cette dernière par les aspects de planification. Les cycles observés exemplifient la dynamique associée aux éléments de données.

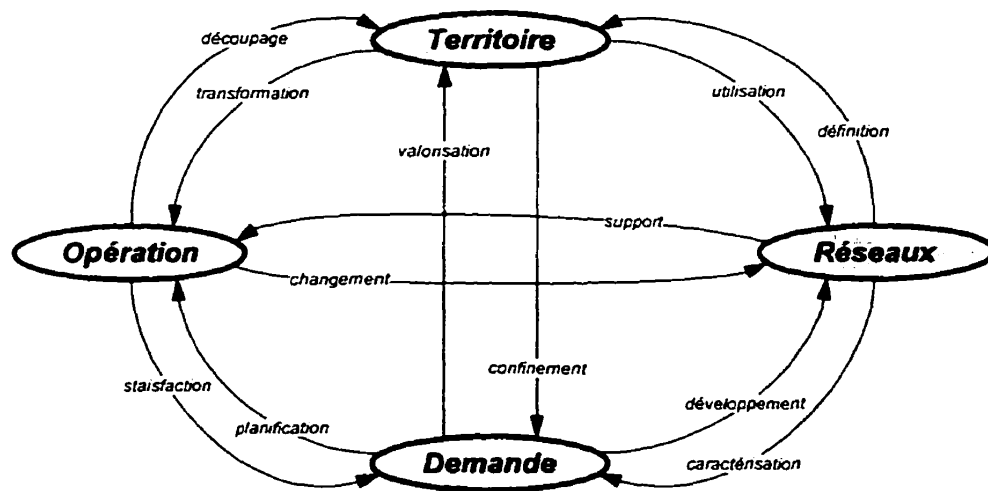


Figure 2.7: Relations entre les éléments de données

2.2 Les systèmes d'information géographique en transport

Les systèmes d'information géographique ont maintenant une présence généralisée dans le domaine des transports, notamment à cause de la légèreté des moyens (logiciels, matériel) qui sont maintenant nécessaires à leur mise en œuvre. La modélisation totalement désagrégée, par son examen individuel de l'information, bénéficie grandement de ces nouveaux instruments.

2.2.1 Définition

Les systèmes d'information géographique (*Geographic information system, ou GIS/SIG*) sont des outils utilisés dans les organisations municipales principalement à des fins de cartographie, d'inventaire et de gestion du mobilier urbain. Cependant, l'usage généralisé des SIG dans le domaine de la planification des transports est loin d'être atteint.

Le terme SIG-GIS couvre une gamme de produits dont l'envergure et la portée peuvent varier considérablement. Il désigne généralement un outil informatique graphique destiné à la gestion cohérente des données à caractère géographique. Les SIG permettent également de structurer la production et l'utilisation des cartes et données de terrain. Enfin, ils visent à l'amélioration des stratégies basées sur les données géographiques pour la prise de décision (HUXHOLD, 1991). Certains de ces instruments effectuent le traitement des informations reliées à l'utilisation du sol, ce qui en font des systèmes informationnels à part entière. Autour des GIS gravitent une série d'outils informatiques habituellement interreliés, tous voués à la représentation graphique des entités cartographiques.

Pour décrire la dualité des types d'outils, certains auteurs n'hésitent pas à distinguer séparément les Systèmes de Gestion des Bases de Données (SGBD) et les divers outils d'analyse spatiale: requêtes, statistiques, cartographie, etc. (SCHOLL et al, 1996).

Tableau 2.1: Sigles utilisés dans le domaine des SIG

Sigle	Description
AM/FM (Automated Mapping/Facilities Management)	Cartographie automatique et gestion des facilités
AMS (Automated Mapping System)	Système de cartographie automatique
CAD (Computer Aided Drawing)	Dessin assisté par ordinateur
CAIS (Cadastral Information System)	Système d'information sur le cadastre
CRT (Cathode Ray Tube)	Tube à rayons cathodiques
EDP (Electronic Data Processing)	Traitement électronique des données
ERIS (Environmental Information System)	Système d'information sur l'environnement
GIS (Geographic Information System)	Système d'information géographique
GPS (Global Positionning System)	Système de localisation par satellite
LIS (Land Information System)	Système d'information sur l'utilisation du sol
LRIS (Land and Ressource Information System)	Système d'information sur le sol et les ressources naturelles
SGBD	Système de gestion des bases de données
SIG-TOO	Système d'information géographique transport orienté-objet
SIURS	Système d'information urbain à références spatiales

2.2.2 Les quatre états de la donnée

Dans un système d'information géographique, les données se matérialisent en quatre formes distinctes:

- *La réalité.* Les données du SIG modélisent, de façon abstraite, des phénomènes réels (route, littoral, élévation, etc.).
- *La topologie.* Les phénomènes réels sont représentés dans le SIG par des éléments topologiques (points, lignes, surfaces) qui seront discutés dans la section 2.2.3.
- *Les modèles de bases de données.* Les éléments topologiques sont stockés dans des bases de données à références spatiales.

- **Le stockage physique des données.** Les logiciels de gestion des bases de données gèrent l'écriture des données sur les disques rigides ou tout autre médium de stockage.

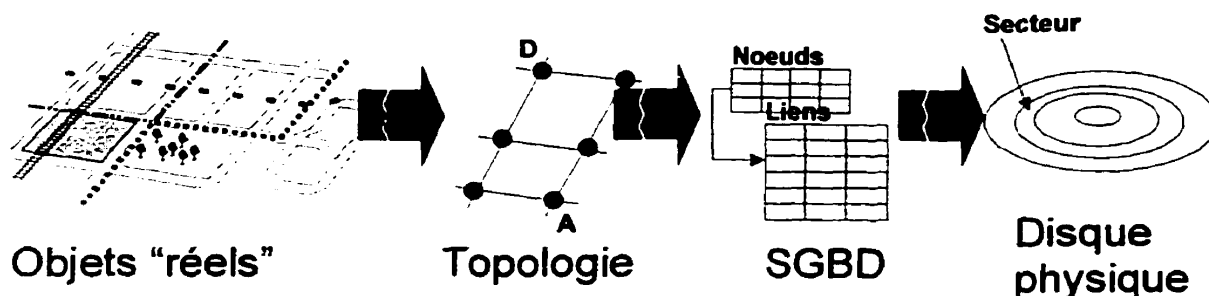


Figure 2.8: Les quatre états de la donnée dans un SIG

2.2.3 Topologie des SIG

Les données géographiques sont dotées de références spatiales permettant la localisation des objets dans un contexte bidimensionnel (où la Terre est un plan) ou tridimensionnel (où la Terre est une sphère).

Le point *y* est l'élément topologique le plus simple. Il est utilisé pour représenter des localisations soit, par exemple, des villes sur une carte à grande échelle ou des bornes-fontaines sur une carte conçue à l'échelle urbaine.

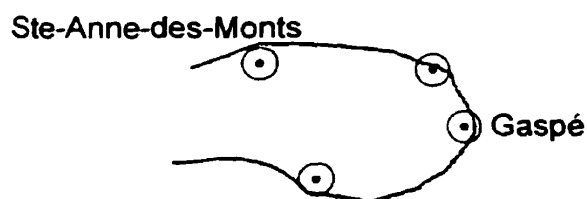


Figure 2.9: Exemple d'utilisation du point

La ligne est un élément topologique formé de deux ou de plusieurs points reliés par des segments. On distingue les ensembles de lignes *discontinues* (utilisées pour représenter des failles, par exemple), les lignes disposées en *arbres* (système

hydrographique de rivières) et les lignes disposées en *réseaux* connexes (réseau routier, ferroviaire).

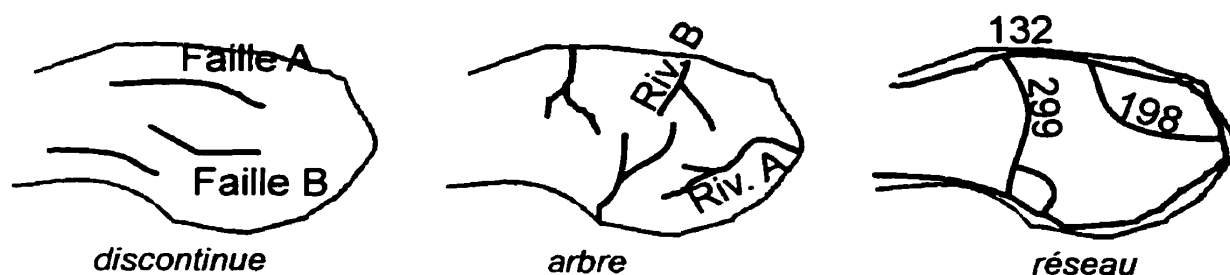


Figure 2.10: Exemples d'utilisation de la ligne

Le polygone est une surface fermée formée par une ou des lignes connexes. Les polygones peuvent être *isolés* (représentation de grandes villes ou de lacs), *adjacents* (états, pays) ou *imbriqués* (isochrones, isobares, isothermes).

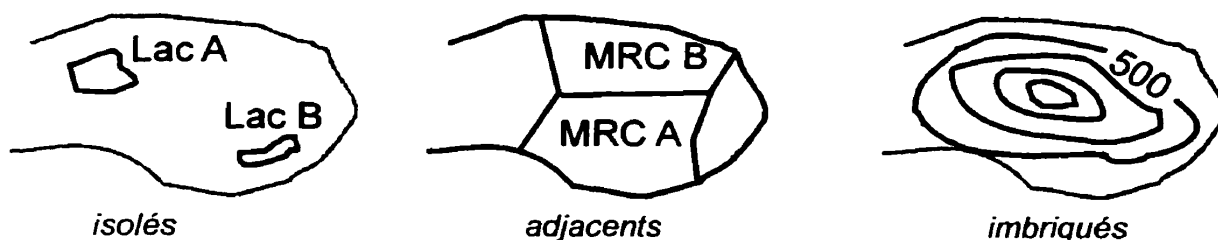


Figure 2.11: Exemples d'utilisation du polygone

Une quatrième forme de représentation implique l'utilisation d'un ou plusieurs éléments topologiques sous des fonctions multiples. Par exemple, une rivière (ligne) peut tenir lieu de frontière pour un polygone. Une combinaison de ces éléments topologiques permet de représenter à peu près tout phénomène physique bidimensionnel. Depuis quelques années, des objets topologiques tridimensionnels ont fait leur apparition, mais ils sont peu utilisés en transport sauf dans les représentations graphiques AutoCAD de l'approche totalement désagrégée (ALLARD et al, 1991).

2.2.4 Fonctions d'un SIG

La nomenclature topologique des SIG est simple, mais efficace dans le contexte graphique. Des analyses structurées y sont possibles. Cependant, l'intégration de tels outils dans un environnement informationnel de transport urbain ne peut se faire sans l'identification et la création d'adéquations entre les éléments topologiques contenant de l'information et les bases de connaissances externes existantes. Les liens entre les informations géographiques disponibles et les fichiers de données externes représentent souvent les plus grands défis pour les gestionnaires de SIG-transport (SIG-T). Plusieurs groupes de méthodes sont applicables aux objets géographiques d'un SIG (LAURIN et THOMSON, 1991):

- *La cartographie automatique (Automated Mapping)*. Créer des cartes numérisées à partir de photos aériennes ou provenant de satellites. Il s'agit d'un domaine qui s'applique peu au transport où une topologie vectorielle connexe est requise.
- *La cartographie thématique (Thematic Mapping)*. Monter des représentations de statistiques à l'aide de couleurs, des graphes superposés, de symboles ou d'étiquettes (voir Figure 2.12).
- *La fabrication de cartes (Map Modelling)*. Utiliser le SIG pour fabriquer de toutes pièces des cartes touristiques, topométriques, routières ou autres.
- *Les statistiques spatiales (Spatial Statistics)*. Mesurer des distances, agréger des données par secteur, calculer des moyennes par couloir, etc.
- *Les analyses spatiales (Spatial Analysis)*. Se servir des caractéristiques spatiales dans l'analyse: corrélations spatiales, analyses de proximité, gravité, etc.

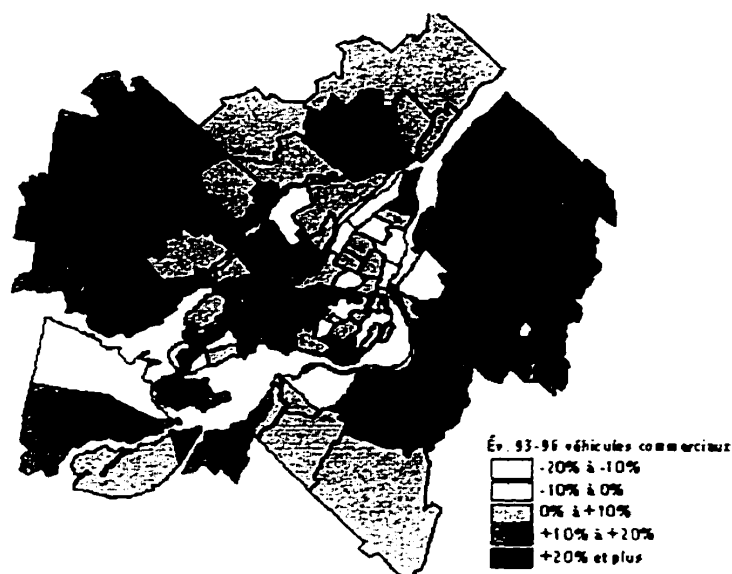


Figure 2.12: Exemple de cartographie thématique à l'aide d'un SIG

- *La visualisation spatiale (Spatial Browsing).* Afficher des éléments à références spatiales précis: routes, lignes TC, parcours, itinéraires, etc.
- *L'application de logiques spatiales (Spatial Reasoning).* La désagrégation artificielle, le regroupement par thème, le calcul d'itinéraires, etc.

Les systèmes informationnels en transport qui supportent l'approche totalement désagrégée existent par la présence d'instruments mis à la disposition du planificateur. Le prochain chapitre décrit les instruments servant à la cueillette et au traitement des données dans le contexte du transport urbain.

CHAPITRE 3: LES INSTRUMENTS DE PLANIFICATION DES TRANSPORTS

La planification des transports implique l'utilisation d'instruments destinés à la cueillette, au traitement et à la mise en forme des données employées pour l'analyse. L'approche totalement désagrégée tire profit de ces outils dans le cadre d'une utilisation interactive visant non seulement à examiner les données, mais également à l'enrichir et à y fondre les modèles sous-jacents (informodèles). Ce chapitre présente d'abord les instruments de cueillette des données, puis décrit des logiciels utilisés dans le cadre des approches agrégées et totalement désagrégées.

3.1 Les processus de cueillette de données

Les outils de cueillette des données sont les premiers instruments à considérer par le planificateur. Ils représentent une composante importante de la pensée centrée sur les données ("data-centered thinking") trop souvent délaissée au détriment de la modélisation (VOELLER, 1996). Cette sous-section décrit quelques moyens utilisés pour la cueillette des données en transport.

3.1.1 Les inventaires (registres)

Les inventaires regroupent les catalogues, listes, fiches et cartes décrivant les conditions existantes d'un système de transport (ROBERTSON, 1994). Bien qu'ils soient reconnus comme coûteux à numériser et difficiles à maintenir à jour, les inventaires demeurent des sources importantes de données sur l'offre de transport. Dans les systèmes d'information géographiques, l'inventaire fait l'objet des représentations et des requêtes d'information. Parmi les principaux usages des inventaires, il y a la gestion des infrastructures routières et des feux de circulation, la localisation du mobilier urbain (trottoirs, abribus, etc.), la réglementation, les études de

coûts ou tout autre analyse nécessitant une connaissance détaillée du système de transport.

3.1.2 Les enquêtes ménages origine-destination

Les enquêtes ménages origine-destination sont des instruments permettant d'obtenir, pour une période déterminée et une population donnée, des informations sur les déplacements effectués par les résidants (NELSON, 1994). Un questionnaire est administré à un répondant qui décrit les déplacements effectués par tous les membres de son ménage dans une journée, habituellement la veille ou une date rapprochée. Au Canada, quelques sociétés de transport tel que la Société de transport de la Communauté urbaine de Montréal (STCUM) tiennent régulièrement (aux cinq ans) de grandes enquêtes ménages origine-destination par téléphone (plus de 50 000 entrevues). Les variables des enquêtes touchent le ménage, la personne et le déplacement (Tableau 3.1) (BONNEL et al, 1993).

Tableau 3.1: Variables d'enquêtes ménage origine-destination de la STCUM

Item	Variables
Personne	âge, sexe, possession automobile, statut (dérivé)
Ménage	taille, nombre de véhicules, localisation du domicile
Déplacement	Heure de départ, origine, destination, motif, mode, points de jonction, stationnement

La tenue d'une enquête ménage origine-destination débute par le choix du territoire et de l'échantillon. Dans le cas de l'enquête STCUM de 1993, le territoire atteint 3500 kilomètres carrés et regroupe 3,2 millions de personnes. Plus de 56 000 ménages ont été interrogés, pour un taux d'échantillonnage de 4,6% (GIRARD et al, 1994). En Amérique du Nord, le téléphone est généralement utilisé comme médium d'entrevue; ce qui est beaucoup moins coûteux que l'entrevue directe à domicile mais ne permet que de courts questionnaires. L'envoi postal est également un moyen d'enquête, bien que le taux de réponse y soit habituellement plus faible que le téléphone.

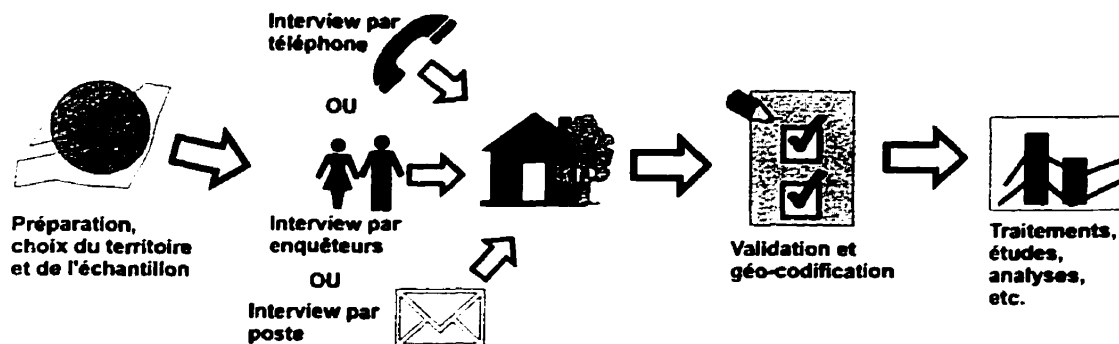


Figure 3.1: Les enquêtes ménage

À la tenue des entrevues s'ajoutent les étapes de la validation de l'information et de la géocodification des lieux de déplacements. Il est reconnu qu'un système d'information géographique cohérent couplé à un logiciel d'entrée directe des réponses lors de l'interview permettent de diminuer de façon appréciable les efforts liés à ces étapes (NG et SARGEANT, 1993).

Des avancements considérables ont été apportés aux méthodes de planification suite à la tenue de grandes enquêtes ménages origine-destination au Canada, notamment avec le développement de l'approche totalement désagrégée (CHAPLEAU, 1995). Cependant, des limitations demeurent face à ce type d'enquête: les données ne touchent que les résidents et sont quelquefois sous-représentatives des véritables habitudes de déplacements de la population (HASSOUNAH et al, 1993).

On peut maintenant s'attendre au développement d'outils d'enquête intégrés basés sur un système d'information cohérent. Ces logiciels sont capables de codifier et valider l'information durant l'entrevue, ce qui limite les opérations de post-traitement et permet de bonifier le contenu des bases de données sous-jacentes par l'intégration des réponses déclarées.

3.1.3 Les enquêtes *in situ* origine-destination

En contrepartie des grandes enquêtes régionales, d'autres études de déplacements origine-destination sont effectuées directement sur les lieux à analyser, tel que les

routes, les lignes de transport collectif ou les générateurs de déplacements. En transport collectif, on procède par la distribution, à bord des véhicules, de cartes questionnaires touchant généralement le déplacement en cours, ce qui permet d'analyser une ligne ou un tronçon en particulier. Ce genre d'enquête a été effectué récemment dans la grande région de Montréal et a connu un taux de réponse élevé (de l'ordre de 90%).

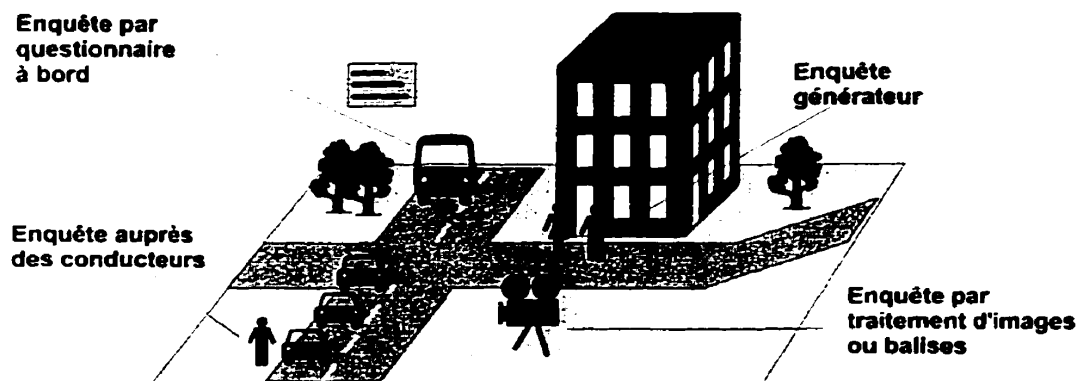


Figure 3.2: Les enquêtes *in situ* origine-destination

Sur le plan routier, des entrevues peuvent être administrées directement sur le bord d'une route ou à la sortie d'un terrain de stationnement. Le même principe s'applique aux générateurs, où les entrevues peuvent avoir lieu à l'entrée de l'édifice (NELSON, 1994). Enfin, de nouvelles technologies tel que la détection et la reconnaissance de véhicules ou de leur immatriculation à divers points de collecte constituent des moyens externes de recueillir des informations sur la mobilité des automobilistes (DUBUISSON et al, 1993). De même, l'utilisation de la carte à puce en transport collectif pourrait mener à un "suivi" partiel de chaque usager.

3.1.4 Préférences énoncées ou révélées?

Les données recueillies lors des deux types d'enquêtes décrits peuvent appartenir à deux groupes d'information distincts: les préférences énoncées ou révélées (DALY, 1997). Les préférences révélées (*revealed preferences, RP*) sont les informations transmises par l'usager au sujet de ce qu'il a vraiment fait comme déplacement, ce qui

reflète ses habitudes au moment de l'enquête. Beaucoup de travaux de recherche sont présentement fondés sur les préférences énoncées (*stated preferences*, *SP* et *stated response*, *SR*). Dans ce genre d'enquête, l'utilisateur doit énoncer ses préférences face à une situation de transport (construction d'un nouveau pont, modifications au réseau de transport collectif, etc.). Plusieurs réserves sont émises face aux SP/SR. En effet, le comportement de l'utilisateur reflétera-t-il ce qu'il a déclaré? Afin de minimiser les biais liés aux deux genres d'enquête, certains chercheurs préfèrent utiliser les RP et les SP simultanément, quelquefois en entremêlant les questions d'interview.

3.1.5 Les comptages (ou comptes)

Les comptages sont des actions permettant de déterminer le nombre d'entités de transport (véhicules, camions, personnes ou autres) qui passent en un point et une direction donnés durant une période donnée (ROBERTSON, 1994). Selon la disposition de ces comptages ponctuels, on peut enregistrer les déplacements traversant une ligne imaginaire donnée avec un compte-écran ou isoler un secteur prédéfini à l'aide d'un compte-cordon (voir Figure 3.3). Le compte à bord, en transport collectif, se caractérise par des comptages où l'observateur se déplace avec le véhicule afin de compter le nombre d'embarquants et de descendants. (Bien que les mots "comptage" et "compte" soient souvent confondus, l'usage associe le mot "comptage" à l'action de compter et le mot "compte" au résultat obtenu).

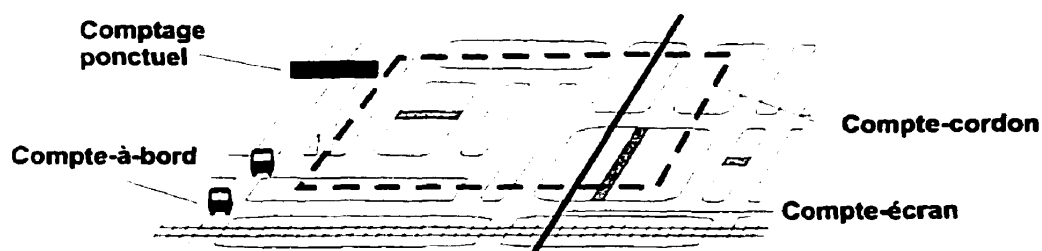


Figure 3.3: Les comptages et les comptes

Les opérations de comptage de véhicules se font généralement à l'aide de boucles électromagnétiques fixes ou mobiles ou autres systèmes de détection automatique

(caméras, détecteurs par bruit, infrarouges). Par leur nature exhaustive, les comptages complètent avantageusement les enquêtes *in situ* lors de la pondération.

3.1.6 Les données externes

Enfin, les données externes viennent compléter l'éventail d'instruments de cueillette informationnelle disponibles au planificateur. Celles-ci sont souvent faciles d'accès, étoffées et peu coûteuses, ce qui en font de bonnes sources d'information.

La tenue du recensement quinquennal de Statistiques Canada engendre d'importantes bases informationnelles sur la socio-démographie canadienne. Afin de regrouper les centaines de variables sondées, quatre univers y sont distingués (STATISTIQUES Canada, 1987): l'univers de la population (démographie, ethnie, culture, langue, scolarité, activité, revenu), l'univers des familles (de recensement et économiques), l'univers des ménages (informations liées aux ménages et aux caractéristiques de leurs composants) et l'univers des logements (chauffage, type et année de construction). Les données de recensements sont des références fiables et régulières (aux 5 ans) permettant d'amplifier les possibilités des autres outils de planification disponibles (CHAPLEAU, 1992). De même, les "recensements" de véhicules et conducteurs par l'information contenue dans les fichiers d'immatriculation (NELSON, 1994) sont des sources intéressantes pour le planificateur. L'information y est spatialisée (par le code postal) et déjà classifiée, dans une certaine mesure, par l'organisme responsable. Enfin, il ne faut pas dénier l'importance de sources commerciales telles que les fichiers de numéros de téléphone, les listes d'abonnés à différents services (gaz, électricité) ou les fichiers provenant d'organisations municipales (évaluation foncière).

3.2 Les logiciels de modélisation agrégée

Afin de mieux cerner le propre de l'approche agrégée en transport urbain, il convient ici de décrire quelques logiciels utilisant cette méthode. Le choix s'est porté sur quatre instruments de taille inégale, ce qui permet de montrer l'évolution des outils

disponibles. Notons que contrairement aux instruments de l'approche désagrégée, qui accompagnent la modélisation, les logiciels de modélisation agrégée visent à mettre en forme des modèles déjà existants.

3.2.1 UTPS

Au début des années 1970, aux États-Unis, les planificateurs ont pris conscience de l'ampleur du problème du transport urbain. Ce dernier devait maintenant être traité localement, plutôt que par le gouvernement fédéral. Pour ce faire, de nouveaux outils de planification ont dû être créés (DIAL, 1975): le *Urban Transportation Planning System (UTPS)*. D'abord publiée en tant que méthode manuscrite, UTPS est une librairie de logiciels pouvant combiner une base de données, un système de gestion des données, des graphiques (cartes, réseaux) et des algorithmes d'évaluation de systèmes, de prévision de la demande, etc. (voir Figure 3.4). Il semble cependant que certaines difficultés informatiques de l'époque (sur IBM 360/370) aient eu raison des possibilités graphiques du système.

3.2.2 QRS II

Le logiciel QRS II (*Quick Response System*), apporté par A.J. HOROWITZ, permet l'application fidèle de la procédure séquentielle classique (PSC) telle que définie dans les années 70 par UTPS. QRS II effectue ainsi la génération des déplacements, leur distribution, la répartition modale et l'affectation des flots sur les réseaux (HOROWITZ, 1993). Pour ce faire, il tire profit d'un éditeur de réseaux, le logiciel GNE (*General Network Editor*), muni de facilités interactives graphiques. L'utilisation de GNE avant et après l'exécution de QRS II offre la possibilité d'afficher des résultats numériques (étiquettes) ou graphiques (couleurs, profils de charge). La Figure 3.5 présente l'environnement GNE-QRS.

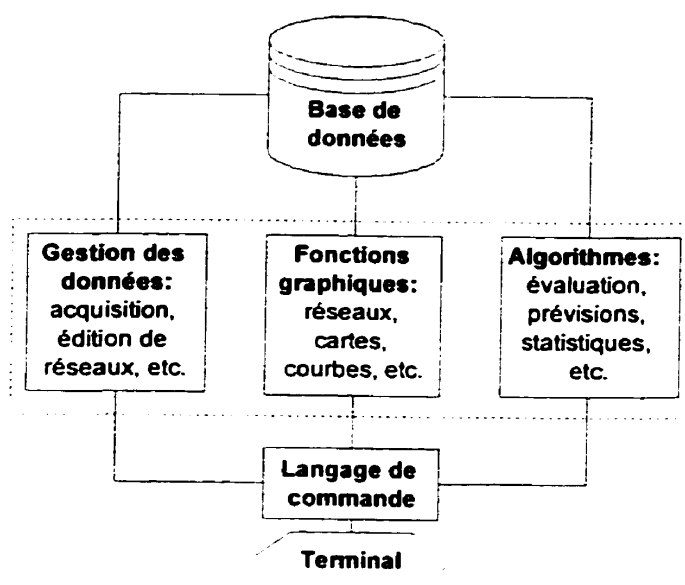


Figure 3.4: Composantes fonctionnelles d'UTPS

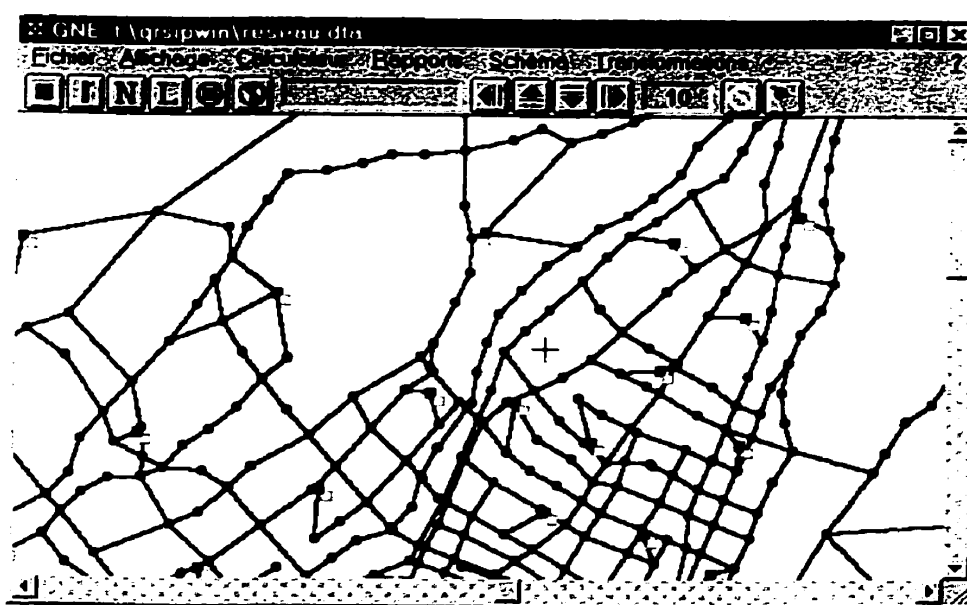


Figure 3.5: Le logiciel GNE

3.2.3 TRANSCAD

Le logiciel TRANSCAD est un système d'information géographique sur micro-ordinateur couplé à une série de modules de traitement de données agrégées permettant de répliquer les étapes de la procédure séquentielle classique (CALIPER). L'interface interactive graphique y permet la cartographie du terrain en couches de points, lignes et surfaces que l'utilisateur peut modifier et afficher à sa guise. Un générateur de réseaux utilise l'information graphique numérisée pour fabriquer des réseaux monocouche (routes, voies ferrées, lignes TC) servant à quelques procédures préétablies telles que le calcul de chemins, la détermination de routes de commis-voyageur ou la distribution des marchandises.

3.2.4 EMME/2

Le logiciel EMME/2 (Équilibre multimodal equilibrium) fait suite à l'utilisation de UTPS et de EMME/1, où la nécessité d'une interface interactive graphique se faisait pressante (BABIN et al, 1984). EMME/2 nécessite la spécification de trois éléments:

- des réseaux modaux, codés avec l'interface graphique;
- des matrices origine-destination des zones d'analyse;
- une banque de fonctions utilisées pour les méthodes d'affectation.

Le logiciel est programmé sous forme modulaire, chaque module étant compatible aux autres. Les résultats y sont offerts sous forme de représentations graphiques, des rapports et des tableaux.

3.3 Les instruments de modélisation totalement désagrégée

De nombreuses applications ont découlé du développement tangible de l'approche totalement désagrégée en transport urbain. En fait, un outil (logiciel, module ou autre) est né à chaque nouvelle insertion pratique, résultat de l'amalgame des méthodes et

des données. Les instruments sont à l'approche totalement désagrégée ce que les modèles sont à l'approche agrégée.

3.3.1 Planification des transports urbains

Le tout premier outil à saveur totalement désagrégée est le logiciel *MADITUC*. Ce modèle d'analyse désagrégée des itinéraires de transport urbain collectif est un descendant de TRANSCOM, un logiciel de simulation de réseaux de transport collectif développé à la STCUM dans les années 70. D'abord conçu pour fins de planification à moyen terme des réseaux de transport collectif (CHAPLEAU et al, 1986), MADITUC est devenu un véritable groupe de processeurs destinés à plusieurs fonctions touchant l'exploitation des données des grandes enquêtes origine-destination (CHAPLEAU, 1992):

- les processeurs territoriaux s'assurent de l'intégrité spatiale des données d'enquêtes origine-destination en géocodant adéquatement chaque référence spatiale selon les besoins exprimés;
- les processeurs de réseau de transport collectif y permettent la codification d'un réseau de transport collectif, avec calcul d'un large éventail de statistiques (module RÉSEAU) opérationnelles (charge, véhicules-heures, véhicules-kilomètres, ratios, etc.);
- les processeurs de simulation des déplacements offrent la possibilité de modéliser l'accès au réseau (module ACCÈS), de calculer des chemins (module CHEMIN) et de charger les itinéraires sur les liens du réseau (module CHARGEMENT) tout en considérant l'information disponible, qu'elle soit complète ou partielle;
- les processeurs d'analyse des composantes du système tirent profit des résultats des autres processeurs pour combiner des données sur le territoire, les réseaux et les déplacements afin de procéder à des examens des entités nœuds, lignes, liens, secteurs, personnes et ménages;

- d'autres processeurs gèrent l'infographie interactive (module MADCADD), la prévision de la demande, la répartition modale et d'autres fonctionnalités pouvant découler de l'exploitation des données d'enquête (CHAPLEAU, 1995).

MADCADD (ALLARD, CHAPLEAU, 1991). L'utilisation du logiciel de dessin AutoCAD comme interface interactive graphique des logiciels du système MADITUC a donné naissance à l'environnement MADCADD (voir Figure 3.6). Celui-ci offre toutes les fonctionnalités d'AutoCAD, auxquelles s'ajoutent des facilités d'import et d'export de données selon divers formats, ainsi que des possibilités d'impression, des applications et une série d'utilitaires graphiques. La puissance du logiciel AutoCAD ainsi que son environnement tridimensionnel constituent un atout pour la représentation graphique de données à caractère désagrégué, souvent nombreuses et complexes.

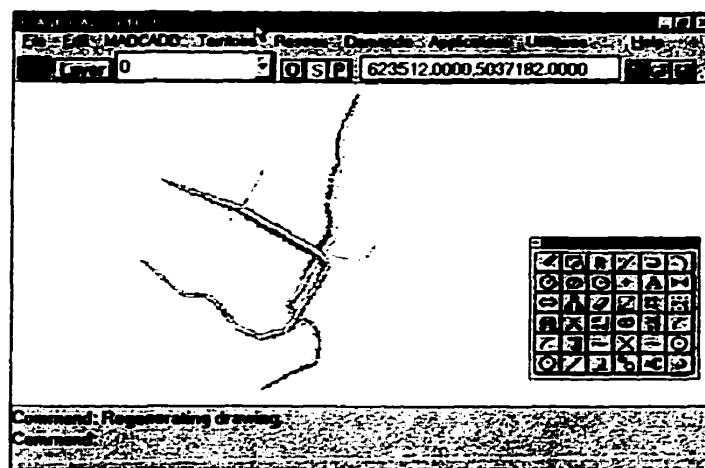


Figure 3.6: Environnement MADCADD sous AutoCAD Windows

MADIGAS. Comme suite au développement des modules de traitement de MADITUC, il s'avérait complémentaire d'en concevoir un encadrement logiciel. Pour ce faire, l'utilisation des meilleurs outils micro-informatiques disponibles à l'époque (AutoCAD, FORTRAN, FoxBase et Excel) a permis de monter un système interactif graphique d'analyse: **MADITUC Interactive Graphic Analysis System**. MADIGAS est un véritable système informationnel avec considération des cinq composantes énoncées précédemment: logiciels, personnel, matériel, procédures et données.

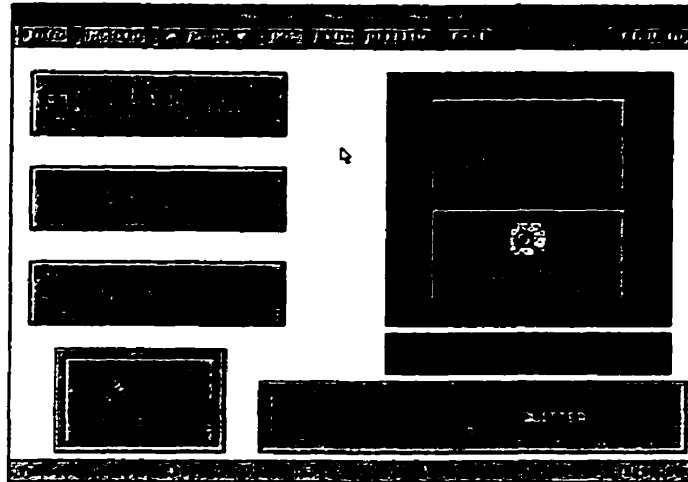


Figure 3.7: Écran principal de MADIGAS (version DOS)

MAXOD (CHAPLEAU et BERGERON, 1991). Ce logiciel effectue le montage d'une matrice origine-destination à partir de comptes sur une ligne de transport collectif. L'approche tire profit de l'information disponible provenant des comptes ponctuels, des comptes à bord ou des enquêtes origine-destination.

3.3.2 Opération des systèmes de transport

MIGAOT. Le module interactif graphique d'allocation optimale en transport est un logiciel combinant un gestionnaire de bases de données et un environnement graphique (en l'occurrence MADCADD). Il est destiné à la représentation "simplifiée" d'un problème d'allocation optimale de ressources: emplacement des sources et puits, détermination de distances.

MADGAP. L'allocation des véhicules aux garages à la Toronto Transit Commission nécessitait le raffinement de l'outil MIGAOT, qui a été bonifié de quelques processeurs pour engendrer MADGAP (MADITUC garage allocation problem), destiné à la minimisation du kilométrage mort entre les dépôts et les points d'injection de véhicules.

SIGGAR (ALLARD et al, 1992). Ce logiciel est un système interactif et graphique de gestion et d'analyse des arrêts. Il combine des applications développées sous FoxPro

à une interface **MADCADD** pour permettre l'inventaire de tous les arrêts du réseau de la STCUM et leurs attributs: rue, position, type, desserte, lignes, présence d'abribus, etc. La STCUM comptait, en 1991, plus de 10500 arrêts (sur 140 lignes de jour et 27 nocturnes), outre les 65 stations de métros et les 29 gares. Le système **SIGGAR** a servi de point de départ aux grands logiciels informationnels de la STCUM tel que **MADOPER**, **MADPREP** et **MADSUPER**.

MADOPER. Les données provenant des différents systèmes informationnels utilisées à la STCUM tel que **MADITUC**, **SIGGAR**, **HASTUS** (assignation des chauffeurs, par **GIRO**) et **TELBUS** sont regroupées à l'aide de ce programme **FoxPro** de traitement extrêmement versatile. Celui-ci contient notamment un analogue **TELBUS** produit à partir des fichiers provenant du système **HASTUS**. **TELBUS** est un système d'information à l'arrêt implanté à la STCUM. L'utilisateur compose le numéro de téléphone de son arrêt et reçoit de **TELBUS** des informations sur les horaires de la ligne correspondante.

3.3.3 Information aux usagers

MADPREP (CHAPLEAU et al, 1996). Ce logiciel est un module d'acquisition de données pour la préparation de la réponse émise par le préposé au centre de renseignements de la STCUM. Il couple les outils les plus puissants sur support micro-informatique (**FoxPro**, **FORTRAN**, **Visual Basic**) en vue de calculer, en quelques secondes, un itinéraire de transport collectif sur l'île de Montréal. **MADPREP** contient également une foule d'informations sur le territoire et l'opération de la Société (tracés, horaires, annuaire, cartes, etc.).

MADSUPER. Le module d'acquisition de données et système unifié pour l'édition des réseaux est un logiciel combinant **AutoCAD** et **FoxPro** en vue de faire la gestion interactive graphique des fichiers des bases de données nécessaires au fonctionnement du logiciel **MADPREP**.

MADEOD (LAVIGUEUR et CHAPLEAU, 1990). Le modèle d'analyse désagrégée des enquêtes origine-destination est un instrument destiné à la consultation des données provenant des grandes enquêtes ménage. Les compilations décrivent les caractéristiques socio-démographiques (âge, sexe, statut, ménage) et les attributs de mobilité (motifs, modes, périodes) de divers secteurs de découpages. D'abord conçu sur le médium HyperCard (sur Macintosh), MADEOD a mu vers le tableur Excel et les pages d'un site INTERNET.

Municipalité	Type	Dir	Type	Dir	Xcoord	Ycoord	Date	Nb	v1	Nb	v2
MTL	DECARIE	BV	SAVANE DE LA	RU	3463654	1896507	94/11/10	10949			
MTL	DECARIE	BV	SAVANE DE LA	RU	3468774	1902587	94/11/10	11002			
MTL	DECARIE	BV	SHERBROOKE	RU	3871887	1636274	94/11/10	17101			
MTL	DECARIE	BV	SNOWDON	RU	3729538	1722723	94/11/10	14890			
MTL	DECARIE	BV	SNOWDON	AV	3732911	1726549	94/11/10	14945			
VMP	DECARIE	BV	SOREL DE	RU	3452692	1917468	94/11/10	10832			
SLR	DECARIE	BV	TASSE	RU	3242507	2107554	94/11/10	9202			
MTL	DECARIE	BV	UPPER LACHINE	CH	3896883	1620978	94/11/10	17494			
MTL	DECARIE	BV	VAN HORNE	AV	3607758	1797302	94/11/10	12924			

Figure 3.8: Écran principal du logiciel MADPREP

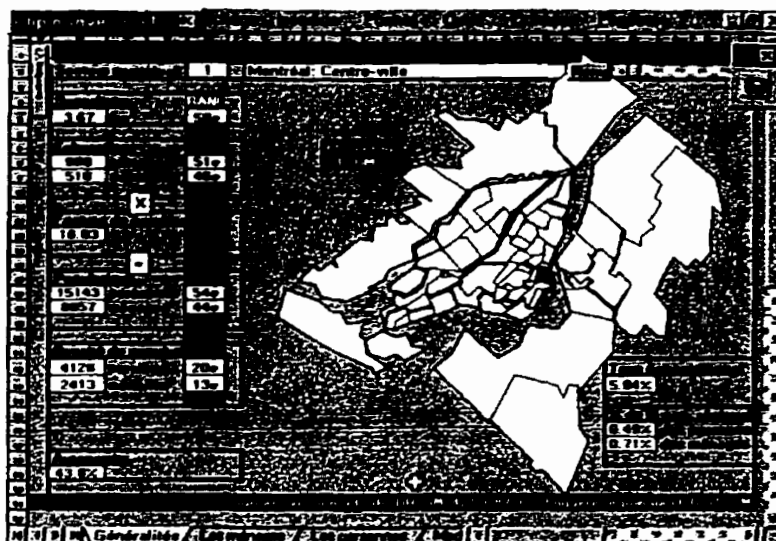


Figure 3.9: Écran type de MADEOD sous Excel

MADGEN (TRÉPANIÉ et al, 1996). L'homologue de MADEOD est destiné à la caractérisation de la mobilité des générateurs de déplacements de la région montréalaise. Ce logiciel combine le tableur Excel, l'éditeur graphique GNE ainsi qu'un encadrement Visual Basic. Des versions INTERNET (complète et allégée, en français et en anglais) sont également disponibles.

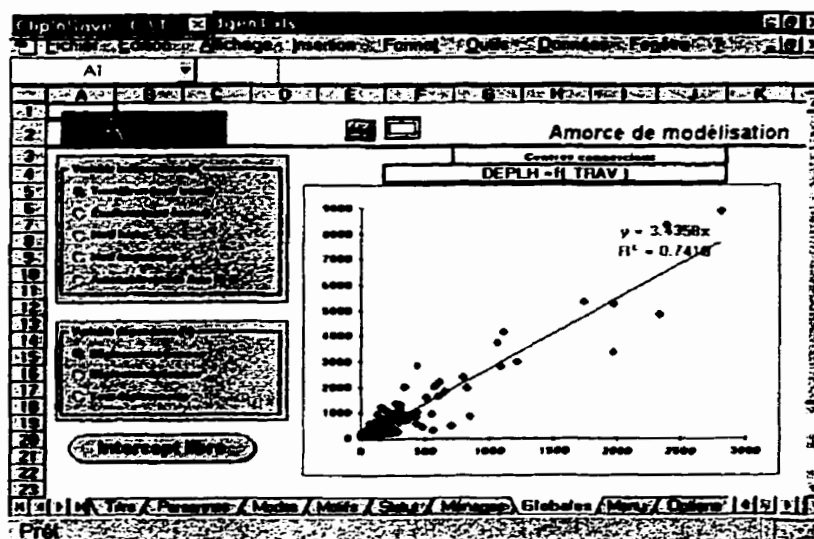


Figure 3.10: Écran type de MADGEN sous Excel

3.3.4 Transport des marchandises

MADGAT (CHAPLEAU et al, 1994). Le module d'acquisition de données et de gestion, analyse et traitement est un logiciel FoxPro destiné au rassemblement et à la mise en forme de toute donnée pertinente au transport des marchandises dans la grande région de Montréal. Le logiciel est couplé d'une coquille pédagogique offrant des explications sur les principaux thèmes, permettant de faciliter l'insertion technologique du système MADGAT/MAD(strat)².

*MAD(strat)*². Le modèle d'analyse désagrégée stratifiée et stratégique est un logiciel muni d'une interface interactive graphique sous AutoCAD. Il est destiné à la représentation des phénomènes relatifs au transport des marchandises: tournées de véhicules, inventaires d'entreprises, secteurs industriels.

MADCAM. Ce petit outil monté sur Excel permet la consultation de données relatives au camionnage dans la grande région de Montréal. Les compilations ont été effectuées à partir d'un fichier d'immatriculation de la Société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ).

3.3.5 Travaux publics

MADECHET (CHAPLEAU, 1995). L'allocation optimale des contrats de cueillette des ordures peut représenter un problème réel pour une ville de grande taille qui désire que le total de l'ensemble des soumissions retenues soit minimum. Le logiciel MADECHET, présenté sous forme d'amalgame entre Excel et FORTRAN, est destiné à cette fin.

MADNEIGE (CHAPLEAU et al, 1995). La gestion des parcours de déneigement à la ville de Laval a amené les membres du groupe MADITUC à se pencher sur le problème. Un logiciel de type MADSUPER a été développé pour la représentation graphique de chacun des 700 parcours, tandis qu'un logiciel FoxPro, MADNEIGE, est destiné à la gestion des opérations de travaux publics dans l'ensemble.

3.4 Les instruments génériques

Depuis les récents développements de la micro-informatique, plusieurs traitements effectués par les planificateurs de transport peuvent être reconduits à l'aide de logiciels dits "génériques". Ceux-ci remplacent avantageusement les logiciels dits "d'application", trop souvent rigides et désadaptés face aux changements apportés aux méthodes et aux données de planification. On peut catégoriser les logiciels génériques utilisés en transport:

- les logiciels de traitement de texte tels que Word, WordPerfect ou AmiPro servent à la mise en page de la documentation et à la production des rapports;
- les tableurs tels que Excel, Lotus et Quattro Pro sont utiles pour la mise en forme des données, l'application de traitements numériques, la production de graphiques et le développement de petites applications de consultation des données;
- les logiciels de présentation (Multimedia Toolbook, NeoBook, PowerPoint, Freelance) permettent le montage et la dissémination de documents multimédias décrivant non seulement les résultats d'une étude mais également les méthodes et procédures utilisées (CHAPLEAU, TRÉPANIER, 1995);
- les logiciels de dessin tels que CorelDRAW et AutoCAD contribuent à la visualisation des problèmes de transport, le premier sous une forme légère et le second sous une forme complexe et complète avec prise en charge des objets de transport sous forme graphique;
- les logiciels de système d'information géographique tels que GISPlus, ArcInfo et Maptitude (voir Figure 3.11) sont à la limite de l'application générique en offrant, en plus de leur interface habituelle, un langage de programmation;
- les logiciels de gestion de bases de données, tels que FoxPro, Paradox ou Access suffisent généralement à la plupart des usages et traitements des données en transport;

- enfin, les langages de programmation tels que FORTRAN, Visual Basic ou Visual C++ peuvent être utilisés en dernier ressort pour la fabrication de logiciels d'applications.

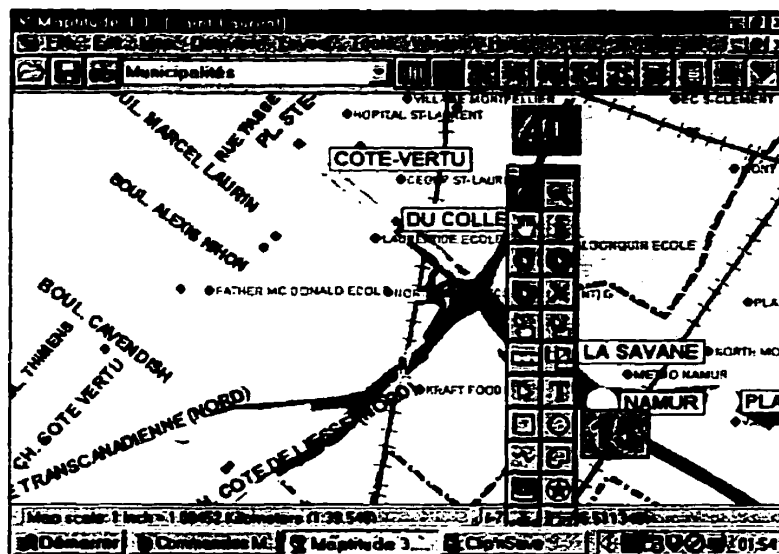


Figure 3.11: Environnement Maptitude

Pour ce qui est des éditeurs graphiques et des systèmes d'information géographiques NIELSEN (1997) a présenté un graphe illustrant les différences au sujet des capacités d'édition géométriques versus les possibilités de modélisation appliquée au transport. Le schéma indique que les "CAD" (logiciels de dessins) sont excellents pour effectuer de l'édition géométrique mais ne possèdent pas de structure topologique. Les SIG possèdent des capacités d'édition et de gestion topologique, tandis que les graphes topologiques modélisés sont difficilement éditables.

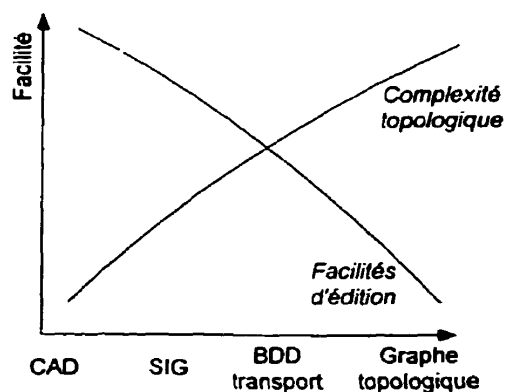


Figure 3.12: Facilités de quelques outils d'analyse spatiale

Somme toute, en plus des systèmes informationnels, l'approche totalement désagrégée en transport s'appuie sur des instruments tirant profit des données disponibles. Ces systèmes et instruments pourraient également bénéficier de l'utilisation de l'approche orientée-objet. Le prochain chapitre présente cette approche de façon générale, sans traiter spécifiquement du domaine des transports.

CHAPITRE 4: L'APPROCHE ORIENTÉE-OBJET

L'approche orientée-objet utilise une structure basée sur des éléments appelés "objets" pour définir un problème, le mettre en forme et offrir une méthode de résolution (MASINI, 1990). Ces dernières années, l'utilisation de cette approche s'est surtout manifestée dans la programmation informatique, avec l'apparition de langages tels que SmallTalk, ObjectVision ou Visual C++. Leur conception a certes été influencée par l'Algol, le LISP ou le FORTRAN, qui les ont précédés de quelques décennies. Ce chapitre présente les divers concepts de modélisation orientée-objet en vue d'une application au domaine des transports (chapitre suivant). Certaines questions liées à la programmation ne seront pas étoffées ici puisqu'elles n'interviennent pas dans l'argumentaire de cette thèse. Toutefois, des exemples de code informatique et des figures viendront appuyer certains concepts au besoin.

4.1 Modélisation et programmation

Il existe deux courants distincts en ce qui concerne l'utilisation de l'objet comme élément de résolution d'un problème: ceux qui mettent l'accent sur le formalisme (modélisation) et ceux qui mettent l'accent sur le langage informatique (programmation).

4.1.1 La modélisation orientée-objet

La modélisation orientée-objet est une suite méthodologique de résolution de problèmes prônant l'utilisation de concepts dits "objets" dotés de relations entre eux. Cette modélisation porte son intérêt sur les composantes tangibles d'un système donné, et non sur ses fonctions (RUMBAUGH, 1995). Cette préoccupation aurait pour avantage de ne pas compromettre le système en cas de changement de vocation ou de langage. Les puristes des techniques de modélisations orientées-objets tel que l'OMT (*Object Modeling Technique*) rejettent toute modélisation fondée sur les

langages de programmation, jugés restrictifs et rigides. Ils usent de formalisme et de rigueur, accompagnant souvent leur méthodologie d'une notation spécifique.

4.1.2 La programmation orientée-objet

La programmation orientée-objet (*object oriented programming*) est une transposition directe de la modélisation orientée-objet (prise en général) au milieu logiciel et micro-informatique. Fondamentalement, il s'agit d'une technique de programmation basée sur la réutilisation des objets programmés dans le cadre de différentes applications. Les protagonistes de la programmation orientée-objet apprécient la réutilisation des objets. Ils croient en la structuration des idées à partir du langage informatique. De plus, par sa conception fondamentale en objet, l'application de l'approche aux méthodes scientifiques est naturelle (ROSS et al, 1992). Certains langages de programmation utilisent plus "purement" les principes de l'approche orientée-objet que d'autres. D'emblée, on dira que le Visual Basic est moins "orienté-objet" que le Visual C++ à cause du niveau d'usage des concepts associés aux objets et des simplifications méthodologiques qui y sont faites.

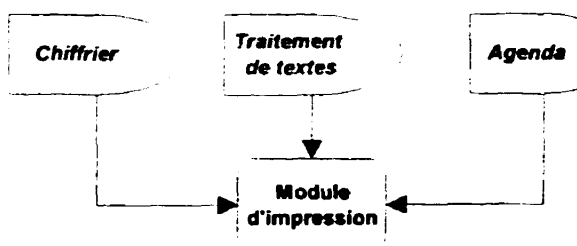


Figure 4.1: Exemple de réutilisation d'un objet programmé

4.2 Sémantique

Au cours des années, une série de termes se sont greffés à l'approche orientée-objet: objets, classes, méthodes, propriétés, agrégation, encapsulation, héritage, association, etc. Ces concepts permettant de décrire les portées de la programmation et de la modélisation orientée-objet sont commentés dans les paragraphes suivants.

4.2.1 L'objet

Un *objet* (*object*) est un élément conceptuel permettant de décrire efficacement un phénomène réel. Une table, une route, une automobile et un bâtiment sont des objets. Un déplacement ou un réseau seront également des objets, le cas où ces définitions aident à clarifier le problème. Chaque objet possède un état, une identité et un comportement (BOOCH, 1991). L'objet n'est donc pas seulement un amas d'information: il contient également ses propres caractéristiques (propriétés) et ses propres fonctions (méthodes). Le concept prend deux formes: les objets dits "externes", soit les représentations physiques de la réalité, et les objets "internes", éléments informatiques de la programmation (MEYER, 1990). Dans la programmation classique, on définissait le terme "entité" pour jouer ce dernier rôle. Si on les traduit dans l'approche orientée-objet, les entités sont des objets dont l'existence est fondée sur leurs relations. Certains auteurs associent les entités à des variables de programmation spécifiques à une classe d'objet (variable locale). Le passage de l'objet physique à l'objet informatique est appelé la *réification*.

4.2.2 La classe

La *classe* (*class*) est un moule permettant de créer un ou plusieurs objets possédant les mêmes propriétés et les mêmes méthodes (COAD et YOURDON, 1991). Cependant, les valeurs de propriété et les procédures associées aux méthodes peuvent différer d'un objet à l'autre au sein de la classe. Chaque objet unique créé à partir d'une classe est appelé *instance*. Il existe quelques qualificatifs de classes. À la Figure 4.2, on distingue la *méta classe*, c'est-à-dire une classe regroupant plusieurs sous-classes. Habituellement, ces métaclasses sont dites *abstraites* car elles ne possèdent pas de propriété. Par opposition, les classes dérivées, ou sous-classes, sont dites *concrètes*.

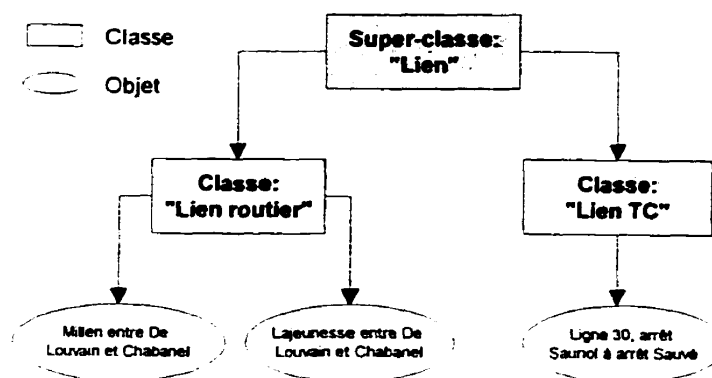


Figure 4.2: Classes et objets

4.2.3 Les propriétés

Les *propriétés* (*properties*) sont des variables destinées à caractériser une classe d'objet, et, par le fait même, chaque objet issu de cette classe. Le terme "attribut" (*attribute*) est également employé. Si les propriétés sont fixes pour une classe donnée, leur valeur, pour leur part, peut varier d'un objet à l'autre. Le nom, la position dans l'espace (coordonnées) et la longueur sont des exemples de propriétés. L'ensemble des valeurs que peut prendre une propriété en définit le *domaine*. Les propriétés constituent les composantes *statiques* d'une classe.

4.2.4 Les méthodes

Les différentes opérations pouvant être effectuées par ou sur une classe d'objet sont appelées *méthodes* (*methods*), *opérations*, *actions* ou *services*. Tout comme les propriétés, la méthode appliquée peut différer d'un objet à l'autre. Les méthodes résultent de la réception de *messages* par l'objet, envoyés par un autre objet ou autre sous-système. Cependant, certains messages engendrent un type de méthode particulier: l'événement (*event*). La notion d'événement est employée dans certains langages à objets quand un objet graphique réagit, par exemple, à un clic du bouton de la souris. Les méthodes constituent les composantes *dynamiques* d'une classe.

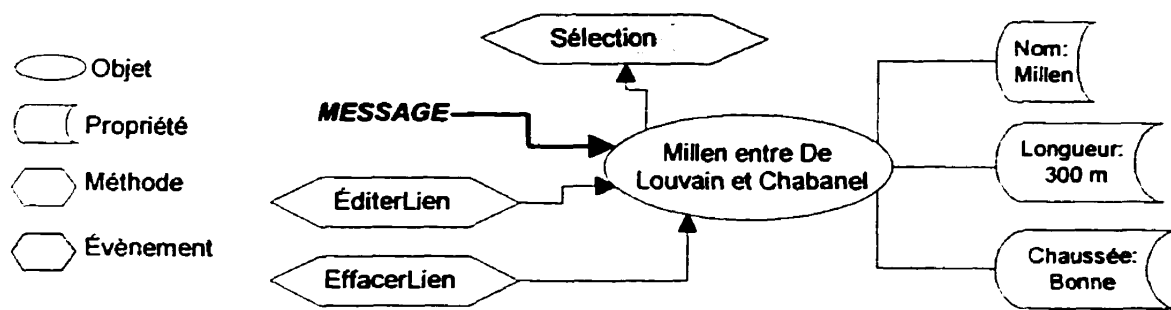


Figure 4.3: Objet, propriété, méthode et événement

La Figure 4.3 exemplifie les notions énoncées précédemment. L'objet- LienRoutier "Millen" possède les propriétés "Nom", "Longueur" et "Chaussée". Il peut être affecté par les méthodes "ÉditerLien" et "EffacerLien" et peut produire l'événement "Sélection" en cas, par exemple, d'appel par un clic. L'application d'une méthode résulte d'un message, qu'il provienne de l'utilisateur ou d'un autre objet de l'application modèle.

4.2.5 L'abstraction et l'encapsulation

Le passage de l'objet "réel" à la programmation informatique nécessite les deux concepts fondamentaux suivants (Figure 4.4):

- L'*abstraction* est l'opération de spécification des caractéristiques de chaque objet en vue de créer des classes. Elle comprend également les éléments de mise en marche du programme et l'implémentation des concepts (BAUGH et REHAK, 1992). Dans une certaine mesure, le projet de recherche dont fait l'objet le présent document est une abstraction de quelques systèmes de transport.
- L'*encapsulation* constitue la barrière informatique de protection d'un objet. Cette notion illustre le processus voulant que le code de programmation associé à l'objet ne soit pas "visible" de l'extérieur; les autres objets de l'application ne pouvant communiquer avec l'objet encapsulé qu'à l'aide des portes d'entrées: méthodes, propriétés, événements (MONTGOMERY, 1994).

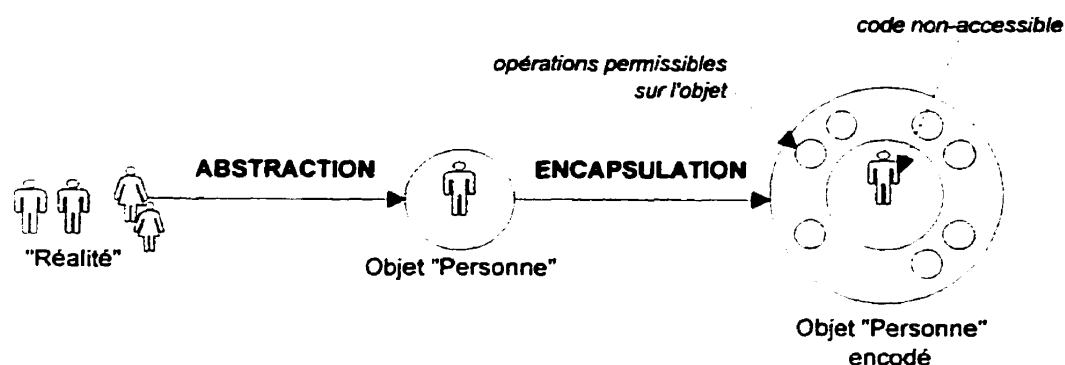


Figure 4.4: Abstraction et encapsulation

4.3 Les relations entre les objets

La modélisation orientée-objet se définit essentiellement comme une suite d'opérations et relations effectuées entre différentes classes d'objets. Bien que le terme "suite" soit utilisé, dans certains langages de programmation, plusieurs opérations sont effectuées simultanément. Dans certains contextes, ces relations sont appelées "transactions" car elles impliquent l'échange d'information entre les objets en vertu d'un modèle transactionnel. Les sections suivantes décrivent les principaux types de relations.

4.3.1 Héritage

L'héritage (*inheritance*) implique la transmission de propriétés et de méthodes d'une classe d'objets à ses sous-classes. Cette caractéristique est fondamentale; elle permet en fait de réutiliser les objets à de multiples sauces. En informatique, ce phénomène se traduit par la réutilisation des codes programmés, ce qui permet, par exemple, de programmer dans l'environnement Windows sans avoir à réinventer la roue. Notons que l'héritage peut être multiple: plusieurs classes transmettent alors leurs propriétés et méthodes à la sous-classe, qui représente un *raffinement* (WIRFS-BROCK, 1990).

4.3.2 Agrégation et généralisation

Tout objet peut être décomposé en sous-objets de classes différentes. Par exemple, un objet de la classe "Automobile" se divise en objets des classes "Moteur", "Pare-brise", "Carburateur", etc. Ces sous-objets, bien que partie intégrante de la classe supérieure, n'en retirent pas les propriétés: on parle alors de *désagrégation*, et la classe supérieure est qualifiée d'*agrégat*.

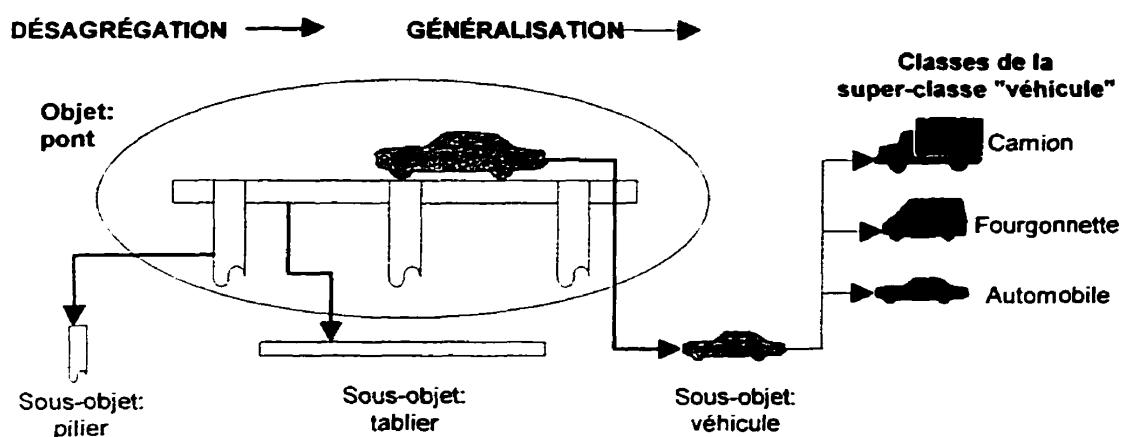


Figure 4.5: Distinction entre agrégation et généralisation

En contrepartie, certaines classes d'objets sont à l'origine de la création de sous-classes semblables possédant les propriétés de la classe supérieure. Il s'agit de la *généralisation* (ou *généricité*), dont la manifestation principale est l'héritage (*inheritance*) (MARTIN, 1993). Par exemple, à la Figure 4.5, l'objet "Pont" est un agrégat des objets "Pilier", "Tablier" et "Véhicule"; toutefois, l'objet "Véhicule" généralise les sous-objets "Camion", "Fourgonnette" et "Automobile". L'inverse de la généralisation est la *spécialisation*.

4.3.3 Association et collaboration

En plus des relations exprimées précédemment, on peut distinguer deux interactions supplémentaires entre les objets:

- L'*association* est un lien unissant deux objets de même classe. Par exemple, une association unit les objets "Lien" d'une "Rue".
- La *collaboration* touche les objets de classes différentes, donc de natures dissemblables. Les messages OLE (*Object Linking and Embedding*) ou les relations entre une "rue" et une "frontière municipale" sont des exemples de collaborations.

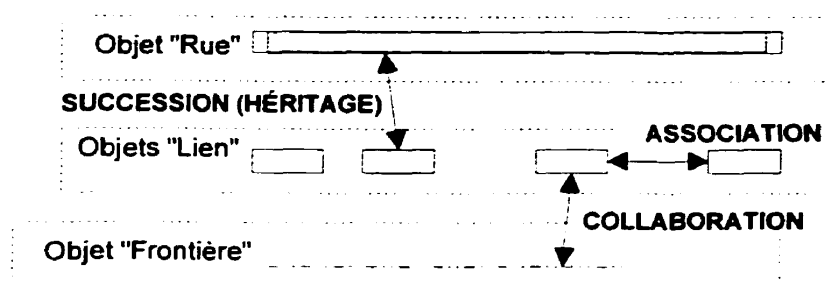


Figure 4.6: Distinction entre succession, association et collaboration

4.3.4 Contraintes

La modélisation orientée-objet compte un certain nombre de règles et de contraintes souvent liées à la nature même du langage de programmation ou de l'environnement supportant les objets (MONTGOMERY, 1994). En plus des relations mentionnées précédemment, on peut noter l'intégrité référentielle, qui permet de gérer efficacement la création et la suppression d'objets dans les systèmes de gestion de bases de données. Il y a aussi l'application des domaines, tant pour les propriétés que pour les méthodes. On compte enfin sur l'unicité des objets créés: un identifiant unique est utilisé pour départager chaque élément d'une application.

4.4 Quelques approches orientées-objet

Il existe une dizaine d'approches orientées-objet établies, avec leurs propres définitions, notations et implémentations. La présente section se veut une revue succincte de ces approches, avec l'énoncé de quelques caractéristiques s'y rattachant

(THE OBJECT AGENCY). L'accent est posé sur les aspects de chaque approche qui diffèrent des définitions énoncées précédemment, ainsi que sur les caractéristiques les plus saillantes.

4.4.1 Berard

L'analyse orientée-objet de Berard (1993) insiste sur la distinction entre l'objet et l'information qui s'y rattache. Selon lui, la classe est un objet comme les autres, utilisé pour créer des instances. Son concept de classe est récursif (l'objet classe est un objet créé par une classe). Son approche est implémentée en 5 langages informatiques et ne compte pas de notation formelle.

4.4.2 Booch

Pour Booch (1991), un objet est une chose sur laquelle on peut agir. Il s'appuie sur l'unicité, l'action et l'état de l'objet. Sa notation s'appuie sur les diagrammes de classes. La méthode de Booch est très populaire, son design orienté-objet étant relativement simple.

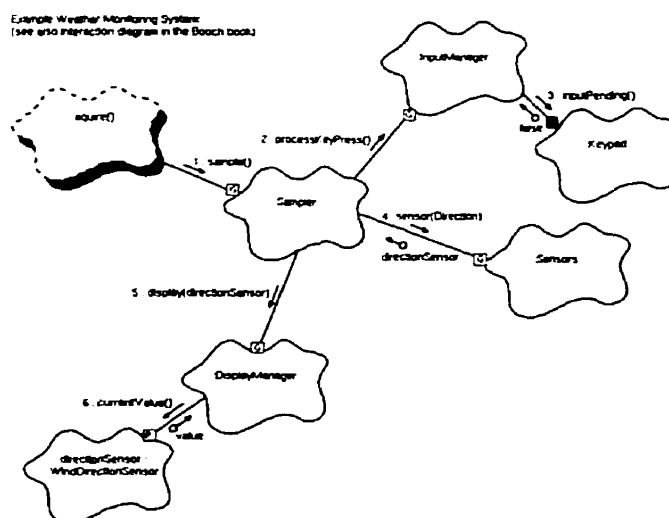


Figure 4.7: Exemple d'utilisation de la notation de Booch (par SCHNEIDER)

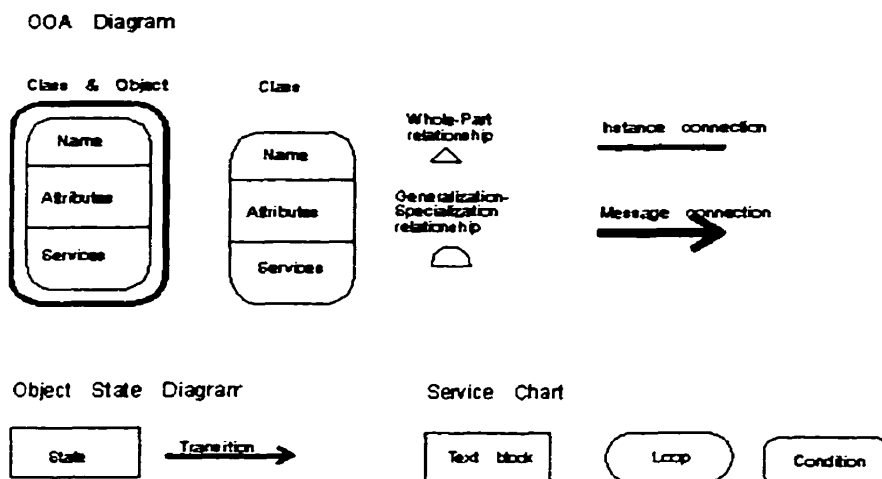


Figure 4.8: Éléments de la notation de Coad

4.4.3 Coad et Yourdon

Ces auteurs définissent l'objet comme une abstraction d'un phénomène relié à un problème (COAD et YOURDON, 1991). L'objet y possède des attributs et des services, toujours définis selon une modélisation axée sur les applications. La notation Coad est grandement utilisée, et l'approche est accompagnée d'un logiciel ("Playground") permettant de structurer les objets et les relations entre eux. Coad et Yourdon identifient une panoplie de relations possibles entre les objets: agrégation, spécialisation, part entière, etc.

4.4.4 Colbert

Colbert (1989) définit l'objet comme un abacule de modules structurels et comportementaux comprenant des propriétés. Il distingue les deux comportements de l'objet, soient l'ensemble des opérations effectuées sur les autres objets (comportement externe) ou sur ses propres composantes (comportement interne). Il traite également des objets "système", qui représentent des ensembles d'objets et les relations qui les lient.

4.4.5 Embley, Kurtz et Woodfield

Selon ces auteurs, l'objet est une personne, une place ou un lieu pouvant être physique ou conceptuel (EMBLEY et al., 1992). La classe est un ensemble d'objets qui "s'appartiennent". Les actions des objets peuvent causer des événements, créer ou détruire des objets et des relations, observer ces objets et relations ou envoyer et recevoir des messages.

4.4.6 Martin et Odell

Ces auteurs présentent une approche fondamentale sans implémentation informatique exemplifiée. L'objet y est une abstraction à laquelle on peut appliquer un concept (MARTIN et ODELL, 1992). Les opérations sont des unités de procédure pouvant changer l'état d'un objet (*transactions*) ou seulement l'interroger (*fonctions*).

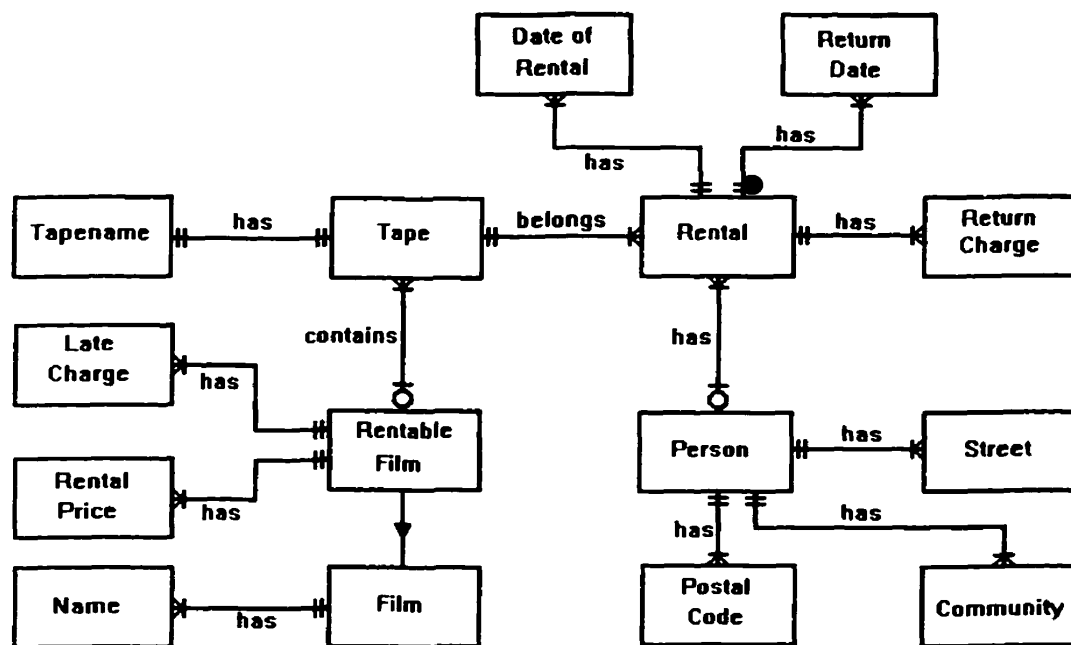


Figure 4.9: Modélisation d'un club vidéo en notation Martin et Odell (STRIJBOS et al.)

4.4.7 Rumbaugh

Rumbaugh (1995) axe son analyse orientée-objet sur la modélisation plutôt que la programmation (*Object Modeling Techniques, OMT*). Son approche est basée sur trois sous-modèles: le modèle *objet*, montrant les classes et les relations entre celles-ci, le modèle *dynamique*, indiquant les variations temporelles ainsi que le modèle *fonctionnel*, illustrant les traitements et les flots de données.

4.4.8 Shlaer et Mellor

Pour ces auteurs, les objets sont des ensembles d'éléments qui possèdent les mêmes caractéristiques et qui sont assujettis aux mêmes règles (SHLAER et MELLOR, 1992). Ils mettent de côté le concept de classe. Les opérations sont des gestionnaires d'événements, chaque événement pouvant créer un nouvel objet et des opérations associées.

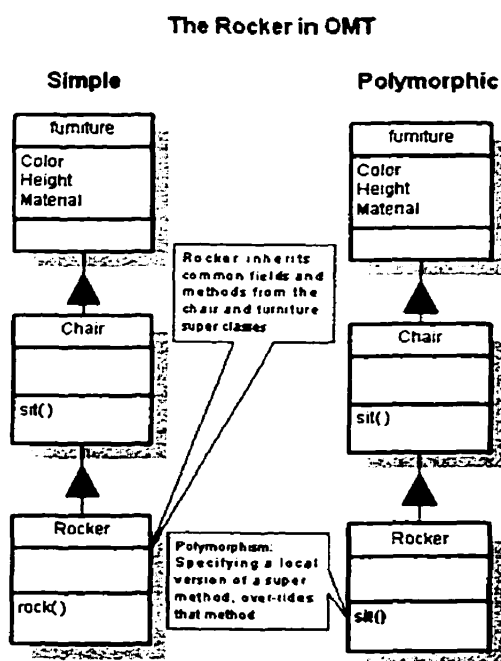


Figure 4.10: Extrait d'un diagramme utilisant la notation OMT et la méthode Rumbaugh (HINSHAW et ARNAUD)

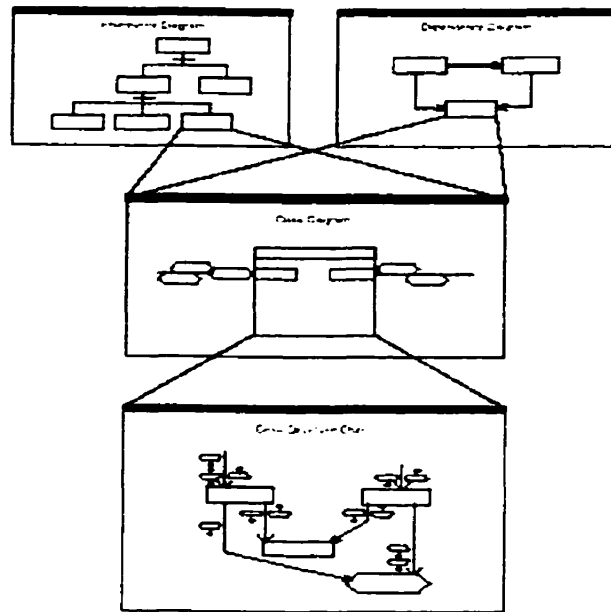


Figure 4.11: Exemple de notations de la méthode Shlaer et Mellor (SHLAER et MELLOR, 1996)

4.4.9 Wirfs-Brock

Dans cette approche, les objets sont en possession de données sur eux-mêmes et "savent" comment effectuer certaines opérations (WIRFS-BROCK, 1990). Le concept de classe est lié au comportement commun de certains ensembles d'objets. Les méthodes sont des opérations effectuées par un objet lorsqu'il reçoit un message.

4.5 Critique de l'approche orientée-objet

Sur la sellette depuis quelques années, la modélisation orientée-objet s'expose à la critique, souvent liée à la performance des applications informatiques qui se servent de ses principes. Les sections 4.5.1 et 4.5.2 font état des avantages et inconvénients de la *programmation* orientée-objet.

4.5.1 Avantages

Les principaux avantages de l'approche résident dans sa réplique de la réalité, sa facilité de programmation et la possibilité qu'elle offre de transformer des systèmes complexes en techniques simplifiées (MARTIN, 1993). Certains auteurs qualifient la modélisation par objets de "souple" et "prometteuse", tant dans le domaine de l'intelligence artificielle que dans celui du génie logiciel (MASINI, 1991).

Tableau 4.1: Avantages de l'approche orientée-objet

-
- développement plus rapide de logiciels
 - qualité supérieure des applications (finition, rendu)
 - entretien aisé des systèmes
 - coûts réduits (à la création)
 - mise à l'échelle rapide des logiciels
 - meilleure structure informationnelle
 - meilleure adaptabilité
-

4.5.2 Inconvénients

Les inconvénients de la modélisation orientée-objet touchent l'exécution des logiciels, la nécessité d'outils de programmation puissants et les coûts de conversion des applications existantes (MONTGOMERY, 1994).

Tableau 4.2: Inconvénients de l'approche orientée-objet

-
- demande une technologie plus mature
 - nécessite des normes d'application strictes
 - nécessite des outils de programmation efficace
 - vitesse d'exécution plus lente
 - nécessite un personnel qualifié
 - coûts de conversion des logiciels existants
-

Certains de ces désavantages tendent à disparaître avec l'avènement de micro-ordinateurs de plus en plus performants et accessibles. L'engouement est tel pour ce genre d'approche qu'à l'heure actuelle, on peut difficilement créer un logiciel sans considérer un tant soit peu la présence d'objets (surtout dans les systèmes d'opération avec interfaces graphiques).

Le prochain chapitre reprend les concepts de l'orienté-objet dans le cadre de la planification des transports urbains. Ainsi, les classes, objets, propriétés, méthodes et relations y sont définies dans un contexte d'application de transport au sein de l'approche totalement désagrégée.

CHAPITRE 5: L'APPROCHE ORIENTÉE-OBJET EN TRANSPORT

L'utilisation d'une approche orientée-objet en transport constitue une suite logique à l'évolution des méthodes et techniques d'analyse et de modélisation utilisées par les planificateurs de transport. Le passage à l'ère des "informodèles" (modèles axés sur l'information) et des systèmes d'information ne peut qu'accélérer cette migration, qui du fait est déjà commencée par l'utilisation de langages informatiques orientés-objet dans le design et la structuration des logiciels de planification. Ce chapitre définit en des termes appliqués une approche de planification et de modélisation basée sur les objets de transport et l'approche totalement désagrégée. La première section présente quelques utilisations de l'approche orientée-objet dans le domaine des transports. Les sections subséquentes définissent et caractérisent les objets, propriétés, méthodes et relations de transport.

5.1 Quelques approches existantes

La littérature, et notamment l'INTERNET, font état de quelques développements relatifs à l'utilisation d'approche de type "orienté-objet" dans l'attaque de certains problèmes de transport. Il appert que la plupart de ces approches se restreignent le plus souvent à des règles de programmation et de simulation sans pour autant miser sur l'existence et la disponibilité des données nécessaires à leur implantation. Cette séparation entre les modèles et les données les éloigne de toute ressemblance avec la modélisation totalement désagrégée préconisée dans cette thèse.

5.1.1 PoeT

Le projet "PoeT" (Public Transport Object-Oriented Engineering) de l'Université de Leeds (FOSTER et al., 1994) constitue l'une des premières incursions dans l'application de méthodes orientées-objets dans l'appréhension de problèmes de transport public, en l'occurrence la planification des horaires des tournées de véhicules.

PoeT
E.Foster/A.J.Burnard
8/10/93

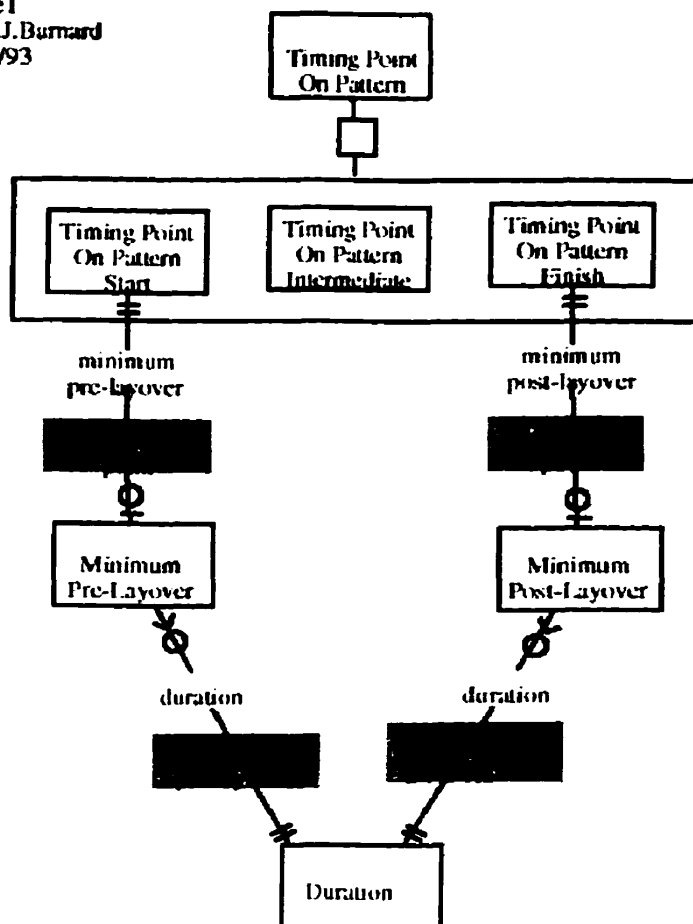


Figure 5.1: Exemple de modèle-objets dans PoeT

Les chercheurs y ont utilisés quatre outils distincts: "Ptech" pour le design du modèle-objets, "Ontos" pour la gestion des classes d'objets, "Studio" pour l'interface graphique et "C++" pour la programmation. Bien que le projet n'ait pas atteint le stade du développement, il a démontré, aux dires de ses auteurs, qu'il est plus aisé de modéliser un réseau de transport à l'aide d'objets qu'avec un système de bases de données relationnelles classiques.

Les auteurs y ont décrit plusieurs modèles-objets (voir Figure 5.1), faisant état des classes, attributs et opérations associés à chaque objet. Leurs efforts se portent également sur la programmation en C++ des classes conçues dans le logiciel Ptech.

5.1.2 STROBOSCOPE

STROBOSCOPE est un outil utilisé au département de génie civil de l'Université du Michigan (MARTINEZ, 1996). Il s'agit d'un système de simulation basé sur l'état et les ressources des objets mis en présence, structurés de façon à être soumis à un simulateur à utilisation générale (General Purpose Simulator). Ce genre de simulateur existe depuis longtemps. Cependant, l'innovation tient ici au fait que la modélisation peut se faire à l'aide du logiciel Visio, couplé d'une interface en Visual C++.

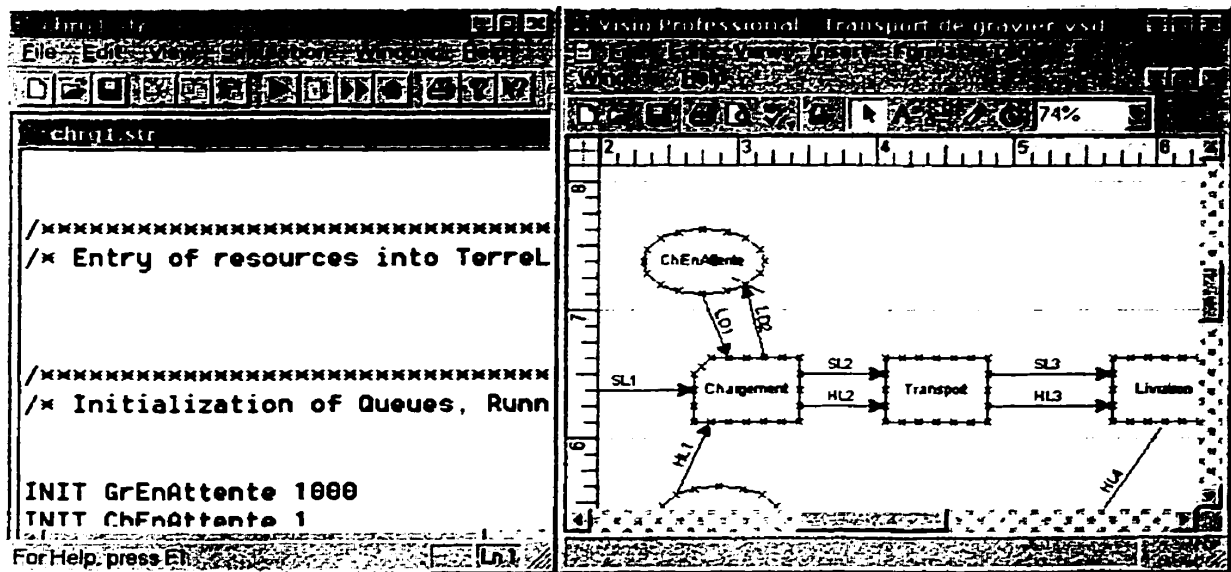


Figure 5.2: Utilisation du modèle STROBOSCOPE

L'utilisateur monte d'abord son modèle-objets dans le logiciel Visio, en créant des formes (les objets) et des connecteurs entre elles (les relations). L'entrée et la validation de l'information concernant les quelques objets élémentaires se font directement dans Visio, puis un code est généré et introduit dans le simulateur. L'interface C++ permet d'interagir avec ce dernier, en plus de fournir une interprétation textuelle et graphique des résultats.

5.1.3 Système d'information objet à la RATP

RIZZI et GUICHOUX (1997) font état, dans un rapport très étoffé, d'un système information objet pour l'exploitation des réseaux de surface à mettre en place à la

Régie autonome des transports parisiens (RATP). L'étude a été réalisée dans la foulée du projet SPARTACUS, un outil de simulation pour la formation à la régulation. SPARTACUS a été, selon les auteurs, la première application informatique orientée-objet de la RATP.

Le document comporte trois parties principales:

- La première section traite du contexte opérationnel des réseaux de surface à la RATP. Parmi les sujets, on compte l'organisation du réseau d'autobus, les méthodes d'exploitation des véhicules et des autres équipements. Les grandes lignes de l'approche orientée-objet y sont ensuite esquissées dans un cadre général, avec un fort accent sur les aspects de programmation informatique.
- La seconde partie du rapport présente le modèle conceptuel orienté-objet envisagé pour l'exploitation du service, en prenant soin de décrire les objets en présence, leurs attributs attendus et les méthodes et événements qui y seront relatifs.
- La dernière partie parle de la mise en œuvre de l'approche selon une optique orientée-objet. Les étapes de définition des méthodes de développement, de stockage des données persistantes, de création d'interfaces homme-machine et de gestion des changements apportés y sont abordées.

5.1.4 Système d'information géographique orienté-objet

Rafanelli (1998) propose le modèle URBAN, qui utilise une description topologique du système de transport urbain dans une approche orientée-objet. Fidèle à l'approche de modélisation agrégée, le modèle définit les éléments de topologie (centroïdes, liens, nœuds, réseau) et la sémantique qui y est associée.

L'emploi de techniques orientées-objet vise deux objectifs:

- La définition d'un modèle non spécifique à une application (donc la réutilisation de composantes modulées);

- Tenter de résoudre le principal inconvénient des modèles conventionnels (selon l'auteur), soit la mise en forme des données.

L'auteur énonce plusieurs concepts intéressants en ce qui concerne l'utilisation d'objets: adaptabilité, création d'objets, approche multi-réseaux. Cependant, ses explications demeurent strictement topologiques (relations informatiques entre les objets).

5.2 L'objet de transport

Certains concepts généraux relatifs à une approche orientée-objet classique ont été énoncés au chapitre 4 de cet ouvrage. Cette section s'efforce de décrire plus spécifiquement l'objet de transport, qui s'avère être l'unité élémentaire de toute analyse orientée-objet en transport.

5.2.1 Définitions

L'objet de transport est une **entité virtuelle**, un **élément d'information** qui est relatif à la modélisation, l'observation, la planification, la simulation et l'analyse des systèmes de transports. Généré à partir de classes de transport, il possède des **propriétés** et des **méthodes** propres à l'exercice du transport. Bien évidemment, ces caractéristiques n'empêchent pas de le rendre applicable à d'autres référentiels. L'objet de transport est une abstraction informationnelle d'un phénomène, système, acteur, infrastructure ou mouvement de transport. Il en représente l'état (par ses propriétés) et le comportement (par ses méthodes) dans le **temps** et dans l'**espace**. Son action s'applique à tous les niveaux de résolution et de désagrégation spatiale et temporelle (voir Figure 5.3).

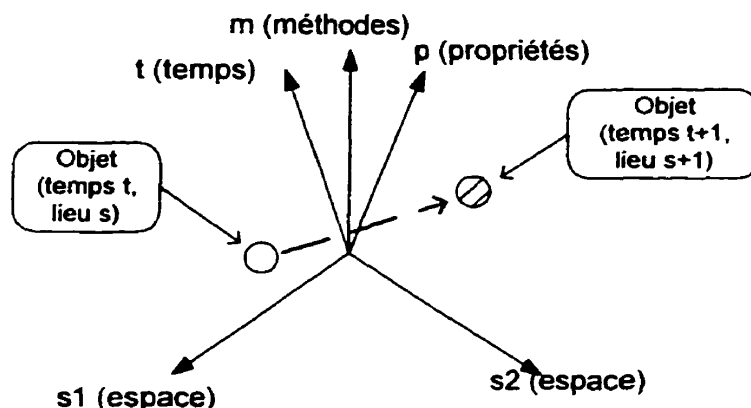


Figure 5.3: Évolution de l'objet de transport dans l'univers informationnel

Il est souvent difficile de verbaliser le concept d'objet, puisqu'il peut représenter à peu près tout phénomène auquel on attribue un état et des actions. En transport, un objet peut être une personne, une voiture, une route, ou le réseau du métro (voies et stations), un échangeur, une ville, etc. Il importe de distinguer le **polymorphisme** (plusieurs formes) de la **polyvalence** (plusieurs fonctions) d'un même objet.

Dans ce document, le terme **système-objets** (ou système par objets) fait référence aux objets de transport placés dans leur environnement "réel" (tel que les arrêts d'un circuit d'autobus), ainsi que les ensembles de relations, propriétés et méthodes associés dans leur "univers". D'autre part, le terme **modèle-objets** (ou modèle par objets) fait plutôt référence aux vues du concepteur qui, dans un souci de clarification, établit un schéma contenant un certain nombre d'objets, propriétés, méthodes et relations qui lui sont nécessaires à l'analyse. Le système-objets prend la forme d'une image du terrain, tandis que le modèle-objets est un diagramme à boîtes et flèches).

5.2.2 Définition mathématique

Les fondements de l'approche orientée-objet en transport peuvent être exprimés sous forme mathématique (AUBERT et DIX-NEUF, 1991).

Soit c une classe de l'ensemble des classes de transport CT .

Soit m une méthode de l'ensemble des méthodes de transport MT .

Soit $MTD(c)$ l'ensemble des méthodes de transport associées à la classe c .

Soit $AN(c)$ l'ensemble des ancêtres de c .

Soit i une instance de c .

Les objets de transports sont engendrés par les classes de transport (transmission des méthodes à l'instance i).

$$(\forall c \in CT)(\forall m \in MT(c))(\forall i \in c) \\ m(i) \text{ existe}$$

Car les méthodes de transports sont transmises par héritage (comme toute méthode par ailleurs):

$$(\forall c \in CT)(\forall m \in MT(c))(\exists c' \in AN(c)) \\ m \in MTD(c')$$

La méthode de transport peut être définie comme une fonction affublée de paramètres (arguments) objets o appartenant à l'ensemble des objets O (Dans les langages programmés "purs", toutes les variables -- alphanumériques, entières, flottantes -- sont des objets). Le premier argument de la méthode de transport est l'objet lui-même.

$$(\forall c \in CT)(\forall m \in MT(c))(\forall i \in c)(\forall o_1, \dots, o_n \in O) \\ \{i, o_1, \dots, o_n\} \in \text{Arguments}(m) \Rightarrow m(i, o_1, \dots, o_n) \in \text{Domaine}(m)$$

Soit p une fonction qui ne possède aucun autre argument que l'objet lui-même. Alors

$$\{i\} \in \text{Arguments}(p) \Rightarrow p(i) \in \text{Domaine}(p) \text{ existe.}$$

Cette méthode p est une propriété. Une propriété est donc une méthode. Le domaine de p est intrinsèque à l'objet de transport.

Une dernière spécificité s'ajoute pour les objets de transport. En général, par définition,

$$(\forall c \in CT)(\forall i \in c) \\ i(s_1, t_1) \neq i(s_2, t_2)$$

où s est une variable représentant l'espace et t une variable représentant le temps. La relation "différent de" indique que le même objet possède un état différent dans le temps et l'espace.

5.2.3 Notation employée

Il existe de nombreuses notations pour illustrer les relations entre les objets, tout dépendant de l'approche préconisée. Les modèles-objets de l'approche orientée-objet en transport énoncés dans ce projet sont présentés en notation unifiée. La notation unifiée ("unified") est une nomenclature fondée sur la définition explicite des classes par des boîtes où sont inscrites les propriétés et méthodes et des relations par des droites avec des chiffres qui indiquent le nombre d'instances impliquées.

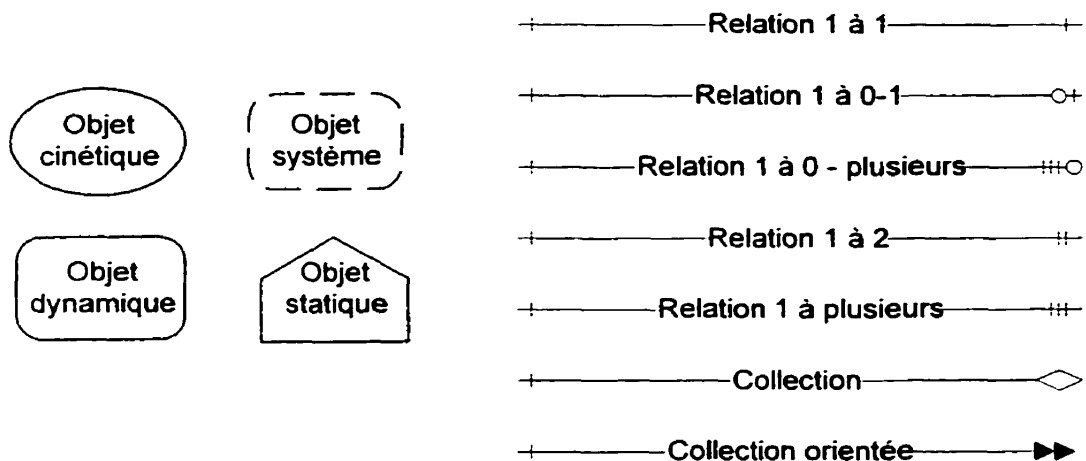


Figure 5.4: Aperçu de la notation utilisée pour les modèles-objets

Dans le cas présent, afin de clarifier la schématisation, les classes sont symbolisées par une forme différente en vertu de leur métaclasse et les propriétés et méthodes n'y sont pas inscrites (à moins que ce soit pertinent). Les extrémités des lignes qui symbolisent les relations sont marquées d'un cercle pour le chiffre 0, d'une ou deux lignes pour les chiffres 1 et 2, de trois lignes pour "plusieurs". La collection non-

orientée est symbolisée par un losange, alors que sa consœur orientée est dotée d'une double flèche. La Figure 5.4 présente les éléments de la notation utilisée pour l'approche orientée-objet en transport.

5.3 Les métaclasses d'objets de transport

Dans un système de transport, chaque objet est généré à partir d'une classe qui lui est propre, et qui lui transmet par héritage ses propriétés et ses méthodes. Ces différentes classes sont ici regroupées en quatre métaclasses, ce qui permet de mieux caractériser les types de propriétés et de méthodes qui leur sont associés: objets dynamiques, objets cinétiques, objets statiques et objets systémiques. Ces métaclasses répondent à des règles de comportement qui sont indépendantes de leur champ d'application (transport collectif, transport adapté, métro, etc.). La Figure 5.5 présente des exemples d'objets pour chacune des métaclasses, qui sont décrites dans les sections suivantes.

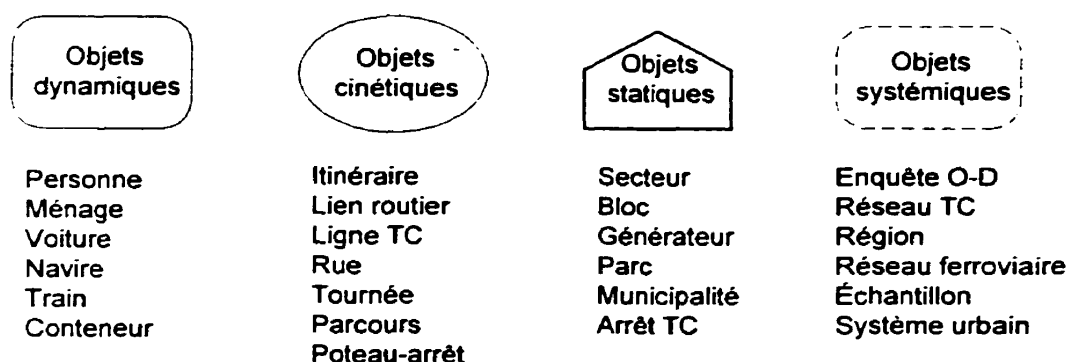


Figure 5.5: Quelques objets de transport par métaclasse

5.3.1 Les objets dynamiques

Les objets dynamiques sont les **acteurs** du transport. Ces objets sont souvent les *décideurs* du mouvement, du moins ils y participent. L'objet dynamique peut être:

- Une **personne** ou un groupe de personnes, tel qu'un ménage, un homme, une femme;

- Un véhicule **mouvant**, telle qu'un autobus, une rame de métro, une automobile;
- Une chose **déplacée**, telle un produit, un élément de marchandise.

Les objets dynamiques sont les plus difficiles à situer dans un modèle-objets car ils se déplacent et risquent ainsi d'être associés à plusieurs objets différents dans le temps et dans l'espace. Par exemple, un objet *Personne* est tantôt lié au domicile, tantôt au mode auto, tantôt à l'accès à destination, etc. Dans les modèles classiques agrégés, les objets dynamiques sont toujours implicites (pensons aux matrices origine-destination). Cependant, ce sont bien ces objets qui se déplacent, et il importe qu'ils fassent partie du modèle.

5.3.2 Les objets cinétiques

Les objets dits "cinétiques" sont les descripteurs et les "**canaliseurs**" du transport. Ces objets ne "décident" pas du mouvement, ils ne font que le décrire ou le supporter. Lorsque l'objet décrit un déplacement entre deux points importants, il est de type cinétique **simple** (lien routier, lien de transport collectif). L'objet cinétique **composé**, pour sa part, regroupe une séquence d'objets cinétiques simples (ligne de transport collectif, rue).

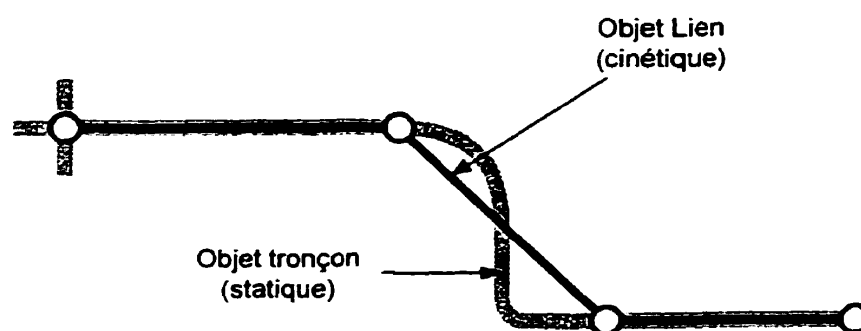


Figure 5.6: Superposition d'objets cinétiques aux objets statiques

L'objet cinétique ne doit pas être confondu avec l'objet statique qui y est souvent associé. Par exemple, l'objet *LienRoutier* (cinétique) décrit le déplacement des

véhicules qui y passent, selon une géométrie pouvant être dictée par l'objet **TronçonRue** (statique) qui y est sous-jacent (voir Figure 5.6).

5.3.3 Les objets statiques

Les objets statiques ont une spatialité relativement fixe dans le temps. En tant que composantes **supportant** les activités de transport, ils peuvent représenter tantôt un lieu précis, tantôt une surface territoriale. Avec leur **topologie** bien définie, ces objets sont des candidats rêvés pour les systèmes d'informations géographiques classiques:

- ☐ Les objets de type **point**, tel que les générateurs, arrêts, intersections;
- ☐ Les objets de type **lien**, tel que les frontières de zones;
- ☐ Les objets de type **surface**, tel que les parcs, quartiers, municipalités.

Dans les systèmes d'information géographiques classiques, les objets de transport dynamiques et cinétiques doivent prendre la forme d'objets statiques pour être convenablement représentés. L'avènement des nouveaux outils de simulation et d'animation pallient ce problème en représentant les mouvements des objets par rapport au contexte environnant.

5.3.4 Les objets systémiques

Les objets systémiques sont des ensembles cohérents d'objets élémentaires et des relations qui les lient. Par sa haute complexité, un objet systémique abstrait les objets qui le composent aux observateurs extérieurs, qui ne sont intéressés qu'aux propriétés et méthodes globales du système. Ces objets se rapportent aux trois métaclasses précédentes:

- ☐ L'ensemble **dynamique** contient des éléments de demande, tel qu'une enquête origine-destination, un recensement;

- L'ensemble **cinétique** regroupe des éléments d'offre de transport, tel qu'un réseau de transport collectif, un réseau routier;
- L'ensemble **statique** représente un territoire fixe, tel que le découpage en secteurs, un campus universitaire, etc.

Enfin, un objet systémique **mixte** regroupe des objets de métaclasse différentes qui sont liés entre eux dans l'optique d'une activité de transport (système urbain, système ferroviaire).

5.3.5 Polymorphisme

On ne saurait attribuer une métaclasse précise et unique à chaque objet de transport. Rappelons que le **polymorphisme** leur permet d'adhérer à de multiples fonctions, tout dépendant du contexte (situation ou système en présence). Ainsi, un lien routier sera statique s'il ne fait que décrire la rue sur laquelle il se trouve. Cependant, le même objet "deviendra" cinétique si on l'insère dans un itinéraire routier entre deux points du territoire.

5.3.6 Temporalité

Une des caractéristiques fondamentales de l'objet de transport s'articule autour de la temporalité de son existence. En effet, un objet de transport existe et est en action durant une ou plusieurs périodes de temps données. Cette propriété est difficilement représentée dans les systèmes de gestion de bases de données classiques, et exprime une des différences entre "stockage de donnée" et "approche orientée-objet" dans le cadre du transport.

5.4 Les propriétés des objets de transport

Les objets de transport possèdent des propriétés dont le type et les domaines associés varient en fonction de la métaclasse à laquelle ils appartiennent. La notion de type fait

ici référence à la fonction primaire qui est attribuée à la propriété, et non aux *valeurs* que celle-ci peut prendre, qui sont décrites à la section 5.4.11.

Les types de propriété décrits dans les sections suivantes sont: identification, dénomination, géométriques, pseudo-géométriques, spatiales, temporelles, socio-écono-démographiques, opérationnelles, contextuelles et classification. Chaque type de propriété est accompagné d'une fiche qui indique quelques exemples ainsi que l'applicabilité aux quatre métaclasse: système (S), dynamique (D), cinétique (C) et statique (I pour immobile). L'applicabilité reflète l'usage le plus courant du type de propriété, laissant de côté les exceptions.

5.4.1 Les propriétés d'identification

Les propriétés d'identification permettent de reconnaître l'objet de façon unique et différenciée dans le temps et dans l'espace. Dans le système-objets, l'unicité de l'identificateur est requise. Cette propriété se présente donc sous forme de clé ou de numéro. À ne pas confondre avec les propriétés de dénomination.

Tableau 5.1: Propriétés d'identification

Énoncé de la propriété	Valeur exemple	Applicabilité
Rue.Mdcddnum	9350	SDCI
Noeud.Numéro	2445	
Ménage.Clé	F10234	

De façon générale, les langages de programmation et les gestionnaires de bases de données prennent en charge cette propriété par l'établissement d'une clé unique (dite "primaire") ou l'affectation d'un pointeur (adresse mémoire). Les systèmes d'information géographique se servent de ces clés primaires pour établir un pont entre les éléments graphiques (topologiques) et les enregistrements de données (attributs).

5.4.2 Les propriétés de dénomination

Les propriétés de dénomination offrent la possibilité de nommer les objets de façon explicite. Contrairement aux propriétés d'identification, ce type ne requiert pas l'unicité (pensons aux noms de rues). Longtemps négligée (parce que consommatrice de

mémoire), la dénomination adéquate des objets permet l'application plus aisée de méthodes de consultation et de visualisation.

Tableau 5.2: Propriétés de dénomination

Énoncé de la propriété	Valeur exemple	Applicabilité
Rue.Nom	Sherbrooke	<i>SDCI</i>
Personne.Prénom	Jacques	
Ligne.Nom	St-Denis/St-Hubert	

5.4.3 Les propriétés géométriques

Les objets de transports faisant l'objet d'une spatialisation par l'attribution de caractéristiques physiques possèdent des propriétés géométriques référencées dans le système d'information géographique utilisé. Par exemple, un objet de type "surface" possédera une propriété "Aire" calculée par défaut dans le système d'unités en vigueur.

Tableau 5.3: Propriétés géométriques

Énoncé de la propriété	Valeur exemple	Applicabilité
Secteur.Aire	234.345 km ²	<i>I</i>
Lien.Longueur	327.5 m	
Région.Périmètre	34.657 km	

5.4.4 Les propriétés pseudo-géométriques

Cependant, en plus des objets statiques, des objets de type cinétique peuvent également être caractérisés géométriquement par des distances, longueurs ou largeurs intégrées au système par l'utilisateur nonobstant la valeur calculée par le SIG. De plus, il est possible que des objets statiques soient affectés de mesures géométriques "officielles" non liées au système. On parlera alors de propriétés pseudo-géométriques.

Un exemple classique: la distance entre les arrêts d'une ligne de transport collectif peut être supérieure à la longueur géométrique de l'objet Lien associé, notamment s'il s'agit de liens inter-arrêts à vol d'oiseau.

Tableau 5.4: Propriétés pseudo-géométriques

Énoncé de la propriété	Valeur exemple	Applicabilité
Secteur.Aire	236 km ²	CI
LienTC.DistanceEntreArrêts	340 m	
Tournée.LongueurPrévue	27 km	

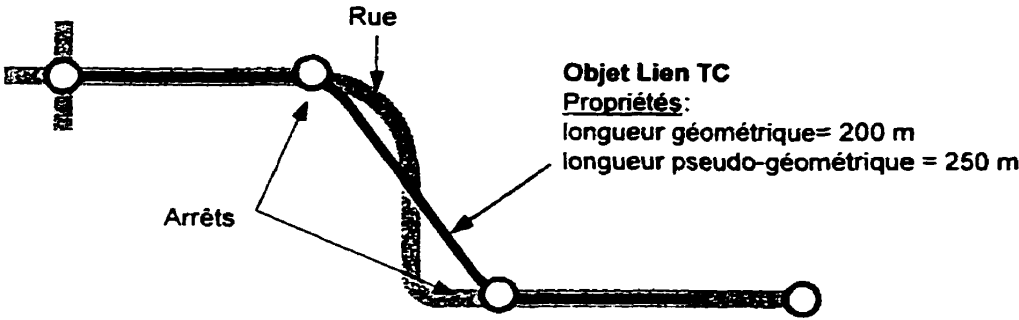


Figure 5.7: Application de propriétés pseudo-géométriques

5.4.5 Les propriétés spatiales

Dans un système de transport, en un moment donné, tout objet simple peut être référencé dans l'espace, que ce soit directement (par des coordonnées) ou indirectement (par association avec un objet spatialement référencé, comme par exemple, une personne dans un véhicule sur une route).

Tableau 5.5: Propriétés spatiales

Énoncé de la propriété	Valeur exemple	Applicabilité
Nœud.CoordonnéeUTMenX	632678	DCI
Produit.Entrepot	B23	
Client.CodePostal	H3K2K9	

Les propriétés spatiales sont marquées d'une constante évolution. Après avoir passé des systèmes de zones aux coordonnées X-Y précises, on préconise maintenant l'attribution de références objets tel qu'une intersection, un générateur, un arrêt, etc.

5.4.6 Les propriétés temporelles

Tout objet de transport (simple ou complexe) possède un état référencé dans le temps grâce à des propriétés temporelles. Celles-ci décrivent non seulement des heures ponctuelles (à quel moment?), mais également des durées (combien de temps?).

Tableau 5.6: Propriétés temporelles

Énoncé de la propriété	Valeur exemple	Applicabilité
RéseauTC.MiseEnVigueur	98.04.03	<i>SDCI</i>
Déplacement.HeureDépart	8h35	
Produit.MoisFabrication	97-03	

5.4.7 Les propriétés socio-écono-démographiques

Les propriétés socio-écono-démographiques caractérisent des objets de type Personne et Ménage ainsi que certains objets associés. Elles permettent de clarifier les aspects touchant l'être humain et ses multiples facettes: âge, sexe, revenu, taille du ménage, logement, etc.

Tableau 5.7: Propriétés socio-écono-démographiques


Énoncé de la propriété	Valeur exemple	Applicabilité
Personne.Âge	23 ans	<i>D</i>
Ménage.Revenu	34 000 \$	
Produit.Coût	52\$	

Les objets des métaclasses cinétique et statique peuvent aussi être affectés de propriétés socio-écono-démographiques, mais ce sera par objet dynamique interposé. Par exemple, on dira qu'une ligne de transport collectif transport 60% de femmes, mais cette propriété demeure attachée aux objets personnes. L'énoncé PourcentageFemmes de la ligne TC n'est en fait qu'une méthode.

5.4.8 Les propriétés opérationnelles

Les propriétés opérationnelles sont utilisées pour décrire l'activité d'un objet cinétique par la caractérisation, l'ordonnancement et l'identification des mouvements qui y sont relatifs au cours d'une période donnée.

Tableau 5.8: Propriétés opérationnelles


Énoncé de la propriété	Valeur exemple	Applicabilité
LigneTC.Fréquence	12 min.	
Tournée.VitesseMoyenne	24.6 km/h	
Voie.Capacité	900 uvp/h	

Ce type de propriété est associé à l'offre de transport, ce qui la rend traditionnellement "disponible", puisque les sociétés de transport disposent habituellement de l'information (structurée ou non).

5.4.9 Les propriétés contextuelles

Les propriétés contextuelles permettent de situer l'objet dans son contexte et de justifier sa raison d'être dans le système. Elles sont à l'origine des relations entre les objets. Seul les valeurs de type objet sont admises pour cette propriété.

Tableau 5.9: Propriétés contextuelles

Énoncé de la propriété	Valeur exemple	Applicabilité
NoeudTC.Arrêts	Objets arrêts 231243 et 231245	
Personne.Ménage	Objet ménage F2345	
Tournée.Opérateur	Objet Société ABC	

Ce type de propriété est un artifice de l'approche orientée-objet, où les relations et transactions peuvent être créées par le biais de propriétés. L'expression Personne.Ménage indique la relation entre le ménage et les personnes associées, et l'appel de la propriété consiste en une méthode qui interroge l'aboutissant de la relation.

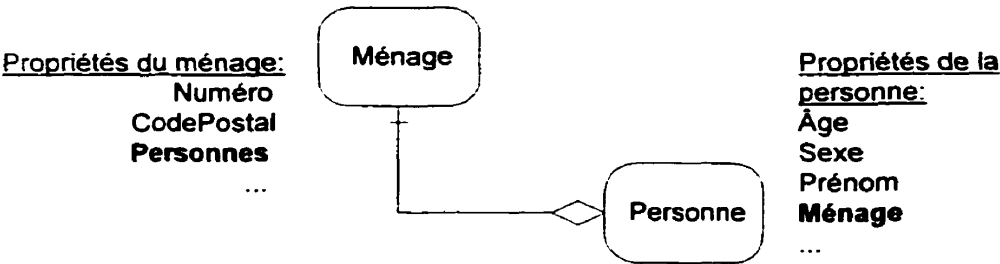


Figure 5.8: Exemple de propriétés contextuelles

5.4.10 Les propriétés de classification

Il arrive régulièrement qu'un objet fasse l'objet d'une classification, souvent basée sur des critères liés à sa dénomination ou d'autres valeurs de propriété. Par exemple, une ligne de transport collectif est classée "Express" en vertu de critères tel que la fréquence, la distance inter-arrêts, etc.

Tableau 5.10: Propriétés de classification

Énoncé de la propriété	Valeur exemple	Applicabilité
LigneTC.Type	Métrobus	<i>SDCI</i>
Générateur.Type	Hôpital	
Marchandise.CodeSIC	1234	

La propriété de classification peut prendre la forme d'une méthode qui interroge l'objet de façon directe afin de déterminer dans quelle catégorie il fait partie. Ainsi, un objet de transport qui change d'état (dans le temps et l'espace) se voit interactivement modifié ses propriétés de classification.

5.4.11 Les valeurs de propriétés

Les valeurs de propriétés (et de méthodes) des objets de transport peuvent être succinctement catégorisées comme suit (ROBINSON et al., 1995):

- Les valeurs **nominales** font référence à des mesures qualitatives d'une propriété, sans qu'il y ait discrimination basée sur l'importance, comme une classification non hiérarchique ou une dénomination (Personne.Prénom).
- Les valeurs **ordinales** sont présentées de façon qualitative ordonnancée. Une hiérarchisation (autoroute, artère, collectrice, locale) en est un bon exemple (Rue.ClasseRue).
- Les valeurs **absolues** sont des mesures exprimant une quantité non relative, tel qu'un nombre de personnes (Ménage.Personne.Count) ou la largeur d'une rue (Rue.Largeur).

- ❑ Les valeurs **relatives** (dérivées) sont des mesures quantitatives qui s'appuient sur une base absolue, comme les taux (de motorisation, de mobilité), les densités, les mesures moyennes (âge moyen, masse moyenne).
- ❑ Les valeurs **non proportionnelles** (par intervalle) sont placées dans des classes statistiques exprimées de façon relative, tel que la température (10°C n'est pas le double de 5°C) ou l'altitude (relative au point 0 mètre).
- ❑ Les valeurs **proportionnelles** (par ratio) caractérisent des variables pouvant être comparées de façon absolue, tel que le revenu (10 000\$ est le double de 5 000\$), la population, etc.
- ❑ Les **objets** en eux-mêmes peuvent être des valeurs de propriété. Dans un langage orienté-objet "pur", les types de variables (entiers, réels, chaînes) sont tous des objets.

Cette classification des valeurs de propriétés prend son importance lors de l'application de méthodes aux objets auxquels elles sont rattachées.

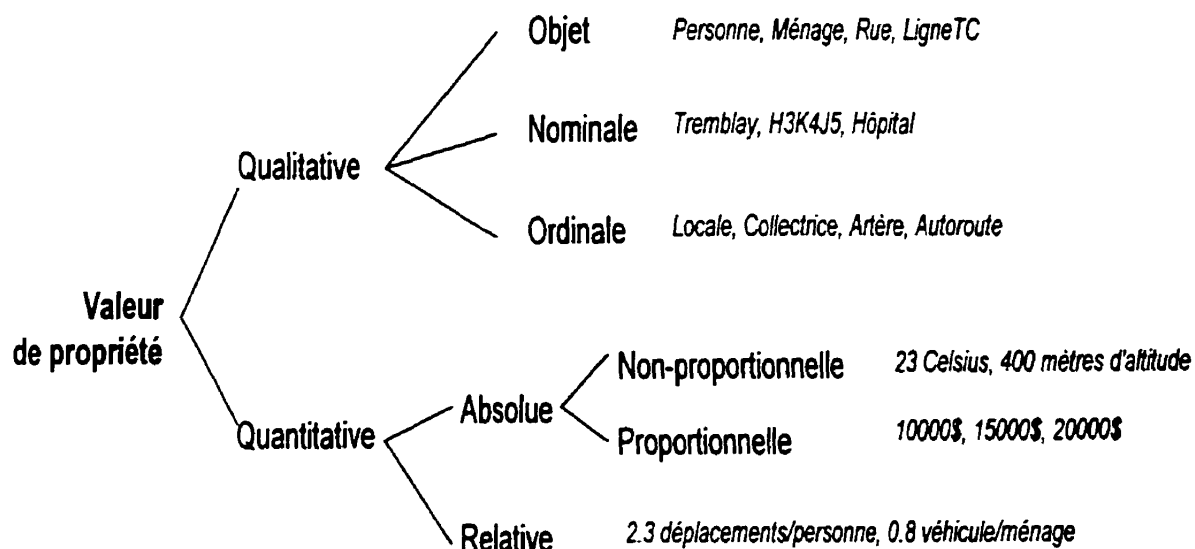


Figure 5.9: Les valeurs de propriétés

5.5 Les méthodes des objets de transport

Tout comme les propriétés, plusieurs catégories de méthodes peuvent être identifiées pour les métaclasses d'objets de transport. Cette typologie n'est pas exhaustive; elle peut cependant aider à comprendre les tenants et aboutissants d'une méthode générale de transport. Les méthodes sont, dans l'ordre présenté: propriété, intrinsèques, géométriques, de visualisation, génératrices, statistiques, spatiales, associatives et complexes.

5.5.1 Les méthodes de propriété

Puisque les propriétés sont des méthodes, ils en constituent le premier type. Les propriétés sont interrogées et fixées par ces méthodes.

Tableau 5.11: Méthodes de propriété

Exemple d'énoncé de la méthode	Applicabilité
LigneTC.Type="Métrobus"	<i>SDCI</i>
Générateur.Nom="Place Longueuil"	
Rue.Mcdnum=3467	

5.5.2 Les méthodes intrinsèques

Les méthodes intrinsèques sont liées à la définition même de l'objet. Elles sont le plus souvent dictées par le langage de programmation utilisé. Ce type de méthode est souvent associé aux collections (voir Figure 5.10).

Tableau 5.12: Méthodes intrinsèques

Exemple d'énoncé de la méthode	Applicabilité
LigneTC.Arrets.Compte	<i>SDCI</i>
BanqueGénérateurs.Item(345)	
Rue.Ajouter(Nœud)	

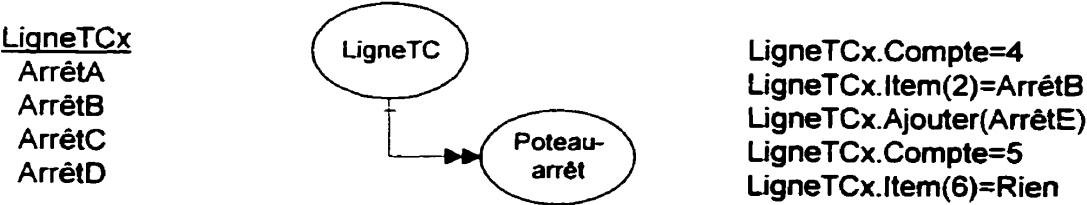


Figure 5.10: Méthodes intrinsèques de l'objet collection

5.5.3 Les méthodes géométriques

Les méthodes géométriques servent à caractériser et calculer les propriétés géométriques d'un objet ou d'un groupe d'objet de façon topologique, en vertu des lois associées. Évidemment, des propriétés pseudo-géométriques peuvent aussi être calculées par ce genre de méthode (voir 5.4.4).

Tableau 5.13: Méthodes géométriques

Exemple d'énoncé de la méthode	Applicabilité
Secteur.CalculerAire	CI
LigneTC.CalculerLongueur	
BanqueRues.LongueurMaximale	

Tous les systèmes d'information géographiques utilisent des méthodes géométriques.

5.5.4 Les méthodes de visualisation

Dans un système-objets de transport, il est important de définir un ou plusieurs référentiels objets dans lesquels les instances seront visualisées soit graphiquement (carte, plan) ou soit de façon descriptive (tableau, champs de données). Le référentiel est relatif à l'observateur: par exemple, l'examen d'une route peut se faire à ses abords tout comme à l'intérieur d'un véhicule qui la parcourt.

Tableau 5.14: Méthodes de visualisation

Exemple d'énoncé de la méthode	Applicabilité
LigneTC.Afficher	SDCI
Rue.AfficherHiérarchie	
RéseauTC.VisualiserLignesExpress	

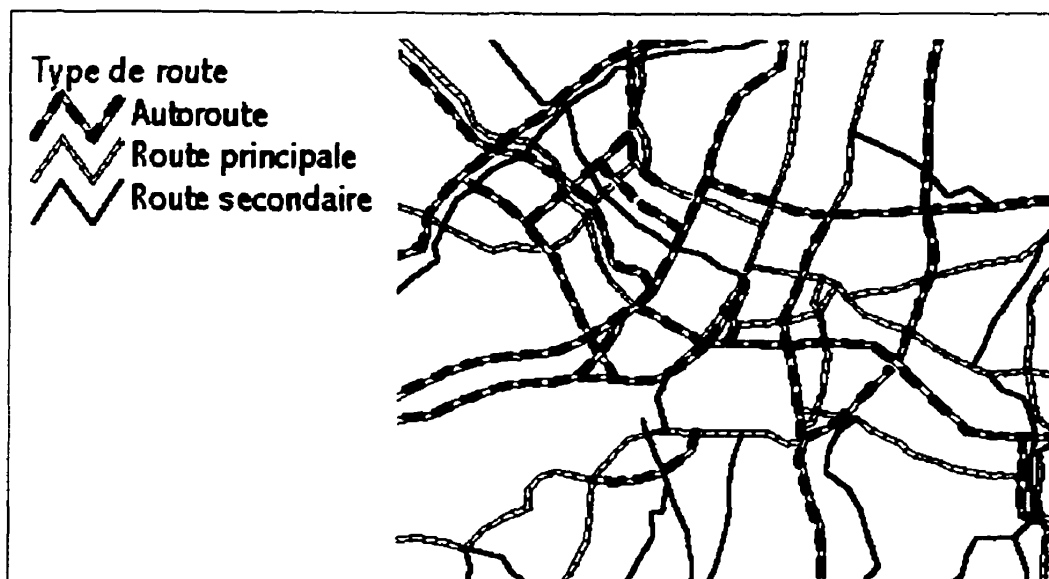


Figure 5.11: Méthode de visualisation d'un système d'information géographique

La visualisation est un élément important de l'approche orientée-objet en transport lorsque celle-ci est couplée à l'approche de modélisation totalement désagrégée. En effet, les données y sont présentées de façon individuelle, ce qui nécessite une interface de visualisation complexe. Il est en question à la section 7.4.

5.5.5 Les méthodes génératrices

Les méthodes génératrices impliquent la création d'objets ou l'apport de valeur ajoutée aux propriétés et méthodes des objets existants. Elles s'appliquent généralement aux classes dynamiques et cinétiques (les autres étant bénéficiaires indirects). On y retrouve la génération de déplacements, le calcul de chemins, la dérivation de statuts, etc.

Tableau 5.15: Méthodes génératrices

Exemple d'énoncé de la méthode	Applicabilité
Deplacement.Imputer	DC
Personne.DeterminerStatut	
ItineraireHLP.CalculerChemin	

Les méthodes de calcul de chemins sont des méthodes génératrices puisqu'elles fabriquent de nouveaux objets, en l'occurrence les itinéraires de déplacements. De même, la dérivation d'un statut apporte une valeur ajoutée à l'objet *Personne*.

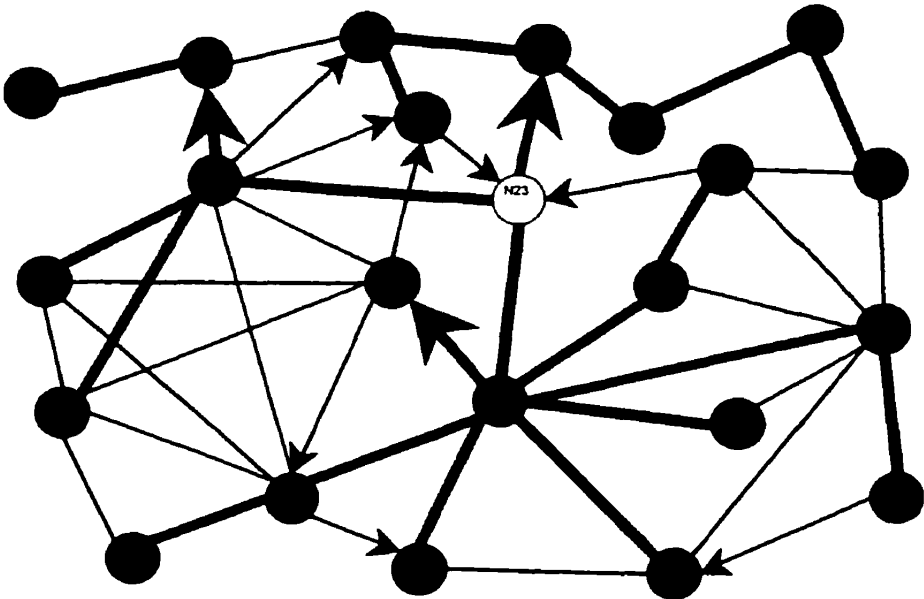


Figure 5.12: Exemple de méthode génératrice: la création d'un objet *Arbre* à partir d'un objet *Nœud*

5.5.6 Les méthodes statistiques

Les méthodes statistiques visent l'application de fonctions statistiques afin de déterminer des indicateurs, établir des distributions ou afficher graphiquement des relations statistiques entre les propriétés d'un ou plusieurs objets.

Tableau 5.16: Méthodes statistiques

Exemple d'énoncé de la méthode	Applicabilité
CodeVoie.DistributionTempsOccupation	SDCI
Personnes.VarianceDureeDeplacement	
Secteur.PeriodeAffluenceMaximale	

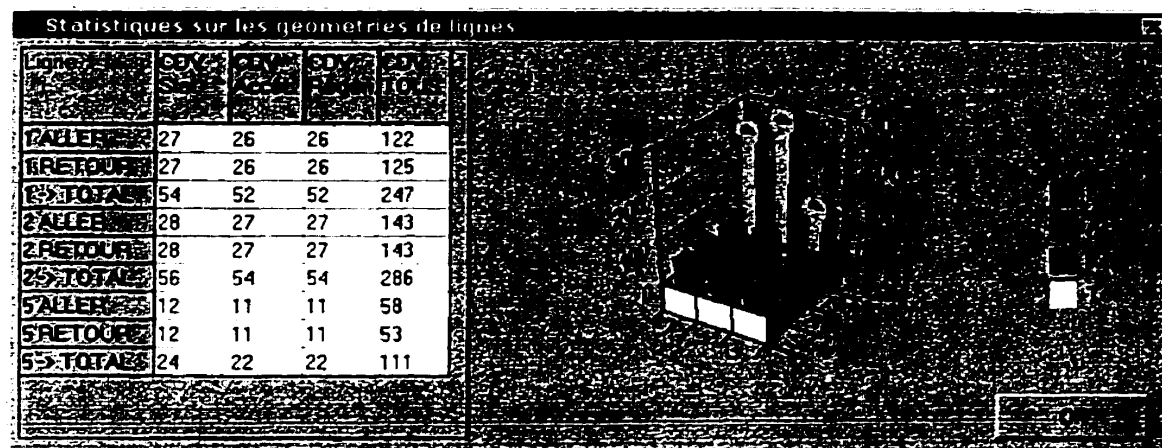


Figure 5.13: Exemple de méthode statistique

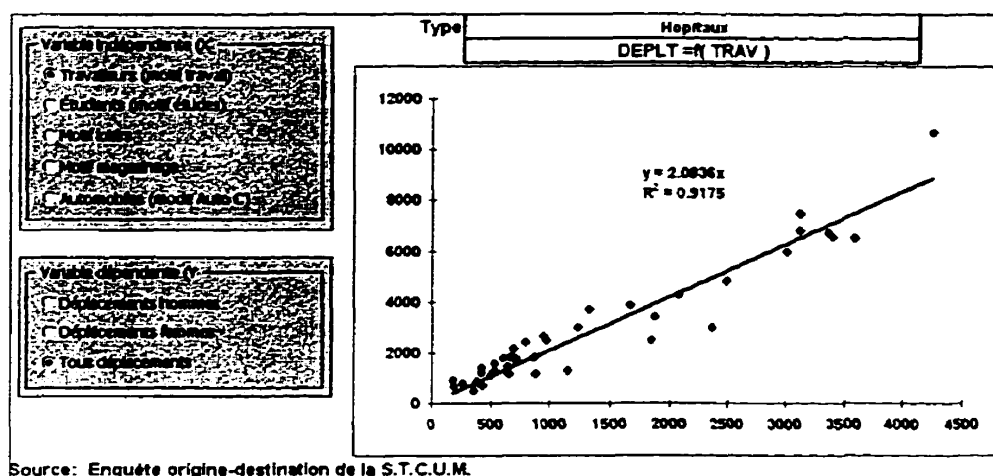


Figure 5.14: MADGEN, autre exemple de méthode statistiques

Couplées aux méthodes de visualisation, les méthodes statistiques se présentent sous forme de tableaux et de graphiques (comme des régressions, par exemple).

5.5.7 Les méthodes spatiales

Ces méthodes impliquent l'agrégation ou la désagrégation spatiale d'objets en vertu de leurs références spatiales. On y reconnaît les méthodes de superposition, juxtaposition, union, intersection et soustraction propres aux systèmes d'information géographiques. Elles impliquent habituellement la création de nouveaux objets

(méthodes génératrices) dont les propriétés doivent être soigneusement recalculées selon que leurs valeurs sont proportionnelles, ordinales, par intervalle ou autre (il ne s'agit pas toujours de sommes simples). La section 7.5 en fait état.

Tableau 5.17: Méthodes spatiales

Exemple d'énoncé de la méthode	Applicabilité
Secteurs.Union(Secteur1,Secteur2)	<i>I</i>
CodePostaux.TrouverDans(Zone4)	
Territoire.Intersection(Municipalite1,Zone4)	

5.5.8 Les méthodes associatives

Les méthodes associatives créent des liens d'intérêt entre des objets en vertu des relations entre eux. Par exemple, l'affectation d'un déplacement sur un réseau de transport collectif, le regroupement (non spatial) de générateurs, etc. Tout objet impliqué dans une relation est "associé" à son partenaire.

Tableau 5.18: Méthodes associatives

Exemple d'énoncé de la méthode	Applicabilité
ReseauTC.Affecter(Deplacements)	<i>SDCI</i>
Menages.DeplacementsTravail	
StationMetro.VoyagesBus	

Peu d'éléments distinguent une méthode associative d'une propriété contextuelle; elles sont toutes deux destinées à créer des relations entre les objets. Disons que la propriété contextuelle fait "partie" de l'objet, tandis que la méthode associative engendre cette propriété.

5.5.9 Les méthodes complexes

Vu la récursivité et l'héritage liées aux méthodes et propriétés des objets de transport, on identifie également les méthodes complexes, qui sont un amalgame de deux ou plusieurs types de méthodes énoncées précédemment. On les associe habituellement aux objets système.

Tableau 5.19: Méthodes complexes

Exemple d'énoncé de la méthode	Applicabilité
Enquete.DeterminerMatriceOD	§
ReseauTC.CalculerConsommationVehKm	
Autoroutes.FloteParAutomobilistes(Secteur43)	

Une méthode complexe peut être appliquée à un objet qui n'est pas de type système au premier abord (par exemple, l'objet Personne). Cependant, la méthode ne s'adresse pas qu'à l'objet, mais aussi à ses relations par l'exécution de transactions. Durant son action, la méthode complexe aura pour effet de transformer l'objet simple en objet système.

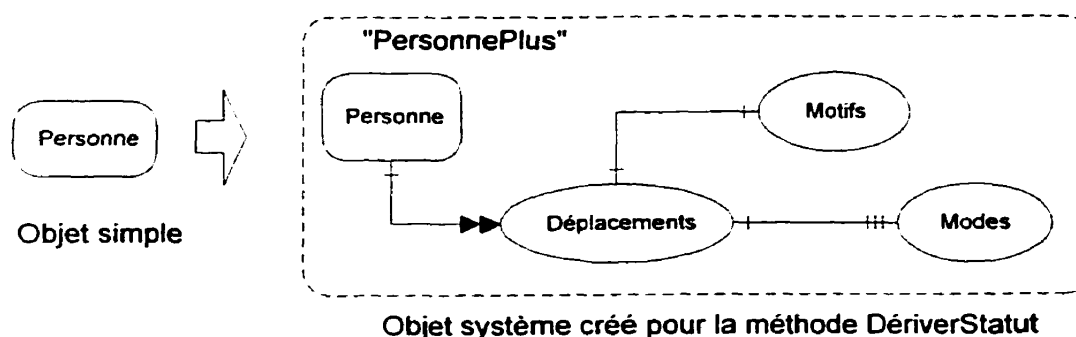


Figure 5.15: Exemple d'objet système

5.6 Les relations entre les objets de transport

Il est souvent difficile de faire la distinction entre les méthodes et les relations entre les objets dans un système-objets. Une simple interrogation de propriété implique une relation entre le demandeur et l'interrogé. Dans un modèle-objets, toute relation implique une transaction entre deux ou plusieurs objets. Les prochaines sections présentent la relation "1 à n", la collection et la collection orientée.

5.6.1 La relation "1 à n"

Ce type de relation inclut tout ce qui a été énoncé précédemment: interrogation de propriété, application d'une méthode, etc. Toute relation qui origine d'un seul objet peut s'adresser à 0, 1, 2 ou plusieurs objets. Par exemple, la relation entre l'objet Lien

et l'objet Nœud est de type "1 à 2", tandis que la relation entre l'objet Personne et l'objet Déplacement est de type "1 à 0-plusieurs".

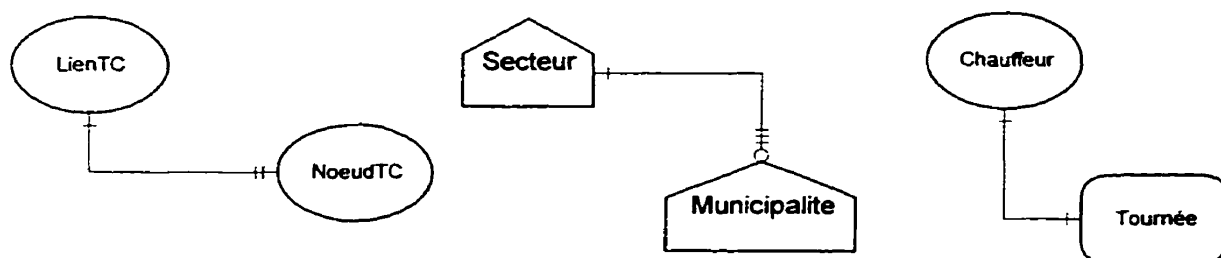


Figure 5.16: Quelques relations "1 à n"

Il ne faut pas confondre ce type de relation avec celles que l'on retrouve dans les systèmes de gestion de bases de données. Les relations d'un SGBD tel qu'Access, FoxPro ou Oracle sont des artifices permettant de lier de l'information de plusieurs tables. Il arrive que ces artifices ne correspondent pas aux relations conceptuelles entre les objets; ils servent plutôt à structurer les données afin d'en permettre un traitement plus efficace.

5.6.2 La collection

La collection est une interprétation de la relation "1 à 0-plusieurs" qui implique des objets de même nature. Par exemple, un groupe d'objets Nœud. Dans un langage programmé tel que Visual Basic, la collection est elle-même un objet. Dans la notation des modèles-objets illustrés dans ce document, la collection est identifiée par un lien marqué d'un losange. Le schéma suivant décrit deux façons pour représenter une relation de collection; la deuxième sera préférée.

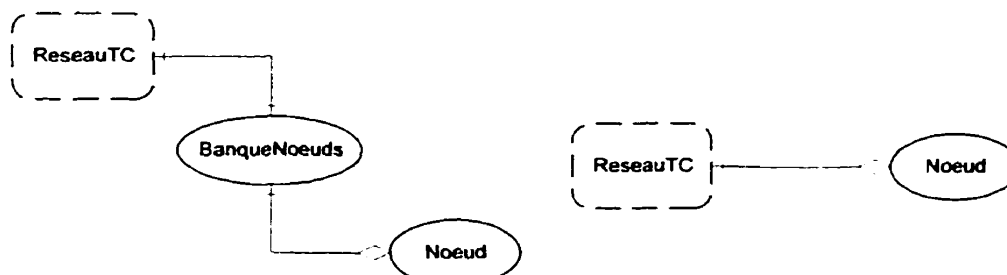


Figure 5.17: Deux représentations de la même collection

5.6.3 La collection orientée

La collection orientée est une fonction extrêmement utile dans l'approche objet en transport car elle permet de représenter les objets dans un ordre spatial ou temporel, ou les deux, selon le besoin. Par exemple, les déplacements d'un objet *Personne* sont placés dans une collection orientée temporellement ordonnée (*t*) appelée collection chronologique. Les objets Arrêt d'une ligne de transport collectif seront ordonnés dans une collection spatialement orientée et associée à l'objet *LigneTC* (collection géométrique). La collection rappelle le concept de "liste", largement utilisé au cours du développement logiciel de l'approche totalement désagrégée.

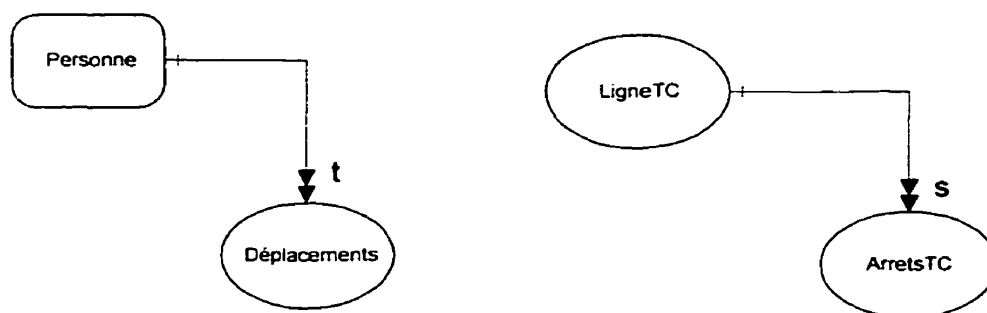


Figure 5.18: Exemples de collections orientées (chronologique et géométrique)

5.6.4 Le modèle-objets, un outil de représentation des objets et des relations

Le modèle-objets est une représentation équivoque 1) des objets de transport utilisés dans l'analyse d'un problème et 2) des relations et transactions qui lient ces objets entre eux. Il possède son propre niveau de résolution et, par définition, une adaptabilité quasi infinie quant à l'intégration des objets extérieurs.

En ce sens, le modèle objet *ne doit pas* être confondu avec le modèle relationnel d'une base de données. En effet, le modèle relationnel d'une base de données possède des limites quant au nombre d'éléments inclus et aux possibilités de relations entre les tables; ces relations étant tributaires du contenu des tables associées. Il cumule également ses propres règles d'intégrité référentielle et d'attribution de fonctions aux éléments de la base. Le modèle relationnel est encadré par le langage de programmation et les structures de données qui y sont permises.

Il arrive fréquemment de modéliser une structure de données en se basant sur le modèle-objets associé. Il est naturel de tenter de répliquer l'esprit du problème par la création d'une table pour chaque objet et une relation pour chaque lien entre les objets. Mais attention! L'effet structurant du gestionnaire de base de données pourrait forcer des transformations du modèle-objets, ce qui n'est pas souhaitable si cette action modifie la compréhension du problème.

L'exemple du fichier d'enquête origine-destination utilisée dans le cadre de l'approche désagrégée démontre la distinction entre base de données et approche orientée-objet. En effet, tous les objets se retrouvent dans un seul et unique fichier (Figure 5.19) qui contient l'ensemble de l'information nécessaire à la reconstitution du modèle-objets (Figure 5.).

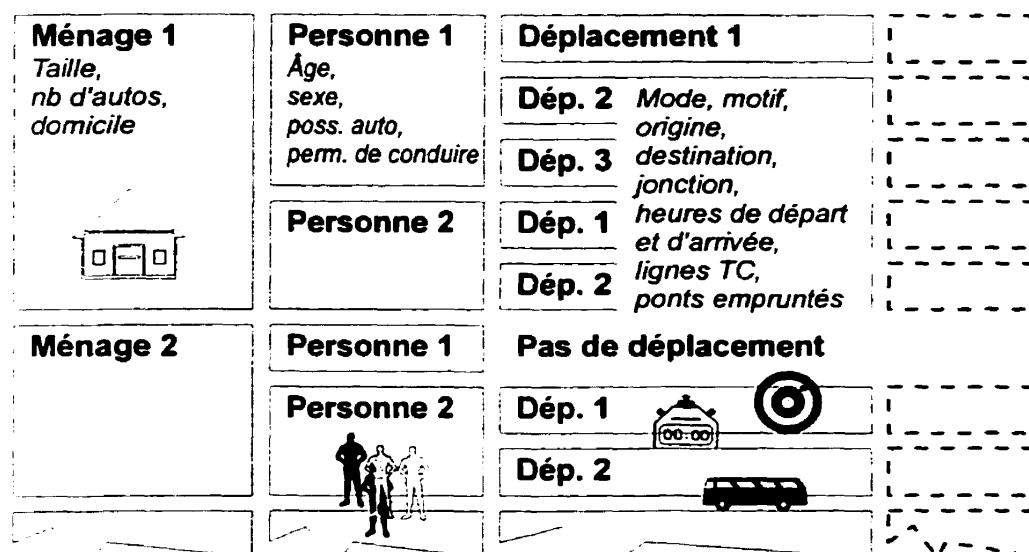


Figure 5.19: Fichier unifié d'enquête origine-destination

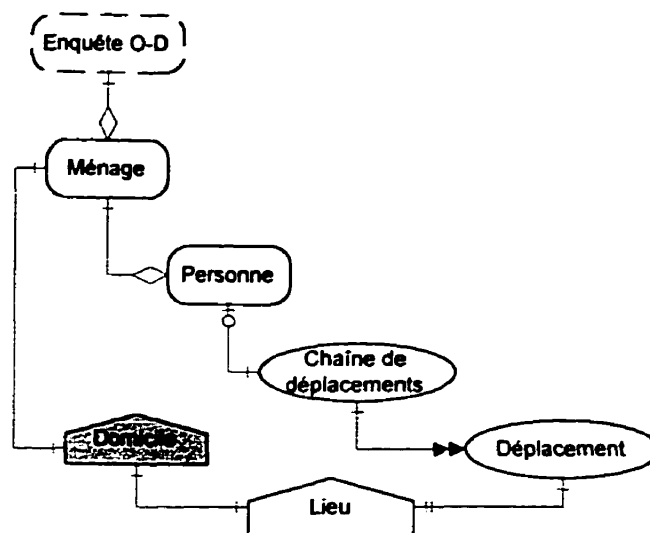


Figure 5.20: Modèle-objets de l'enquête origine-destination

Ce chapitre a présenté la nomenclature associée à l'approche orientée-objet et totalement désagrégée en transport urbain. Dans les trois prochains chapitres, ces concepts seront mis en pratique dans des expérimentations touchant les objets de l'offre (réseaux) et de la demande (enquêtes origine-destination) de transport.

CHAPITRE 6: PROPRIÉTÉS ET MÉTHODES ASSOCIÉES À DES RÉSEAUX DE TRANSPORT VIAIRE ET COLLECTIF

La disponibilité et la multitude de sources de données en transport ont certes permis le développement de nouveaux modèles "infogivores" nécessitant de grandes quantités de données que l'on souhaite "crédibles". Qu'en est-il du traitement de l'information incomplète, voire manquante, dans l'application de ces modèles? Pourrait-on s'approprier ces éléments d'informations par d'autres moyens que la prise de données directe?

La réponse constitue l'argumentation de ce chapitre. L'utilisation de réseaux de transport viaire (voirie urbaine) et collectif dans un contexte de planification nécessite une grande quantité de données touchant les caractéristiques de plusieurs milliers d'objets (rues, tronçons, lignes, arrêts). Ce chapitre vise à démontrer, par des expérimentations sur les objets de réseaux, les possibilités d'utiliser des bases de données incomplètes afin d'y imputer de l'information à l'aide d'une approche dite "floue". Les objets en présence doivent d'abord être définis et remis dans leur contexte par l'application de leurs propriétés et de leurs méthodes.

Ce chapitre présente donc, dans l'ordre, le réseau de voirie, le réseau de transport collectif, les méthodes associées à ces réseaux et l'approche floue en transport. *Les représentations graphiques et les exemples présentées dans ce chapitre ont été montées à l'aide du logiciel MADTOO, le "Modèle d'analyse désagrégée transport orienté-objet", conçu dans un cadre expérimental utilisant le langage Visual Basic et des classes d'objets de transport. Les fonctionnalités de MADTOO sont présentées à l'Annexe C.*

6.1 Le réseau de voirie

Cette section décrit ce qu'est un réseau de voirie dans le contexte expérimental utilisé. Plusieurs concepts y sont présentés, certains étant également employés à d'autres applications orientées-objet.

6.1.1 Définition

Le réseau de voirie est un ensemble d'objets cinétiques spatialisés sur lesquels sont habilités à circuler des objets dynamiques tel que les automobiles, camions, autobus, taxi et piétons. En milieu urbain, ce réseau est principalement défini par les rues, ruelles et autres voies de circulation, auxquels s'ajoutent certains passages piétonniers. L'objet RéseauViaire doit être distingué de sa représentation spatiale (cartographique). Dans les applications de géomatique traditionnelle, les éléments routiers sont définis par des surfaces délimitées par les rives de rues, les divisions cadastrales et les autres obstacles géographiques. Dans certains systèmes d'information géographiques, les centres de rues sont codés, ce qui permet de délimiter un ensemble linéaire associé au système de rues. Cependant, aucune de ces opérations ne garantit la connexité et l'opérabilité du réseau viaire.

6.1.2 Connexité et opérabilité

La connexité et l'opérabilité du réseau de voirie sont assurées par une série de règles liées à la topologie et à la façon de structurer l'information dans la base de données sous-jacente. La connexité évoque la possibilité de se déplacer dans le réseau de façon adéquate, en respectant les règles liées au mode utilisé. Par exemple, un véhicule routier ne peut pas se déplacer à contresens d'une rue à sens unique; cependant, un piéton peut le faire. De plus, des relations doivent être établies entre les objets Liens pour que les objets dynamiques puissent circuler d'un à l'autre (en théorie des graphes, les nœuds assurent cette fonction). L'opérabilité du réseau est rendue possible grâce à l'identification de propriétés et de méthodes qui le rendent *opérationnel*: vitesse, longueur, largeur, nombre de voies, sens, etc.

6.1.3 De la représentation cartographique à la création de l'objet Réseau

La très grande majorité des systèmes d'information géographique urbains possèdent une représentation des rues. Cette représentation topologique en points, lignes et surface est souvent très précise (géodésique), ayant été établie à la suite de numérisation de photographies aériennes, d'inscriptions numériques du cadastre et de travaux d'arpentage sur le terrain (voir Figure 6.1).

Cependant, ces représentations se voient peu utiles lorsqu'il s'agit de regrouper les voies routières pour en constituer un réseau, puisque aucune logique de connexité et d'opérabilité ne leur est associée. Une première étape consiste à numériser les centres de rues en éléments vectorisés d'arcs et de nœuds. Ces éléments sont connexes en tout point et généralement placés sur une seule couche. Une telle représentation est suffisante pour la plupart des systèmes d'information géographiques destinés à l'interrogation des segments routiers, l'étiquetage et la coloration thématique. Toutefois, le passage à l'objet réseau de voirie amène un niveau supérieur de complexité par la mise en place des règles suivantes:

- L'objet Rue est une collection spatialement ordonnée d'objets Arc. La création d'une rue implique le regroupement d'un ou de plusieurs arcs en une "polyligne", dont les éléments tronçons peuvent être distingués en des objets distincts, mais sous l'héritage de l'objet Rue qui leur est parent.
- Les intersections à niveau et autres lieux où le mouvement d'un objet Rue à l'autre est impossible doivent être identifiés. En pratique, même si des arcs coexistent à un viaduc, ils ne seront pas connexes. Dans la plupart des SIG, les fonctions topologiques de fabrication des réseaux ne respectent pas cette règle.
- Chaque objet Rue est hiérarchisé et suffisamment caractérisé pour qu'on puisse en définir la fonction et effectuer, si nécessaire, la séparation en objets réseaux spécifiques (pour voitures, camions, marche ou autobus).

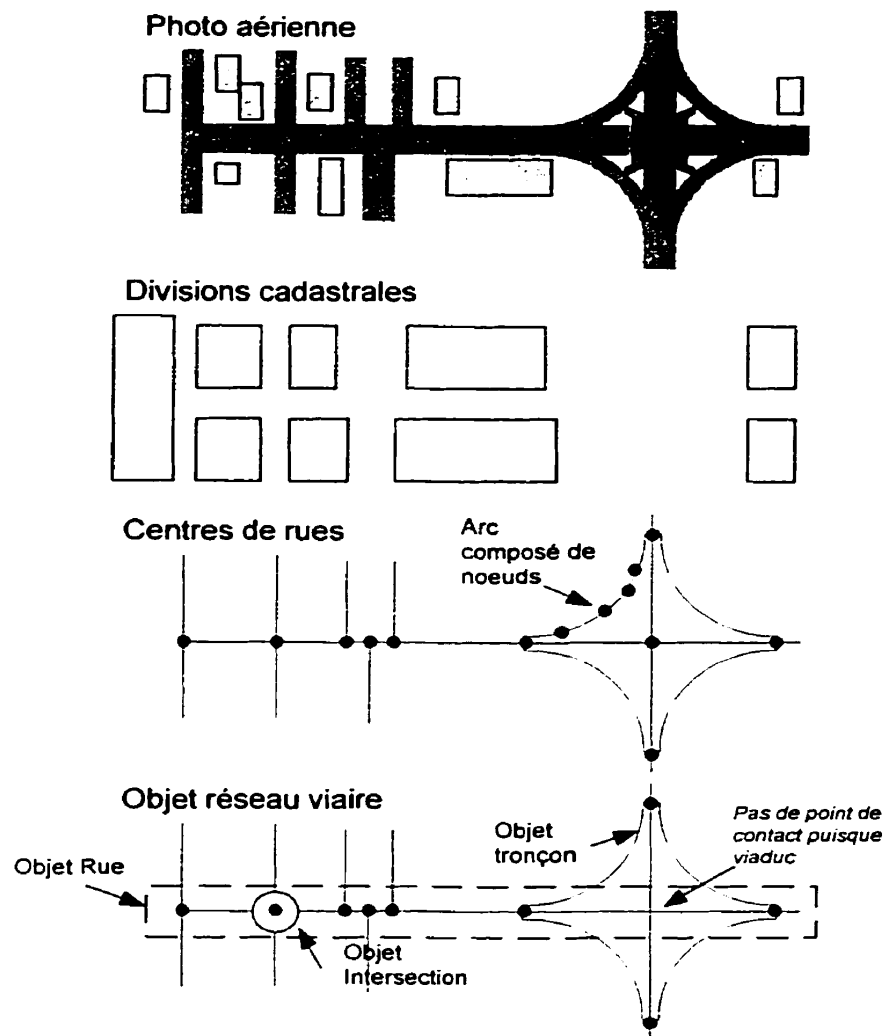


Figure 6.1: De la topologie à l'objet RéseauViaire

- ☐ Les objets Rue, Tronçon et autres objets dérivés tel que Intersection possèdent des propriétés variables dans le temps et dans l'espace.

6.1.4 Hiérarchisation du réseau de voirie

La hiérarchisation du réseau de voirie consiste à associer une classe de service à chaque objet Rue afin de définir ses principales propriétés et sa fonction. Le montage d'une hiérarchie permet entre autres:

- ☐ De traiter séparément certaines classes de rue en lots (héritage de propriétés de la classe);
- ☐ D'omettre certains objets de classe inférieure lors d'opérations de calcul ou autres méthodes;
- ☐ D'instaurer un traitement préférentiel lors des calculs de chemins (en appliquant des pénalités de "correspondance" entre les objets Rue plutôt que des pénalités de virage, une information souvent pénible à acquérir);

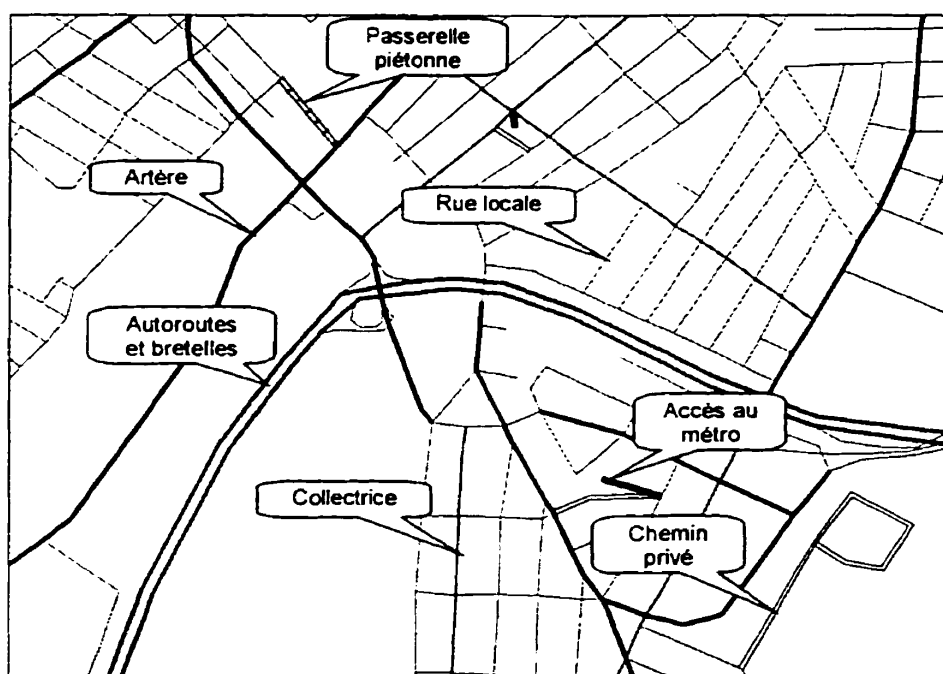


Figure 6.2: Hiérarchisation du réseau de voirie pour fins de transport

- ☐ De fabriquer au besoin des réseaux routiers, piétonniers et opérationnels, par séparation;
- ☐ De faciliter la représentation graphique des réseaux urbains en plusieurs couches cohérentes et connexes.

La Figure 6.2 présente un exemple typique de hiérarchisation pour le cas montréalais urbain. Les objets spécialisés tel que les chemins privés, passerelle pour piétons et couloir d'accès au métro (et aux gares) possèdent des fonctions précises, tel qu'indiqué au Tableau 6.1.

Tableau 6.1: Classes de rue du réseau de voirie montréalais

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

6.1.5 Modèle-objets du réseau de voirie

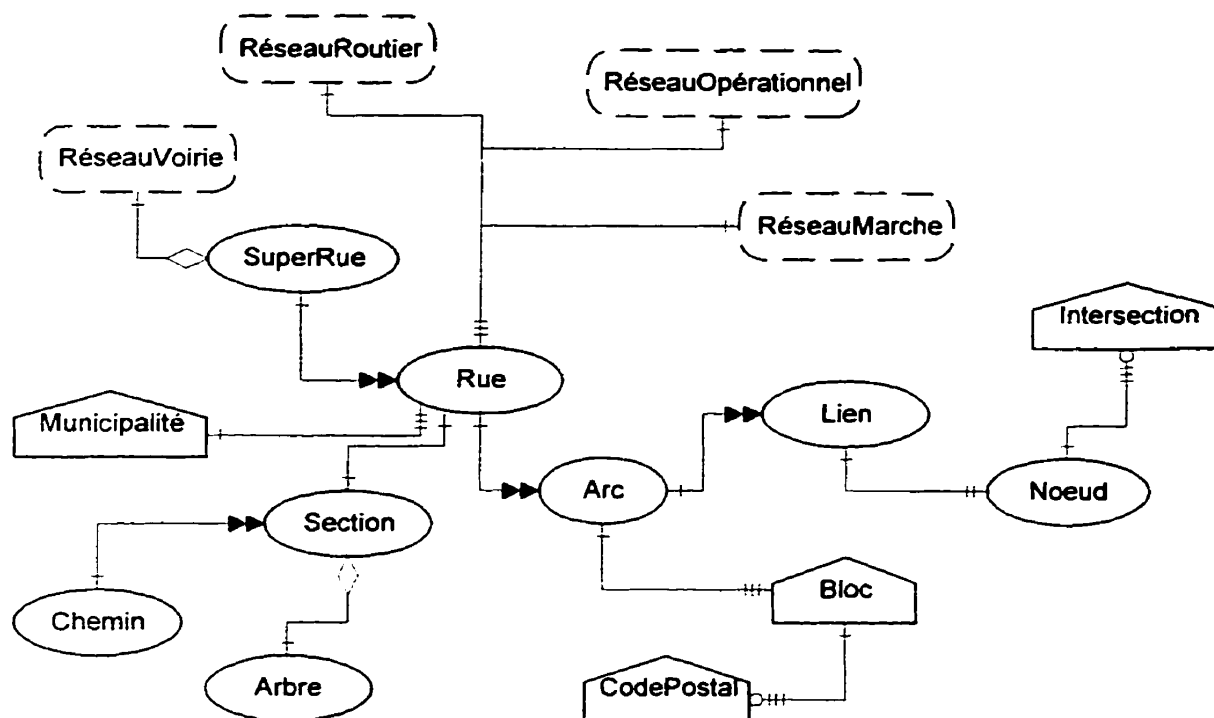


Figure 6.3: Modèle-objets élargi du réseau de voirie

Loin d'être orphelin, le réseau de voirie sert de support aux autres objets du mobilier urbain, comme le démontre le modèle-objets présenté à la Figure 6.3. Quelques objets viennent s'ajouter aux éléments déjà mentionnés. La SuperRue est le regroupement de plusieurs objets Rue possédant la même dénomination ou marquant une continuité physique dans plusieurs municipalités contiguës. On n'a qu'à se référer, à Montréal, à la rue Sherbrooke qui traverse Montréal-Ouest, Montréal, Westmount et Montréal-Est. Les objets Arbre, Section et Chemin sont composés d'arcs de rue. Les objets CodePostal et Bloc sont définis à partir des côtés d'ilot qui bordent les tronçons routiers. Un objet Intersection (qui a plusieurs dénominations) est généré lorsque deux ou plusieurs objets Rue sont mis en contact à un nœud donné.

6.1.6 Propriétés du réseau de voirie

Le réseau de voirie est d'abord et avant tout un graphe formé de nœuds et de liens, et en ce sens, possède des propriétés classiques associées à ce type d'objet. Par définition, tous les nœuds d'un réseau de voirie orienté doivent posséder un degré entrant (*in-degree*) et un degré sortant (*out-degree*) non nuls. En effet, les véhicules doivent pouvoir se rendre à chacun des nœuds et en sortir (évidemment!). Les nœuds respectent l'équation de conservation du flot: $\text{flot entrant} - \text{flot sortant} = 0$. Dans le cas d'un réseau de voirie urbain, certains nœuds sont dits de "géométrie" s'ils ne comportent pas d'objets Intersection où ne définissent pas l'extrémité d'une rue. Ils seront omis dans certaines méthodes afin de simplifier les opérations.

Chaque nœud
du réseau de voirie
doit être accessible
à partir de tous les autres

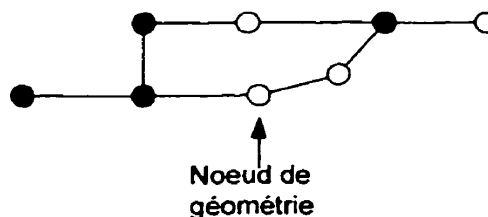
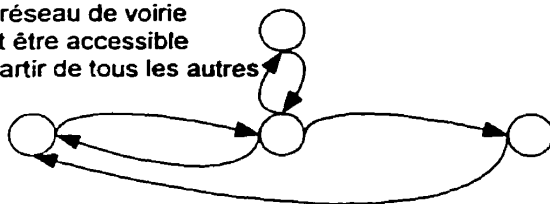


Figure 6.4: Propriétés des nœuds du réseau de voirie

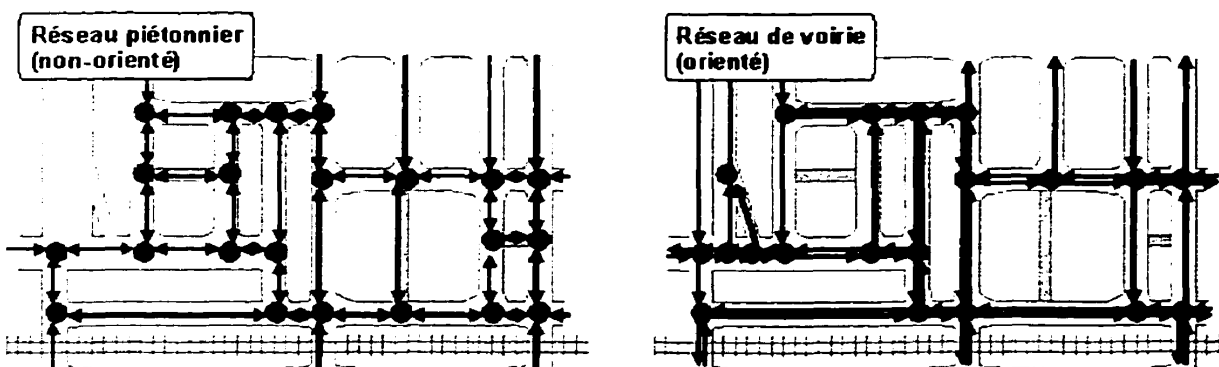


Figure 6.5: Propriétés des liens et des arcs selon la fonction du réseau de voirie

Les arcs d'un réseau de voirie urbain sont orientés dans le cas d'un réseau routier ou opérationnel, et non-orientés dans un réseau de marche (les piétons n'ayant pas à se plier aux règles de sens unique). La théorie "classique" des graphes impose que

certaines nœuds agissent comme sources ou puits afin d'injecter ou de retirer du flot au réseau. Dans le cas d'un réseau de voirie, les flots sont injectés et retirés le long des arcs (entrées de garage, stationnement, etc.) plutôt qu'aux intersections.

Les propriétés de temps de parcours et de distance possèdent des poids différents selon la fonction du réseau. Dans un réseau routier conventionnel, la composante "temps de parcours" prédomine: temps (ou vitesse) à écoulement libre, temps à l'équilibre (en congestion). Dans un réseau opérationnel, les temps et vitesses utilisés seront ceux du véhicule (autobus) en mode opérationnel ou haut le pied. Dans un réseau de marche, la distance est l'élément principal: le piéton possède une vitesse à peu près constante et n'est pas soumis aux règles de congestion (on le suppose!). D'autres propriétés du réseau de voirie sont présentées à l'annexe B.1.

6.2 Le réseau de transport collectif

Le réseau de transport collectif fait partie du système de transport urbain. Son système-objets diffère de celui du réseau de voirie. Cette section vise à initier la démonstration de la possibilité (et du bénéfice) de lier ces deux réseaux afin d'en dériver de nouvelles propriétés.

6.2.1 Définition

Le réseau de transport collectif est un ensemble spatialisé et temporalisé d'objets cinétiques décrivant les circonstances qui permettent à des usagers de transport (demande) de se déplacer à l'aide d'un service établi par un ou plusieurs opérateurs. Concrètement, un réseau de transport collectif peut regrouper plusieurs modes de transport, dont l'autobus, le tramway, le trolleybus, le métro, le train, le taxi et autres.

6.2.2 Modèle-objets: cas montréalais

Le réseau de transport collectif montréalais implique l'autobus, le métro et le train de banlieue. De ces modes, seul l'autobus circule directement sur le réseau de voirie. À

cet effet, et sans minimiser l'importance des autres modes, notre attention se portera ici sur le service de transport collectif par autobus.

Le modèle-objets du réseau de transport collectif par autobus est fondé sur l'unité élémentaire qu'est l'objet LigneArrêt, qui représente l'interface entre le client (l'utilisateur) et le fournisseur de service (opérateur). Une ou plusieurs lignes-arrêts sont liées à l'objet Arrêt situé sur ou à proximité d'un objet Rue du réseau de voirie. La Figure 6.6 présente le modèle-objets du réseau de transport collectif par autobus pour le cas montréalais.

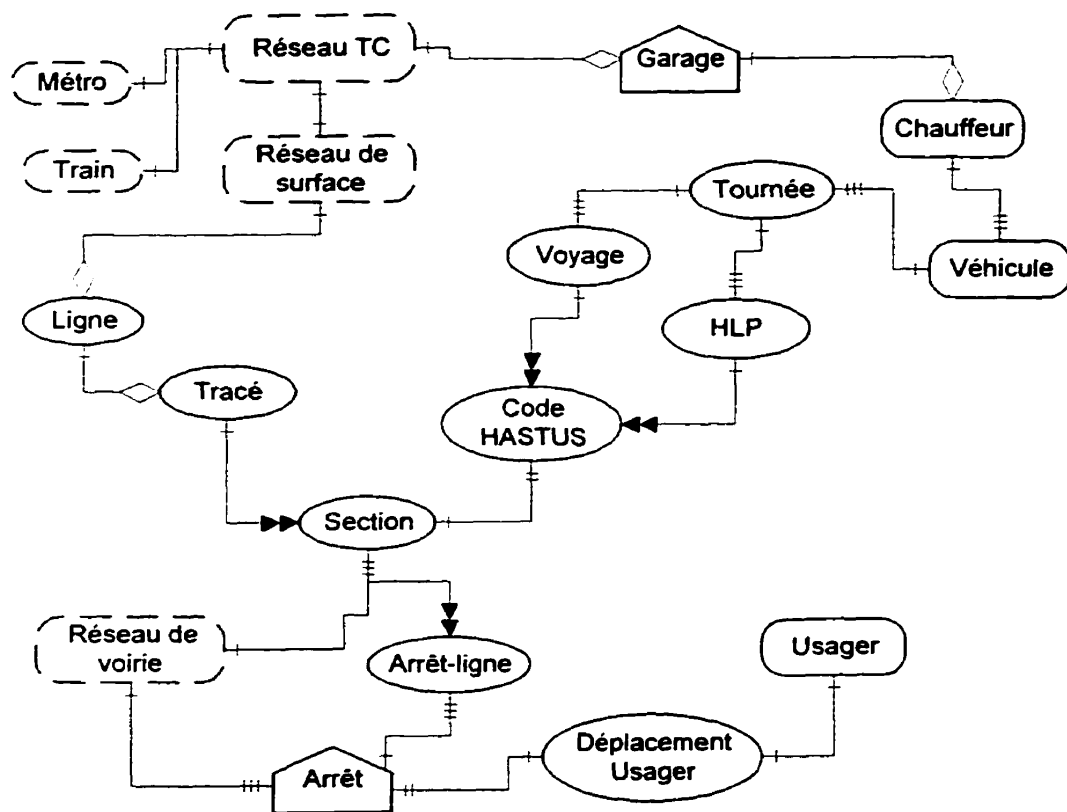


Figure 6.6: Modèle-objets du réseau de transport collectif (cas montréalais)

Il est intéressant de constater la distinction entre ce que l'utilisateur perçoit comme service (les lignes, les arrêts) et ce que l'opérateur gère comme ressources (codes

HASTUS, tournées, voyages). Les principaux objets du schéma sont explicités ci-après (et à la Figure 6.):

- L'objet *Ligne* est une collection de tracés identifiés par une dénomination généralement unique et intéressée, tel un numéro, un nom. Les tracés sont regroupés par direction (usuellement opposées). L'objet *Tracé* est une collection orientée de sections.
- L'objet *Section* est une séquence spatio-temporelle d'objets *Arrêt-Ligne* qui définissent la séquence d'objets *Arrêt* à desservir.
- L'objet *Tournée* est une collection orientée d'objets *Voyage* que doit effectuer un chauffeur avec un (ou plusieurs) véhicules provenant d'un garage.
- L'objet *Voyage* est constitué d'une séquence d'objets *Code HASTUS*, qui sont des points de contrôle situés sur et hors du réseau. L'objet *HLP* (haut le pied) est de même classe que l'objet voyage, sauf qu'il représente une activité sans passager (sortie du garage, par exemple). Les points de contrôles bornent les sections à parcourir (début/fin) et établissent les heures de passages attendues par l'opérateur. La Figure 6. décrit le système-objets de la tournée de transport collectif.

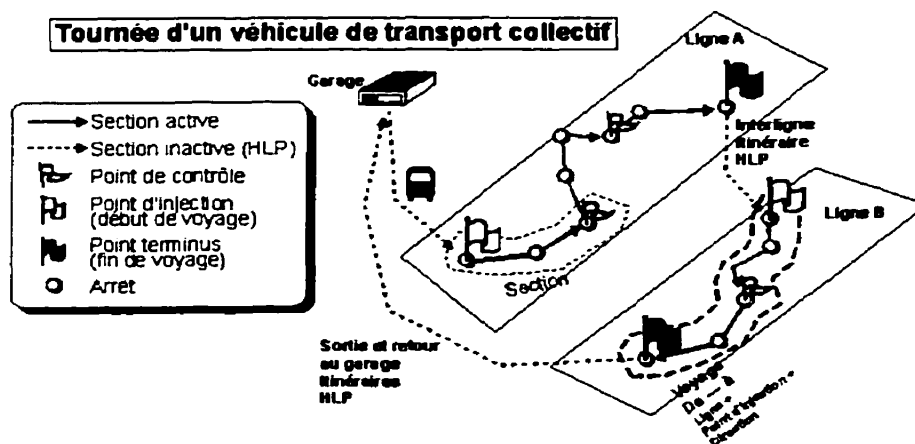


Figure 6.7: Système-objets de la tournée de transport collectif

6.2.3 Niveaux de résolution

Le modèle-objets précédent est présenté à un niveau de résolution particulier: celui de l'opération (mise en service). Par le passé, à la lumière de l'utilisation de l'approche totalement désagrégée, le niveau de résolution de la modélisation du réseau de transport collectif s'est raffiné pour accompagner l'évolution des préoccupations de planification (voir Figure 6.8).

Le point de contrôle (code HASTUS dans le cas montréalais) est le niveau de modélisation le moins spatialement défini. Tel qu'expliqué précédemment, il est destiné à l'assignation des chauffeurs et à la mise en place du service par le biais des heures de passage (définition des voyages). Aucune localisation spatiale ne lui est associée à priori, ce n'est que par la modélisation MADITUC que des coordonnées leur ont été attribuées.

Le nœud MADITUC est plus fin, il est destiné à l'application du modèle d'analyse totalement désagrégée des itinéraires de transport collectif provenant des grandes enquêtes origine-destination. En ce sens, ce niveau de résolution reflète une compréhension suffisante des lignes du réseau visant à s'assurer de leur connexité (par les nœuds de correspondance) et de leur opérabilité (en incluant tous les codes HASTUS). Certains nœuds servent également à la géométrie, afin de clarifier la représentation spatiale du réseau.

L'utilisation du système d'information géographique pour la gestion des arrêts (SIGGAR) à la STCUM permet l'identification de chaque arrêt du réseau. Le niveau de résolution est alors à son maximum en ce qui concerne l'interface entre le service et les usagers. Cependant, ce type de définition n'offre pas de connexité explicite entre les lignes. Par exemple, à une intersection donnée, quatre arrêts sont localisés. Ces arrêts sont distincts et séparés, et il faut s'en remettre à un niveau de résolution supérieur (nœud MADITUC) pour assurer les correspondances. Dans une approche orientée-objet, cette fonction est prise en charge par la relation entre les objets.

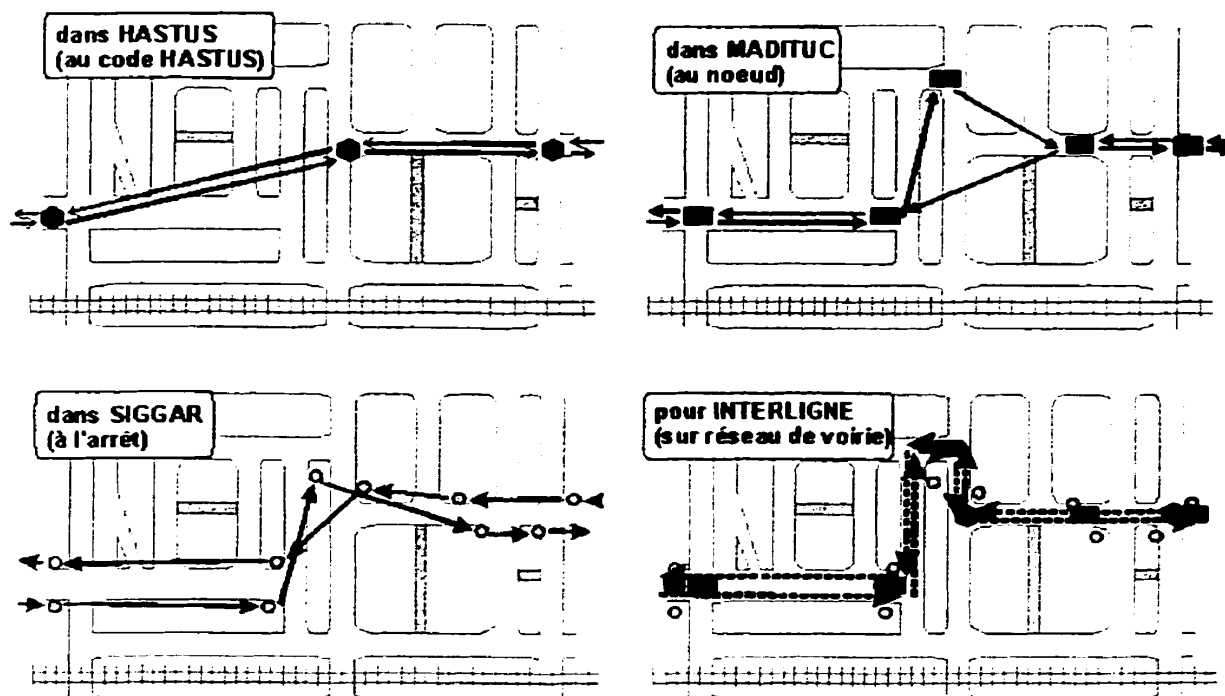


Figure 6.8: Quelques niveaux de résolution disponibles pour le réseau de transport collectif montréalais

Un niveau de résolution plus fin (employé dans le système INTERLIGNE) offre une transposition du réseau de transport collectif directement sur le réseau de voirie. Le système regroupe les trois classes d'objets précédentes (points de contrôle, nœuds et arrêts) et décrit le parcours des véhicules sur le réseau viaire (rues empruntées). Cette définition permet de tirer profit de quelques méthodes associées au réseau de voirie, tel que le calcul de chemin et la production de gauche-droite.

6.2.4 Réseau à géométrie variable

Les réseaux de transport collectif sont dits "à géométrie variable", car leur configuration change en fonction du temps. En effet, au cours de la journée, certaines lignes entrent en opération, d'autres voient leur tracé modifié (sans parler des horaires). Il importe que le modèle orienté-objet associé au réseau de transport collectif considère cet état de fait en définissant le cadre spatio-temporel de chaque objet.

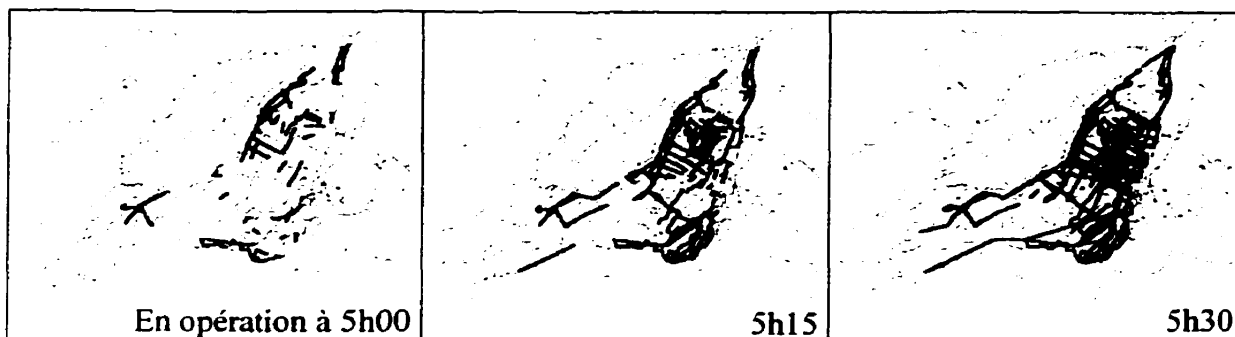


Figure 6.9: Géométrie variable du réseau TC: la naissance quotidienne du réseau montréalais

6.2.5 La chronomatique et la table de temps de marche

La géomatique est le domaine de l'information à caractère géographique dans un système donné. La chronomatique représente l'intégration des aspects temporels (temps, heures, états) dans le système informationnel. Dans un réseau de transport collectif, la chronomatique définit l'opération du réseau en ajoutant aux données géométriques (lignes, arrêts) des informations à caractère temporel tel que les temps de passage aux arrêts.

Tableau 6.2: Extrait de la table des temps de marche (STCUM)

Col1	Col2	Col3	Col4+
10	N	1	0000 002007M150E149R126R118R111R038H052
10	N	1	0341 010020070541054605490553055705580603
10	N	1	0369 020020070609061406170621062506260631
10	N	1	0397 010020070637064206450649065306540659
10	N	1	0425 020020070705071007130718072207230729
...			

La table des temps de marche est un fichier de type ASCII énonçant les heures de passages aux arrêts (heures planifiées). Les trois premières colonnes de ce fichier (voir le Tableau 6.2) indiquent la ligne référencée (ligne, direction, tracé). La colonne 4 contient le numéro du voyage. Le voyage "0000" est un artifice géométrique décrivant la liste des codes HASTUS empruntés par le véhicule. Les lignes suivantes décrivent les heures de passage à ces codes HASTUS (chaque heure étant vis-à-vis le code correspondant).

6.2.6 Le diagramme espace-temps

La combinaison des dimensions géomatique et chronomatique amène la création d'outils tel que le diagramme espace-temps, qui permet, en un seul coup d'œil, de visualiser les caractéristiques d'opération d'une ligne ou d'une section.

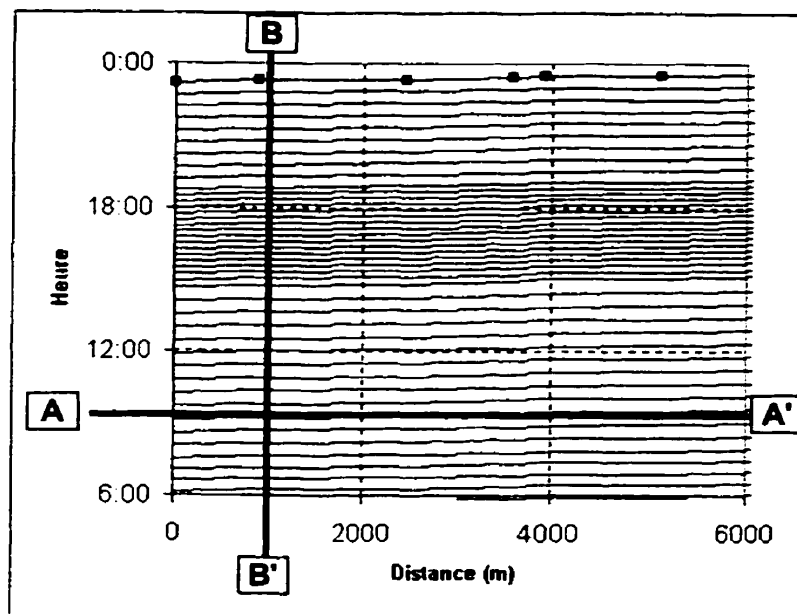


Figure 6.10: Diagramme espace-temps de la ligne 10, direction nord (jour de semaine)

La Figure 6.10 et la Figure 6.11 présentent les diagrammes espace-temps de deux lignes de la STCUM, "10 De Lorimier" et "67 St-Michel". Chaque courbe représente un voyage (parcours d'un véhicule). La courbe supérieure (dernier voyage) indique les points de contrôle HASTUS. Les deux graphes sont représentés aux mêmes échelles pour fins de comparaison.

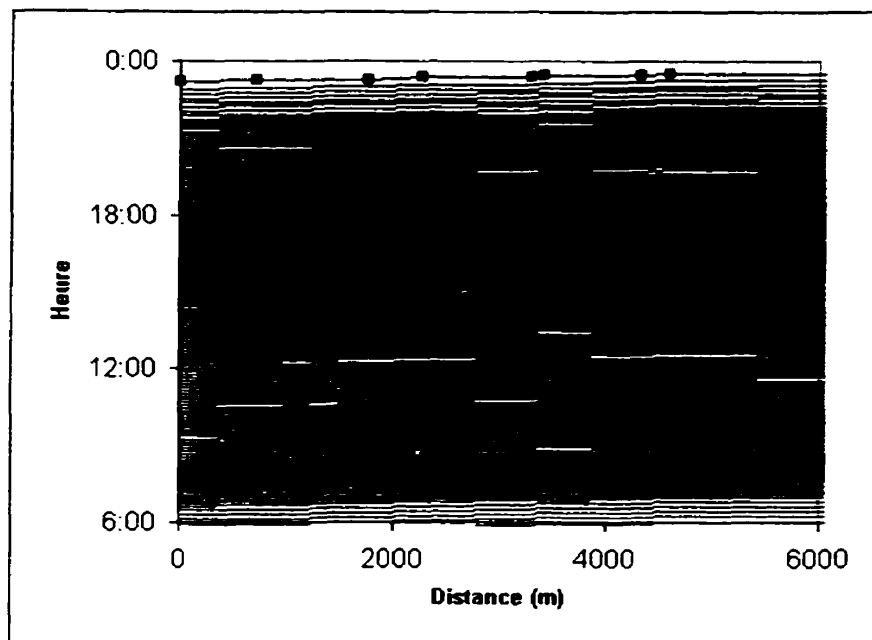


Figure 6.11: Diagramme espace-temps de la ligne 67, direction nord (jour de semaine)

Le diagramme de la ligne 67 est beaucoup plus dense, ce qui démontre son niveau de service élevé. Une coupe horizontale (A-A') nous donne le nombre de véhicules en service pour une heure et une direction donnée. Une coupe verticale (B-B') nous donne le nombre de passages de véhicules en un point durant une période déterminée. L'inverse de cette mesure est la fréquence (niveau de service). La pente de la courbe donne la vitesse commerciale du véhicule.

6.3 Méthodes associées aux réseaux viaire et collectif

Cette section décrit quelques méthodes associées aux réseaux de transport viaire et collectif. L'accent est porté sur l'utilisation de l'approche orientée-objet dans la mise en action de ces opérateurs.

6.3.1 Calcul d'arbre sur un réseau de voirie

Dans la théorie des graphes, un arbre est un graphe connexe qui ne contient aucun cycle. En termes orientés-objet, un arbre est une collection d'objets cinétiques

permettant d'accéder à tous les nœuds d'un réseau à partir d'un nœud semence, et ce en empruntant les chemins optimaux. La notion d'optimum fait ici référence à une mesure déterminée en vertu des propriétés des objets cinétiques utilisés: distance, temps en écoulement libre, temps en congestion, etc. On parlera fréquemment d'arbre des "chemins les plus courts", c'est-à-dire plus courts en termes de temps de parcours.

Il existe plusieurs algorithmes permettant de déterminer l'arbre des chemins les plus courts (*shortest path tree*) à partir d'un point (EVANS et MINIEKA, 1992):

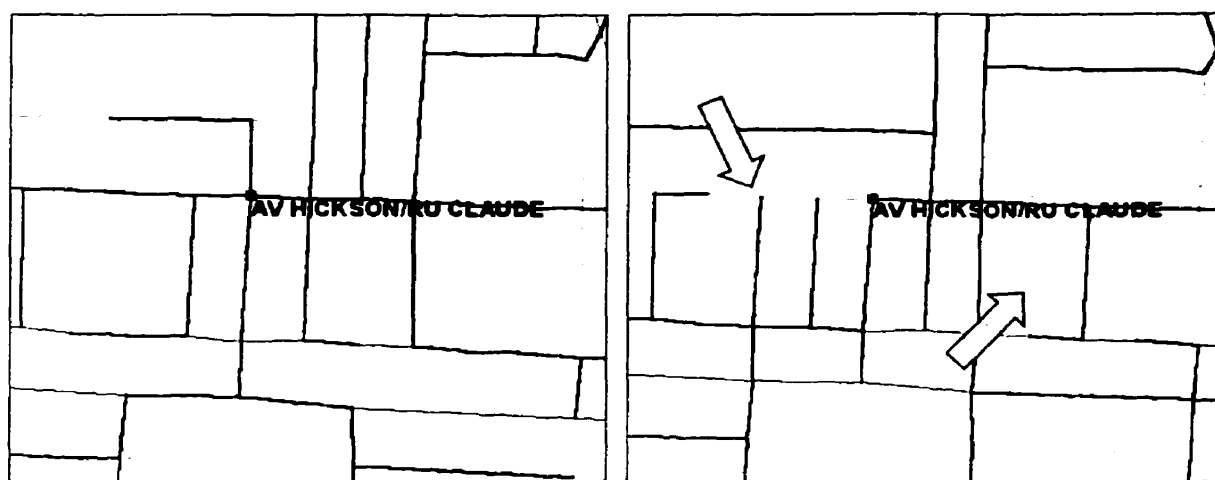
- L'algorithme de Dijkstra permet de déterminer l'arbre des chemins les plus courts à partir d'un nœud donné. Les longueurs ne peuvent y être négatives.
- L'algorithme de Ford complète celui de Dijkstra en acceptant les liens négatifs sous certaines conditions (aucun cycle négatif).
- Les algorithmes de Floyd et Dantzig utilisent une notation matricielle pour déterminer tous les arbres des chemins les plus courts du réseau.

Tableau 6.3: Transposition objet de l'algorithme de Dijkstra

Opération	Méthode/Code
Sélectionner un nœud (A)	Set nod=NoeudDepart
Sélectionner les liens sortant d'un nœud	Set lls = nod.LiensLibresSortant
Calculer les distances et marquer le nœud à distance minimale (B)	Set li = lls.DistMin Set nod2=li.AutreNoeud
Retirer (A) en le marquant comme permanent	Nods.remove nod
Ajouter le lien à distance minimale à l'arbre et stocker le lien comme prédécesseur	Arbre.add li Set nod2.Predecesseur=li
Recommencer les opérations avec le nœud (B)	Set nod=nod2

Le nombre d'opérations mathématiques nécessaires à l'application de ces algorithmes varie de $3m(m-1)/2$ pour Dijkstra (où m est le nombre de nœuds) à $O(m^3)$ pour Floyd. Nous examinerons ici la transposition orientée-objet de l'algorithme de Dijkstra, qui s'avère le plus intuitif. Le Tableau 6.3 indique, en parallèle, les opérations effectuées lors de l'application de l'algorithme et les méthodes correspondantes appliquées au modèle-objets du réseau (voir également la section A.3.4).

L'intérêt de l'utilisation d'une approche orientée-objet réside dans la flexibilité apportée par l'utilisation de méthodes distinctes pour chaque opération de l'algorithme. Par exemple, le processus de sélection de la méthode "LiensLibresSortant" peut être rapidement modifié pour convenir aux contraintes du réseau. Dans un réseau de marche, tous les liens sont non-orientés. La méthode fournira alors une collection constituée de tous les liens attachés au nœud sélectionné, en autant que ces liens soient compatibles à la fonction "marche" (non autoroutiers). Toutefois, dans un réseau routier, les liens sont orientés. Plutôt que de redéfinir le réseau (comme dans les applications classiques), il suffit de modifier la méthode pour qu'elle tienne compte de l'orientation de chaque objet lien.



Arbre sur réseau de marche

Arbre sur réseau routier

Figure 6.12: Calcul d'arbre du chemin le plus court sur réseau de voirie

La Figure 6.12 présente deux arbres calculés sur un même réseau de voirie, à partir de la même intersection. Le premier arbre est calculé sur réseau de marche alors que le second utilise le réseau routier orienté. Des différences notables apparaissent entre les deux objets; ceci étant dû à la présence de nombreux sens uniques dans cette partie du réseau de voirie. L'annexe B.2 montre la capacité de l'approche orientée-objet à gérer le problème de la variabilité des temps de parcours.

6.3.2 Le calcul de chemin

Le chemin entre deux points sur un réseau nécessite habituellement le calcul de l'arbre des chemins les plus courts à partir du nœud d'origine. Le chemin le plus court est alors tiré de cet arbre, par une énumération à rebours des prédécesseurs du nœud de destination. Dans l'approche orientée-objet, le calcul de chemin est une application particulière de la méthode de calcul d'arbre. Tout comme l'objet Arbre, l'objet Chemin est une collection d'objets liens (cinétiques). En plus d'une "description" graphique, sur une carte, à l'aide d'un système d'information géographique, la collection peut être exprimée, dans le contexte urbain, comme une liste de rues à emprunter. Cette liste est appelée "gauche-droite" dans le milieu du transport collectif; elle permet à un chauffeur de connaître le chemin à parcourir lors de ses trajets routiers. La Figure 6.13 décrit la fabrication d'un "gauche-droite" à partir d'un objet Chemin. L'objet Chemin, d'abord vu comme une collection d'objets Lien, est transformé en une collection d'objets Rue par la relation entre l'objet Lien et l'objet Rue.

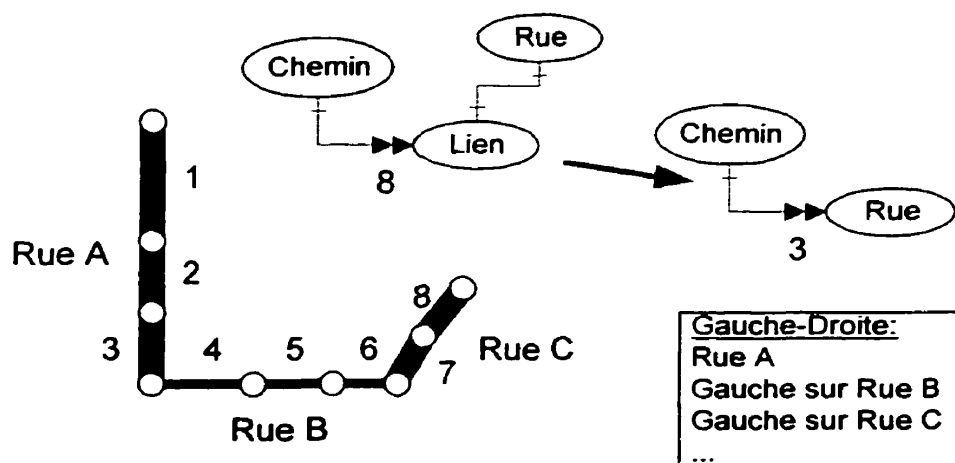


Figure 6.13: Fabrication d'un "gauche-droite" à partir d'un objet Chemin

6.3.3 Problèmes du commis-voyageur et du postier chinois

Le montage d'un réseau de transport en modèle orienté-objet peut contribuer à la mise en forme d'autres problèmes communs de fabrication de tournées (parcours imposé de tous les nœuds ou tous les liens d'un réseau).

Le problème du commis voyageur (*TSP, travelling salesman problem*) consiste à parcourir un certain nombre de nœuds d'un réseau en un minimum de distance (temps, effort). Songeons, par exemple, à des itinéraires de cueillette et de livraison de colis, à l'attribution de services à domicile, au transport des personnes handicapées (transport adapté) et autres problèmes nécessitant la desserte, ordonnée ou non, d'un groupe de destinations.

Le problème du postier chinois (*CPP, chinese postman problem*) demande à parcourir un certain nombre de liens d'un réseau en minimisant les distances et/ou le temps (coûts associés). Le balayage et le déneigement des rues, la cueillette des ordures et la livraison postale domiciliaire sont autant de situations concernées par cette problématique.

Ces deux problèmes peuvent être résolus à l'aide d'heuristiques qui nécessitent une séquence de manipulation sur les éléments topologiques du réseau (sélection, construction, ajout, mesure). L'approche objet peut faciliter ces opérations manipulatoires d'un point de vue programmatique (facilité de transposition du code), mais également lors de l'imposition de contraintes aux objets (Lien, Nœud) lorsque les problèmes sont à capacité (ajout d'une capacité aux véhicules qui circulent sur le réseau, pensons au déneigement).

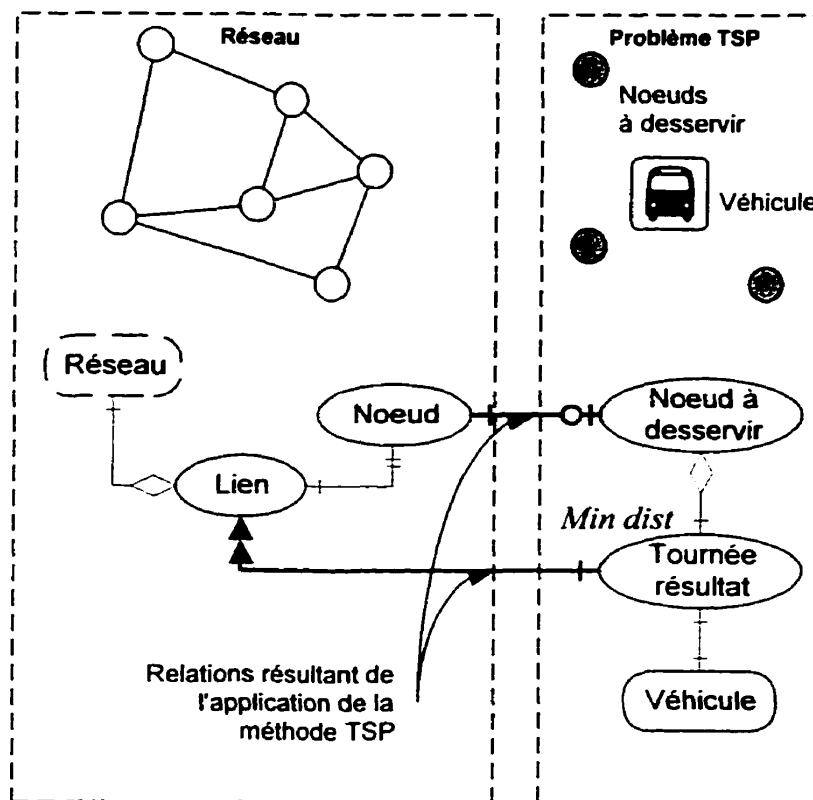


Figure 6.14: Transposition objet du problème du commis-voyageur

6.3.4 Fusion de la table des temps de marche au réseau de voirie

Les paragraphes précédents font état de méthodes appliquées au réseau viaire (objet système) et à ses composantes. La présente section décrit une méthode appliquée simultanément à deux objets système: la fusion de la table des temps de marche du réseau de transport collectif au réseau viaire.

La table des temps de marche représente pour l'opérateur de transport collectif une image fidèle des caractéristiques de son opération, notamment en ce qui concerne les vitesses commerciales et la géométrie de son réseau. Les informations qui se trouvent dans cette table font état de plusieurs années d'utilisation du réseau viaire par les autobus. C'est à cet effet que la fusion entre les deux entités devient intéressante: ne pourraient-on pas ajouter de nouvelles propriétés aux objets du réseau de voirie à

partir d'une transposition des propriétés de réseau de transport collectif? Il appert que oui.

La Figure 6.15 schématise cette opération de superposition. Dans un premier temps (A), les voyages du réseau de transport collectif, parties intégrantes des lignes, sont définis à l'aide de points de contrôle approximativement localisés dans l'espace. Les temps de passage sont donnés à chaque point de contrôle, ce qui permet de quantifier une vitesse constante entre chaque paire de point (B) (en utilisant une distance approximative).

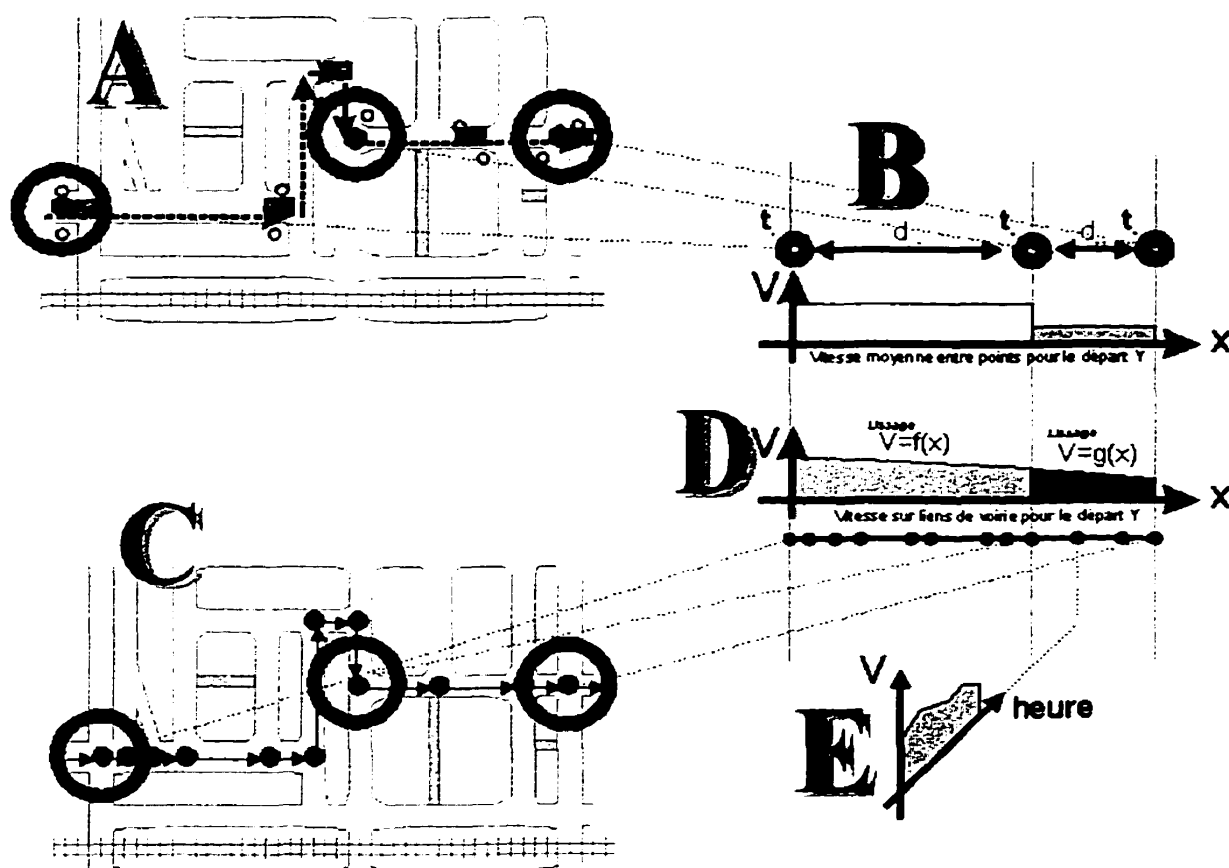


Figure 6.15: Transfert de propriétés entre le réseau de transport collectif et le réseau de voirie

Les itinéraires parcourus par les véhicules entre chaque paire de points de contrôle sont déterminés par méthode de calculs de chemins ou directement déterminés par les

plans de ligne, les "gauche-droite", et l'expérience déclarée (C). Les vitesses constantes sont alors ramenées à une échelle mieux définie, réévaluée et lissées en fonction de la distance parcourue, ce qui permet de caractériser les liens de voirie qui sont parcourus (D). Le caractère discret de chaque voyage et leur répartition au cours d'une journée (24 heures) ajoute une troisième dimension au problème. En effet, la vitesse moyenne instantanée en un point varie en fonction du temps. Par exemple, un lien situé au centre-ville de l'agglomération risque d'être sous congestion en période de pointe et libre la nuit.

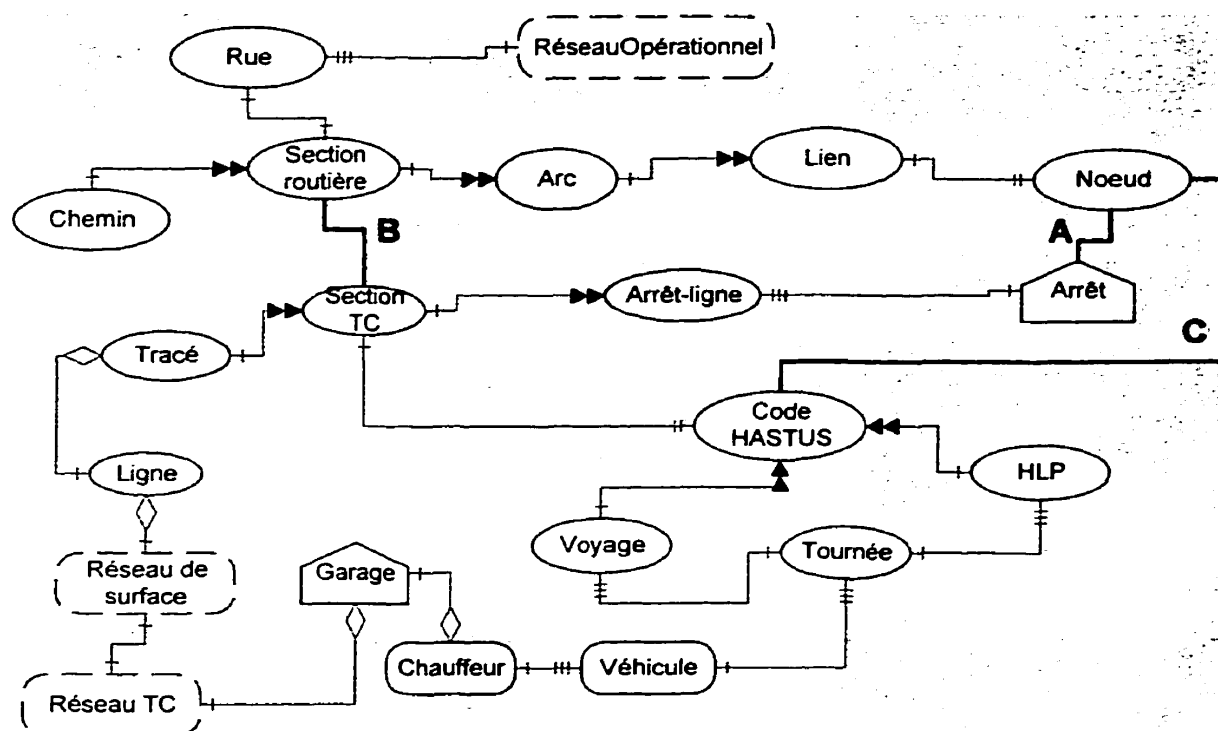


Figure 6.16: Modèle-objets associé au transfert de propriétés

La superposition adéquate des deux réseaux nécessite la création implicite de relations entre les modèles-objets des deux réseaux (voir Figure 6.16). Le lien (A) correspond à la correspondance physique entre un arrêt de transport collectif et un nœud du réseau de voirie. Cette correspondance de proximité est suffisante à l'analyse. Le lien (B) s'obtient par la superposition implicite de la section routière (séquence d'arcs et de liens) et de la section TC en termes de séquence d'arrêts. La section TC est

également définie en termes de points de contrôle. La double définition est utilisée pour déterminer les temps de parcours de la section routière entre les nœuds d'extrémités (relation C), ce qui permet de caractériser pleinement les collections d'arcs et de liens.

6.4 L'approche floue en transport

L'application de modèles de transport de haut niveau tel que le calcul de chemins, les modèles d'affectation et les modèles de simulation requièrent une grande quantité de données. Il est rare (voire impossible) de disposer de tous les éléments nécessaires, validés et mis à jour. Par exemple, lors de la constitution d'un système d'information sur le réseau routier, les données de géométrie, de connexité et autres caractéristiques opérationnelles peuvent s'avérer manquantes ou tout simplement désuètes. La plupart de ces données ne pourraient être obtenues qu'après d'onéreux investissements. Et ensuite, si certaines propriétés s'ajoutaient au modèle en cours de route? Faudrait-il recommencer la cueillette? Les modèles actuels tolèrent peu le manque de données. On procéderait éventuellement à une *simplification* afin de remettre toutes les informations au même niveau de résolution.

6.4.1 Présentation

Il est possible de tirer profit de l'information existante, modélisée en objets, pour obtenir graduellement les données supplémentaires sans ébranler la structure de modélisation établie ni remettre en question les acquis. Cette approche peut être qualifiée de *floue*, car elle repose sur la clarification, en cours de route, des éléments nébuleux du système informationnel. Elle est aussi appelée *floue* à cause de son caractère évolutif: le modèle-objets demeure relativement stable pendant que les propriétés et méthodes s'éclaircissent dans le temps, sans réellement atteindre un point focal optimal, sans possibilité de développement.

Dans un contexte orienté-objet, l'approche floue prend la forme d'un processus itératif en deux temps:

- Évolution des objets dans le modèle-objets, y compris la création de nouveaux objets, si nécessaire;
- Évolution des relations entre les objets, ce qui entraîne un enrichissement des propriétés et des méthodes.

6.4.2 Exemple d'utilisation de l'approche floue

Prenons l'exemple d'un système d'information aux usagers de transport en commun. Typiquement, un client du transport collectif désire se déplacer d'un endroit à un autre sur le territoire et s'attend à ce que le système lui transmette l'information nécessaire à son déplacement. Du point de vue de l'opérateur, le client devra se déplacer entre deux arrêts (et/ou stations) de son réseau. Le système-objets et le modèle-objets correspondants sont présentés à la Figure 6.. Le réseau TC possède ses propres propriétés et méthodes, tel que décrit à la section 6.2.

En réponse à cette modélisation préliminaire, l'opérateur s'assure de disposer de bases de données décrivant les lignes et les arrêts de son réseau (géométrie), ce qui permet de soumettre cette information à un calculateur primaire qui calcule le chemin en termes de lignes à emprunter pour aller de l'arrêt A à l'arrêt B. La première phase du système est complétée.

Advenant le cas où les usagers désirent obtenir l'horaire du service, l'opérateur peut réutiliser le modèle-objets primaire et y ajouter des composantes temporelles tel que les heures de passage aux arrêts, les périodes de service des lignes, les temps de parcours, etc. Cette information, non disponible au départ, vient se greffer au système en tant que nouveaux objets créés pour l'occasion. La seconde phase du système est complétée, et les nouvelles données acquises à chaque jour auprès de l'opérateur et des usagers enrichissent la base de données.

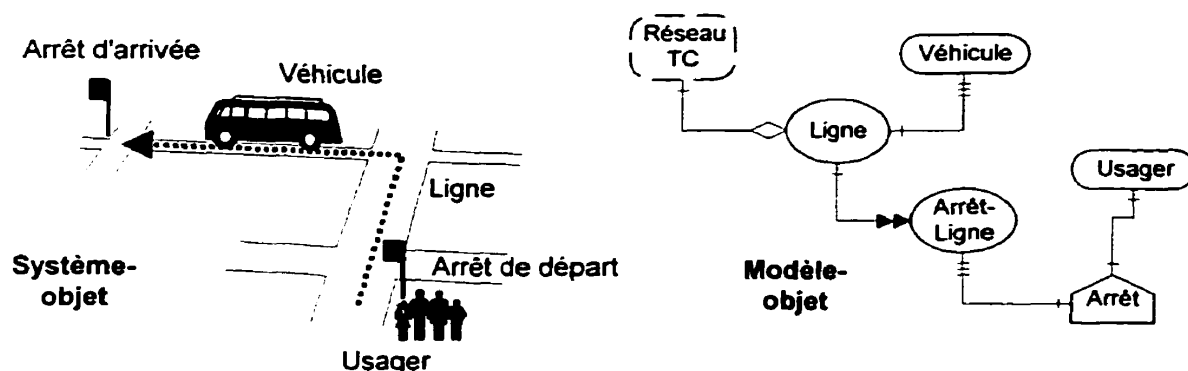


Figure 6.17: Système-objets et modèle-objets de l'opérateur dans le cadre du système informationnel

Après quelque temps, les usagers désirent obtenir le chemin qui leur permettra d'atteindre l'arrêt le plus près à partir de leur domicile. Ce genre d'information nécessite la connaissance du réseau piétonnier urbain, d'où la création d'un nouvel objet, le réseau de voirie piétonnier. Petit problème: le modèle initial est basé sur un réseau de transport collectif et ne peut intégrer un réseau piétonnier, qui lui est doté de caractéristiques différentes.

Pour parfaire l'information à l'utilisateur, le transporteur doit adjoindre à son réseau opérationnel un deuxième réseau, celui-là dit piétonnier. Le système et le modèle-objets sont présentés à la Figure 6.18. Ce réseau possède les propriétés et méthodes décrits à la section 6.1.

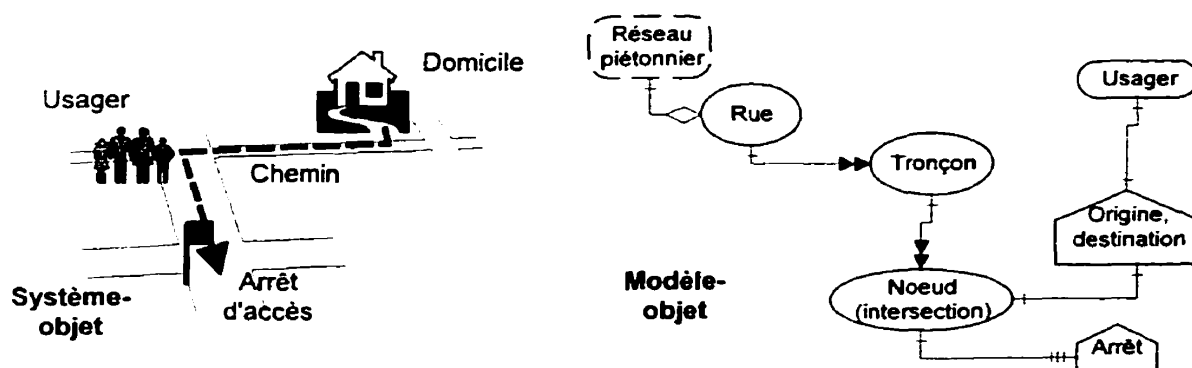


Figure 6.18: Système et modèle-objets du réseau piétonnier de l'utilisateur de transport collectif

L'élément commun des deux modèles-objets est l'arrêt, interface entre l'opérateur et l'utilisateur. En guise de première opération, les arrêts sont localisés sur le réseau routier afin d'être accessibles aux piétons. Le système est alors à peu près fonctionnel: un calculateur détermine en premier lieu l'accès à pied aux arrêts les plus près de l'origine et de la destination, puis une seconde méthode calcule le trajet sur le réseau de transport collectif. Le système a maintenant atteint sa maturité, et attend toute évolution ultérieure. Les usagers enrichissent le système en indiquant aux préposés à l'information la présence de nouvelles rues, l'opérateur renchérit avec l'intégration d'autres bases de données d'entreprises (listes téléphoniques, photos, images, cartes).

Par cet exemple, trois leçons sont tirées de l'utilisation de l'approche floue:

- Il est possible de développer un système informationnel sans pour autant posséder tous les éléments de données à la base, et sans devoir s'approprier l'ensemble de l'information avant de débiter une quelconque application;
- L'utilisation du système amènera de lui-même l'inclusion de nouvelles données, dont la forme et l'utilisation n'auront pas nécessairement été prévues au départ;
- Le système informationnel développé à l'aide de l'approche floue sur une structure orientée-objet maintient un caractère évolutif et adaptatif face à l'afflux éventuel de nouvelles données et de nouveaux objets.

6.4.3 Propriétés, méthodes et objets dérivés

Une des premières manifestations de l'approche floue est la mise à jour des propriétés existantes, et, *in extenso*, la création de nouvelles propriétés. Lors de l'utilisation d'un réseau de voirie par des planificateurs et des préposés à l'information, on aura tôt fait de corriger certaines erreurs de dénomination, de géométrie, etc. Des méthodes appliquées à des objets tel que le réseau de transport collectif peuvent laisser entrevoir des problèmes de connexion, des horaires invalides, etc. Ces informations sont d'abord endogènes (suggérées par l'utilisation du système), puis exogènes (par l'apport et la comparaison avec des données externes).

L'approche floue apporte également la création de nouvelles méthodes. Le fait de pallier des données manquantes peut supputer l'information elle-même et amener la création de méthodes évolutives qui, prises dans leur contexte, peuvent s'avérer supérieures aux données initialement présentes.

Par exemple, dans la méthodologie totalement désagrégée, trois types d'itinéraires de transport collectif (utilisation de lignes) sont utilisés, chacun marquant une imputation basée sur l'autre:

- L'itinéraire déclaré est celui que le répondant a mentionné lors de l'enquête. Cette déclaration est quelquefois erronée ou incomplète;
- L'itinéraire décrit est un traitement de l'itinéraire déclaré à l'aide d'une méthode de validation appliquée à l'objet Réseau. L'information déclarée y est complétée et corrigée, le cas échéant, et la méthode ItinéraireDécrit est créée.
- L'itinéraire simulé, enfin, provient d'une nouvelle méthode qui fabrique l'itinéraire le plus probable en se basant sur "l'expérience" du système, par l'analyse des itinéraires déclarés et décrits.

Lors de l'utilisation d'un système informationnel orienté-objet, il arrive que certains éléments soient manquants ou non pris en compte. L'approche floue est alors utilisée pour adjoindre de nouveaux objets au modèle existant. Par exemple, la modélisation d'un réseau piétonnier à partir d'un réseau de voirie pour voitures ne prend pas en compte, au premier abord, les passerelles piétonnières et les édicules d'accès au métro. Ces objets doivent être ajoutés au système par la création de nouvelles classes possédant des propriétés et méthodes distinctes de celles des classes existantes.

Ceci clôt les expérimentations touchant les composantes de l'offre. En contrepartie, le chapitre suivant traite des propriétés et méthodes liées à la demande de transport.

CHAPITRE 7: PROPRIÉTÉS ET MÉTHODES LIÉES À LA DEMANDE DE TRANSPORT

La demande de transport est une composante ambivalente du système de transport urbain. Elle met en jeu des personnes, des entreprises et des marchandises dans une certaine concurrence destinée à s'approprier un marché (offre) composée d'infrastructures et de services de transport urbain. La modélisation du comportement des personnes à l'intérieur de ce système représente un défi conceptuel important, même lorsque des enquêtes origine-destination à grande échelle sont disponibles. Le cas échéant, l'opération risque d'être limitée par le choix du système de bases de données destiné à la mise en forme des données.

Ce chapitre dresse son argumentaire sur les capacités de l'approche orientée-objet, couplée à l'approche totalement désagrégée, à mettre en forme les données des grandes enquêtes origine-destination. Les ensembles de données examinés touchent principalement la grande région de Montréal (enquêtes 1987 et 1993). Le but premier de l'abstraction de ces données sous forme d'objets est l'application de méthodes de visualisation. Ensuite, le traitement des données spatialisées met en relief certaines difficultés liées aux opérations de regroupement spatial. En sus, plusieurs autres méthodes sont applicables en cascade aux objets de demande. Enfin, une des forces de l'approche orientée-objet en transport est son habileté à créer de nouveaux objets pouvant être remis en contexte dans plusieurs horizons de planification.

Les expérimentations sous-jacentes à ce chapitre ont conduit à la création du logiciel MADAME, le "module d'analyse désagrégée des attributs et méthodes de données d'enquêtes". MADAME tire profit des facilités de programmation Visual Basic et du montage de classes d'objets de transport portant sur la demande, ce qui permet de fabriquer rapidement des petits rapports sur des données d'enquêtes origine-destination. Ces rapports sont générés à partir des méthodes présentées dans ce chapitre. MADAME est décrit à l'Annexe D. .

7.1 La demande de transport

En guise d'avant-propos au traitement des données d'enquêtes origine-destination, cette sous-section décrit sommairement quelques grandes composantes relatives à la demande urbaine de transport.

7.1.1 Définition

Dans le contexte orienté-objet, la demande de transport regroupe tous les éléments qui permettent d'expliquer, de près ou de loin, les comportements des usagers de transport en ce qui concerne leurs habitudes de déplacements, mais également tout phénomène associé, tel que leur lieu de résidence, leur lieu de travail, l'utilisation des infrastructures, les tendances démographiques, etc. En ce sens, toute information géoréférencée sur les personnes, les marchandises et les éléments territoriaux peut être retenue comme élément explicatif de la demande. On retrouve par exemple les données de recensement, les données de motorisation, les données d'enquêtes origine-destination et les inventaires (voir section 3.1).

7.1.2 Obtention des objets de la demande à l'aide d'une enquête origine-destination

Une enquête origine-destination téléphonique de l'envergure de celles tenues dans la grande région de Montréal (plus de 50000 ménages) permet d'obtenir une caractérisation de la demande suffisamment fine pour les fins d'analyse de type orientée-objet. Cependant, la tenue de l'enquête nécessite une attention conceptuelle particulière. En sus des considérations mentionnées à la section 3.1.2 sur les aspects techniques sur le terrain, les nouvelles tendances tendent à démontrer l'importance d'une intégration efficace des quatre éléments suivants dans la tenue d'une enquête:

- Un **questionneur intelligent** doit faire interface entre l'interviewer et la personne interrogée. Chaque information recueillie doit être remise dans son contexte afin d'être validée, notamment en ce qui concerne la localisation spatiale et de

l'utilisation du réseau de transport collectif. Cette pré-validation permet d'éviter des problèmes de structures de données, fréquents dans les enquêtes traditionnelles.

- Une **technologie informationnelle** suffisante doit être utilisée lors de la tenue de l'enquête. Cela inclut un système d'information géographique, un logiciel de saisie, un logiciel de surveillance et un logiciel de compilation. Tous ces éléments sont fondés sur les systèmes de bases de données relationnelles.
- Des **modèles d'application** (tendances socio-démographiques, génération de déplacements, affectation, répartition modale) accompagnent l'enquête en vue d'influencer la prise de données en termes de variables à recueillir et de précision de ces informations.
- Enfin, des **données de références** sont utilisées à toute étape de l'enquête pour les géolocalisations et la validation. Ces données sont gérées par un système d'information géographique qui assimile les géoréférences provenant des anciennes enquêtes et autres activités de recherche, en plus d'intégrer toute donnée externe pertinente.

7.1.3 Intégration des objets de la demande

L'intégration des objets de la demande s'effectue majoritairement par la relation entre les géoréférences spatiales (proximité, adjacence, inclusion). Par exemple, les lieux de résidence, d'origine et de destination sont des endroits physiques pouvant servir à intégrer des données d'enquête origine-destination à des données de recensement.

La Figure 7.1 présente le modèle-objets de quelques éléments explicatifs de la demande de transport. Dans le contexte montréalais (canadien), trois objets permettent de tisser des liens d'intérêt entre les objets de demande (en grisé sur le schéma):

- Le secteur municipal est un objet d'agrégation suffisamment vaste regroupant pour fins de comparaison les données d'enquêtes, de motorisation et de recensement.

- Le code postal représente un côté d'îlot en milieu urbain. À cet effet, il représente une unité de population relativement petite et généralement homogène. La très grande majorité des données sur la demande de transport peut être ramenée à ce niveau d'agrégation qui maintient un caractère confidentiel plus sécuritaire que l'adresse.
- Le générateur est un lieu-objet caractéristique. Il représente un confinement informationnel plus restreint que le code postal, mais maintient son caractère confidentiel car il représente un lieu public. Les inventaires de générateurs, les enquêtes origine-destination et les inventaires de clientèle peuvent être examinés conjointement à ce niveau de résolution.

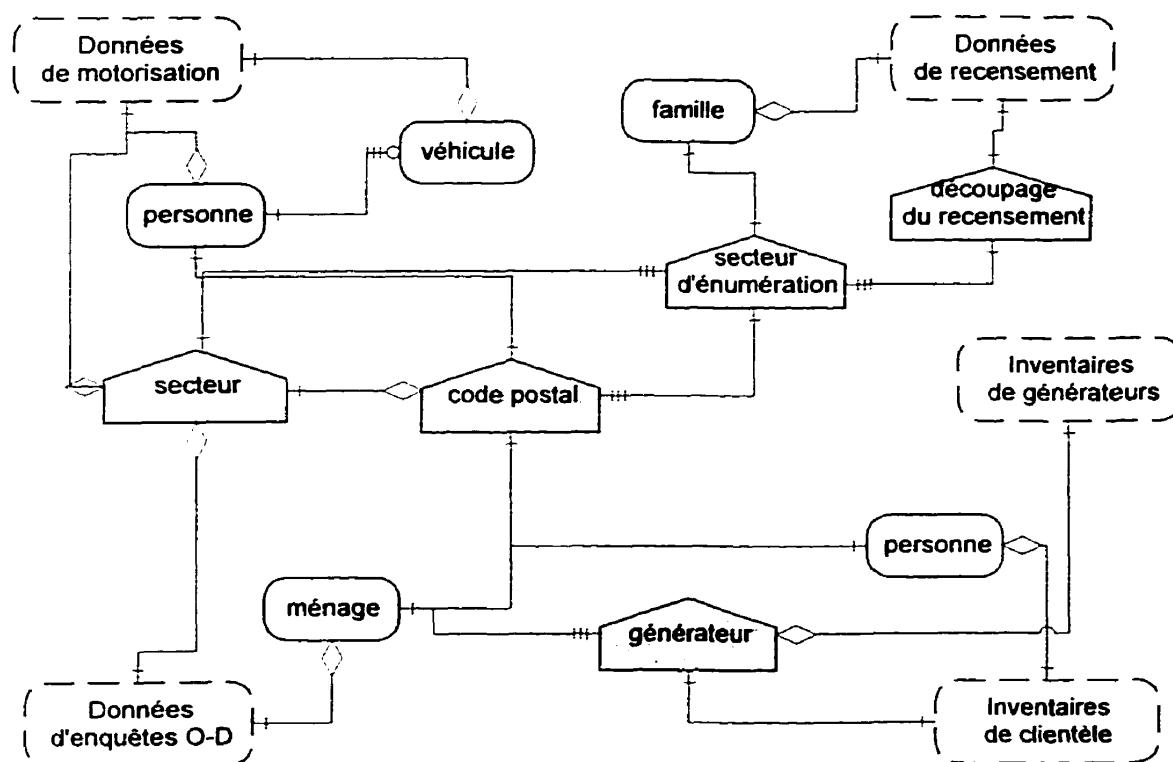


Figure 7.1: Modèle-objets de la demande de transport

7.2 Propriétés des objets individuels d'enquêtes origine-destination

Les principaux objets décrits dans une enquête origine-destination, soit le Ménage, la Personne et le Déplacement possèdent des propriétés au niveau individuel (pris un à un) ainsi qu'un niveau collectif (pris en collection). La présente section décrit les propriétés individuelles de ces objets, c'est-à-dire s'appliquant à une seule instance de la classe.

7.2.1 Propriétés de l'objet Ménage individuel

L'objet dynamique Ménage correspond à un regroupement de personnes ayant effectué ou non des déplacements. Il est également lié à l'objet statique Lieu qu'est le domicile. Rappelons que chaque objet de transport possède des propriétés propres à la classe et à la métaclasse associées.

Les propriétés individuelles du ménage sont:

- *Les propriétés d'identification.* Le numéro de feuillet est un identifiant unique du ménage dans l'enquête. Le nom de famille du répondant peut également servir à identifier le ménage de façon générique.
- *Les propriétés socio-démographiques.* La taille du ménage, le nombre de véhicules du ménage, le revenu annuel et tout autre variable de recensement liée à la famille ou au foyer (la langue d'entretien est quelquefois utilisée pour caractériser l'ensemble du ménage).
- *Les propriétés temporelles.* L'existence du ménage à la date d'entretien lui confère des propriétés temporelles; il est possible de l'associer à une date donnée.
- *Les propriétés de classification.* Le type de ménage (DINK: *double income, no kids*, monoparental, etc.) peut être obtenu à la suite de l'application d'une procédure de classification.

- *Les propriétés pseudo-géométriques.* Par son association au domicile, le ménage obtient des propriétés de localisation spatiale (coordonnées), y compris l'appartenance à des découpages tel que les secteurs d'énumération, les quartiers, les secteurs municipaux, les régions, etc.

7.2.2 Propriétés de l'objet Personne individuel

L'objet Personne désigne un individu du ménage susceptible ou non d'effectuer des déplacements au cours d'une journée. Ses propriétés individuelles sont:

- *Les propriétés d'identification.* Le nom, le prénom et le numéro de personne servent à identifier la personne au sein du ménage.
- *Les propriétés socio-démographiques.* Ces attributs tel que l'âge, le sexe, le statut déclaré, la langue, le revenu et les autres variables du recensement se rapportent habituellement aux personnes.
- *Les propriétés de classification.* Il est possible de déterminer des catégories de personnes, soit au sein du ménage (père, mère, garçon, fille) ou en vertu des activités pratiquées (travailleur, étudiant).
- *Les propriétés pseudo-géométriques et temporelles.* La personne se situe à un endroit donné en un moment donné, ce qui lui confère ce type de propriétés.

7.2.3 Propriétés de l'objet Déplacement individuel

En tant qu'objet cinétique, le déplacement décrit le mouvement d'un objet dynamique (Personne, Produit) entre deux points, ce mouvement étant référencé dans l'espace-temps. Les propriétés du déplacement individuel sont:

- *Les propriétés d'identification.* Elles sont liées au feuillet du ménage, au numéro de la personne et à la séquence chronologique du déplacement.

- *Les propriétés spatio-temporelles.* Le déplacement a une existence spatiale temporelle conférée par les lieux d'origine et de destination, ainsi que par les heures de départ et d'arrivée, d'où les concepts de distance et de durée.
- *Les propriétés socio-démographiques.* Le motif décrit le pourquoi du déplacement, ce qui découle en attribut sociologique.
- *Les propriétés opérationnelles.* Le ou les modes utilisés pour le déplacement, le chemin emprunté, l'utilisation d'un stationnement, le passage par un pont sont des propriétés dites opérationnelles qui caractérisent la façon de se déplacer.

7.2.4 Autres objets individuels

Un certain nombre d'objets individuels peuvent également être déduits (sans être dérivés) du modèle-objets découlant de l'enquête origine-destination. Le Mode peut être perçu tel un objet, ce qui le rend caractéristique à l'analyse. Par exemple, la séparation du transport collectif des modes privés s'avère important à l'application de méthodes de simulation sur les réseaux. Les Lieux représentés par les domiciles, origines, jonctions et destinations sont foncièrement des objets statiques facilement différenciables. Leurs propriétés spatiales jouent un rôle primordial dans le traitement des données spatialisées et des objets associés. Le générateur de déplacement fait partie de cet ensemble. Il arrive qu'une classe d'objet soit séparée en deux catégories distinctes: par exemple, les personnes mobiles et les non mobiles. La seconde classe perd toute propriété dynamique et ne pourra faire l'objet des mêmes méthodes que la première.

7.3 Méthodes appliquées aux individus et aux collections d'objets d'enquêtes origine-destination

Les collections d'objets d'enquêtes origine-destination ne possèdent pas de propriétés "simples", ils ne possèdent que des méthodes. En fait, leurs propriétés proviennent de l'application d'une méthode (de compilation, statistique ou autre) à l'ensemble des objets de la collection, et non directement au groupe. Dans cette section, les

méthodes seront décrites dans le sens inverse de la section précédente. En effet, puisque le ménage est une collection de personnes qui possèdent chacune une collection de déplacements, mieux vaut débiter par l'intérieur de l'imbrication. Ce phénomène sera d'ailleurs discuté à la section Annexe D.

Les objets individuels sont également sujets à l'application de méthodes; dans le cas des objets d'enquêtes origine-destination, ces méthodes sont généralement appliquées grâce aux objets sous-jacents. Par exemple, le calcul du taux de déplacements d'un ménage nécessite la prise en compte de chaque objet personne.

7.3.1 Méthodes appliquées aux déplacements individuels

Le déplacement individuel n'est jamais sujet à l'application de méthodes dans les approches de modélisation agrégées, puisque seul les ensembles agrégés sont considérés. Par exemple, la génération des déplacements touche la collection de déplacements. En contrepartie, par sa nature, l'approche totalement désagrégée préconise l'application de méthodes d'affectation sur l'objet Déplacement individuel (Figure 7.2). Ces méthodes sont applicables après la création des objets Déplacement individuels (B) à partir des données d'enquêtes origine-destination (A) (elles sont reprises à la section 8.1):

- La méthode de *validation* consiste à vérifier la cohérence informationnelle de l'objet Déplacement individuel nouvellement créé. On y vérifie, par exemple, les valeurs des propriétés de façon multivarié (âge VS permis de conduire, heures de déplacements VS séquence, etc.). On vérifie également les propriétés spatio-temporelles du déplacement et des objets Lieu associés (méthode intrinsèque, souvent imposée par la structure de l'objet).
- La méthode d'*accès* concerne l'établissement de relations entre l'objet Déplacement et l'objet RéseauTC par l'identification de points de contacts entre les extrémités du déplacement et les objets Noeud du modèle-objets TC (méthode spatiale).

- La méthode *cheminement* fabrique un chemin entre les objets Nœud choisis précédemment sur le réseau de transport collectif (méthode génératrice).
- La méthode *chargement* associe l'objet Déplacement aux objets du réseau de transport collectif. Cette méthode a pour effet de *charger* le réseau, soit d'affecter les déplacements aux liens et lignes TC, ce qui en permet l'analyse désagrégée *a posteriori* (méthode associative).









Ces méthodes s'appliquent à des lots de déplacements, mais ceux-ci sont toujours considérés de façon individuelle. D'autres méthodes s'appliquent au déplacement individuel: *les méthodes géométriques et pseudo-géométriques*, où l'objet Déplacement est sujet au calcul de distances à vol d'oiseau, sur un réseau ou selon d'autres logiques; *les méthodes de visualisation*, tel que traité dans la section 7.4; et *les méthodes statistiques*, où l'objet Déplacement individuel est examiné selon ses valeurs de propriétés multiples (modes, lieux).

7.3.2 Méthodes appliquées à la collection de déplacements individuels

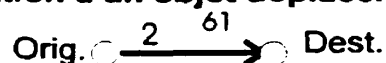
La collection de déplacements individuels regroupe plusieurs objets Déplacement possédant un intérêt commun. La collection est dite orientée s'il existe une séquence logique entre les objets Déplacement. Par exemple, la chaîne de déplacements d'une personne au cours de la journée. La collection non-orientée fait quant à elle référence à un groupe de déplacements quelconque. Par exemple, les déplacements qui se destinent au Carrefour Laval le week-end. Toute collection de déplacements est sujette aux méthodes suivantes, en sus de la visualisation et de la spatialisation:

- *Les méthodes intrinsèques.* Comme pour tout objet Collection, on peut appliquer les méthodes d'énumération, de compte et d'interrogation.

A - Information EOD

Ménage 1 Taille nombre de véh. domicile 	Personne 1 Âge sexe poss. auto etc. Personne 2 	Dépl. 1 Dépl. 2 Dépl. 3 Motif mode origine destination transport collectif ponts stationnement etc.  
Ménage 2 	Personne 1 Personne 2 	 

B - Création d'un objet déplacement



C - Application de méthodes individuelles

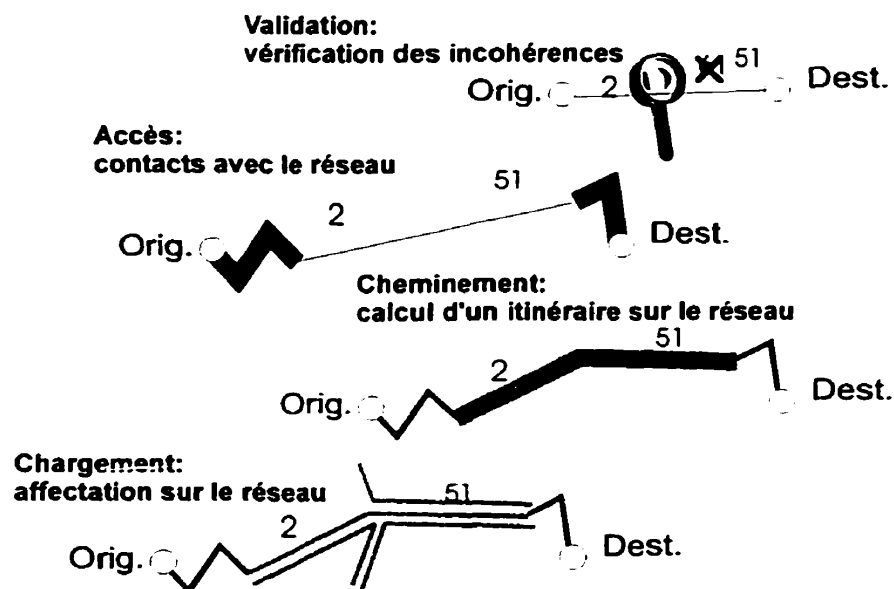


Figure 7.2: Méthodes de traitement de l'objet déplacement individuel dans l'approche totalement désagrégée

- *Les méthodes géométriques.* On peut calculer des distances moyennes de déplacement, des distances totales, des distances par mode pouvant devenir des passagers-kilomètres, etc.

- *Les méthodes de mesure et les méthodes statistiques.* Compilation de statistiques sur les durées de déplacements (distribution), les modes, motifs, ponts, utilisation du stationnement, etc.

En addition, la chaîne de déplacements (collection orientée) spécifique à un objet *Personne* est sujet aux:

- *Méthodes intrinsèques de la chaîne.* Validation des heures de déplacements, vérification et ajustement de la séquence spatiale (lieux d'origine et de destination cohérents), vérification et ajustement de la séquence temporelle (heures de départ et d'arrivée).
- *Méthodes de classification.* Permettent de classifier la chaîne, créer des patrons et dériver des statuts (ces sujets sont abordés un peu plus loin).

7.3.3 Méthodes applicables aux objets *Personne*

L'objet individuel *Personne* est admissible aux méthodes relatives à ses propriétés et à la collection de déplacements associés. Pour sa part, la collection d'objets *Personne* (ici distinguée du ménage) est caractérisée par les méthodes statistiques sur les propriétés et sur les chaînes de déplacements du groupe de personnes. Le Tableau 7.3 présente quelques-unes de ces méthodes.

Tableau 7.1: Quelques méthodes applicables aux objets *Personne*

Méthode	Type de méthode	Appliquée à
CalculerTauxDéplacement	Statistique	Collection de personnes et collections de déplacements
DistributionCohortesÂge	Statistique	Collection de personnes
EstMobile	Classification	Personne individuelle et collection de déplacements
DériverStatut	Classification	Personne individuelle et chaîne de déplacements
CalculerTauxPossessionAuto	Statistique	Collection de personnes

7.3.4 Méthodes applicables aux objets Ménage

L'analyse de l'objet Ménage individuel fait référence aux objets sous-jacents, soit la collection d'objets Personne et les collections d'objets Déplacement. Les méthodes associées à l'objet collection de ménages sont considérées globales, puisqu'elles peuvent s'appliquer à tous les sujets de l'enquête (une enquête est un objet Collection de ménages). Quelques exemples sont présentés au Tableau 7.2.

Tableau 7.2: Quelques méthodes applicables aux objets Ménage

Méthode	Type de méthode	Appliquée à
CalculerTauxDéplacement	Statistique	Collection de ménages, de personnes et de déplacements sous-jacents
CroiséTaillePossessionAuto	Statistique	Collection de ménages et de personnes sous-jacents
ClassifierTypeMénage	Classification	Collection de ménages (peut être en vertu des objets sous-jacents)
DéterminerTypeLogement	Associative	Ménage et données externes (recensement)

7.4 La visualisation

La vision est une action essentielle chez l'être humain. Voir une chose engendre une multitude de stimuli et engage un processus de perception, d'analyse et de sensation du monde extérieur. N'en serait-il pas de même dans la planification des transports?

La visualisation —l'action d'examiner des objets sur un écran, un moniteur—a trop longtemps été négligée chez les planificateurs de transport, notamment à cause de la faiblesse des moyens technologiques à sa disposition. Maintenant que ces moyens existent (SIG), il importe d'examiner la place que doit occuper la visualisation dans l'exercice de la modélisation. Une personne qui entre dans une pièce regarde d'abord celle-ci comme un tout, un ensemble. Elle s'attarde ensuite à certains objets, meubles, tableaux. Elle découvre peu à peu certains détails lui permettant de réajuster ou de confirmer la perception première qu'elle avait de la pièce. Pourquoi ne pas faire de même dans les cas de l'examen de grandes quantités de données?

7.4.1 Modèle-objets du déplacement individuel désagrégé

L'enquête origine-destination effectuée dans la grande région de Montréal tous les quatre à six ans compte des dizaines de milliers de ménages interrogés, soit des centaines de milliers de déplacements regroupés en un seul ensemble informationnel (le fichier unifié d'enquête, voir la section 5.6.4). Le traitement traditionnel de tels fichiers consiste à processor les champs de données dans des logiciels de statistiques qui calculent efficacement moyennes, maxima, minima et sommes. Les résultats obtenus se présentent sous forme de matrices et de tableaux souvent dénaturés. En effet, le traitement par lots ne permet généralement pas de détecter les éléments d'information douteux parmi les dizaines de variables que compte un fichier unifié d'enquête origine-destination. Certaines erreurs touchent plusieurs champs de données simultanément. Pris un à un, chaque élément semble valide alors que mis en relation, ils s'avèrent erronés.

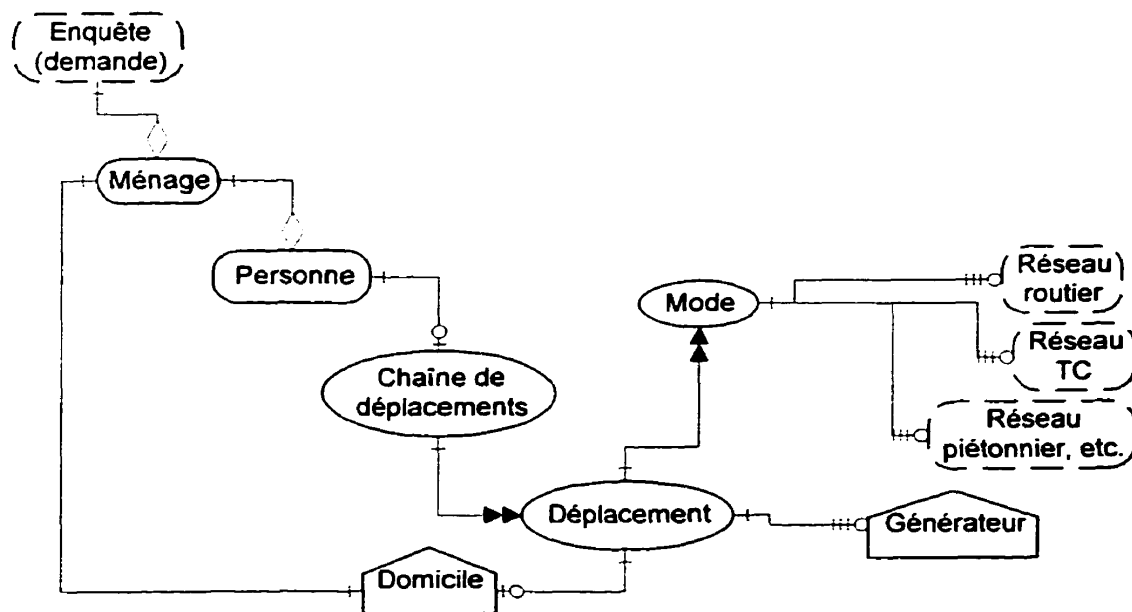


Figure 7.3: Modèle-objets du déplacement individuel désagrégé (sans objet dérivé)

L'approche totalement désagrégée prône l'examen individuel des déplacements des personnes et des ménages. Cette optique mérite d'être poursuivie en associant au

modèle-objets des méthodes de visualisation qui permettent de voir les caractères de l'information individuelle de façon graphique (cartes, schémas, graphes) et numérique (tableau, valeur des champs), dans le but de mieux examiner, donc percevoir, le caractère de l'information, et d'y détecter les erreurs. Ces outils doivent tirer parti de fonctions de schématisation, car on peut difficilement représenter un objet tel un déplacement dans son aspect "réel" (cinématographique), ou il n'est pas toujours souhaitable de le faire. La schématisation consiste à réduire à l'essentiel ce qui est convenu d'observer afin de reconnaître un objet. À cette fin, les cartes, graphes, lignes de temps et autres représentations sont employés en guise de schéma.

Tableau 7.3: Quelques propriétés et méthodes des objets d'enquête origine-destination

Objet	Quelques propriétés	Quelques méthodes
Enquête	NombreMénage, TauxÉchantionnal	VisualiserMénages AffecterSurRéseauTC
Ménage	NomRépondant, Taille, NombreVéhicules, LocalisationDomicile	Visualiser, DéterminerClasse, AfficherEspaceTemps
Personne	Prénom, Âge, Sexe, Possession Auto, PermisDeConduire	VisusaliserDéplacements, AfficherActivités
Chaîne de déplacements	NombreDéplacements, DuréeTotale	DéterminerPatron
Déplacement	HeureDépart, HeureArrivée, Modes, Motif, Origine, Destination, Ponts, Stationnement	Visualiser, CalculerDistance, AffecterSurRéseau, ValiderItinéraire

La Figure 7.3 présente le modèle-objets du déplacement individuel désagrégé obtenu d'une enquête origine-destination. Les paragraphes suivants traitent de la visualisation de ces objets.

7.4.2 Visualisation du déplacement

Le déplacement est un objet cinétique décrivant le mouvement d'un objet Personne (ou autre) d'un point de l'espace à un autre. Ces points peuvent être au même endroit

dans l'espace, mais pas dans le temps. Les méthodes de visualisation d'un objet Déplacement touchent ses propriétés:

- L'heure de départ et d'arrivée, qui confèrent une existence temporelle au déplacement, peut s'exprimer par une ligne de temps ou une bande.

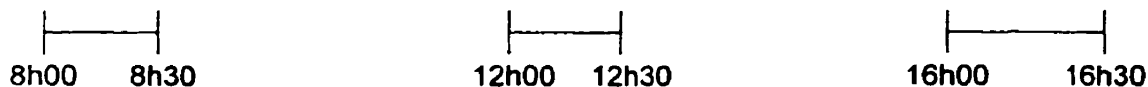


Figure 7.4: Lignes de temps

- Le motif, le mode et autres propriétés non spatio-temporelles sont décrits par une symbolique et une coloration.



Figure 7.5: Symbolique et coloration des déplacements

- Le caractère spatial du déplacement peut être décrit à l'aide d'un trait placé sur un fond de carte (vol d'oiseau) ou par une séquence de segments décrivant le chemin parcouru lors du déplacement.

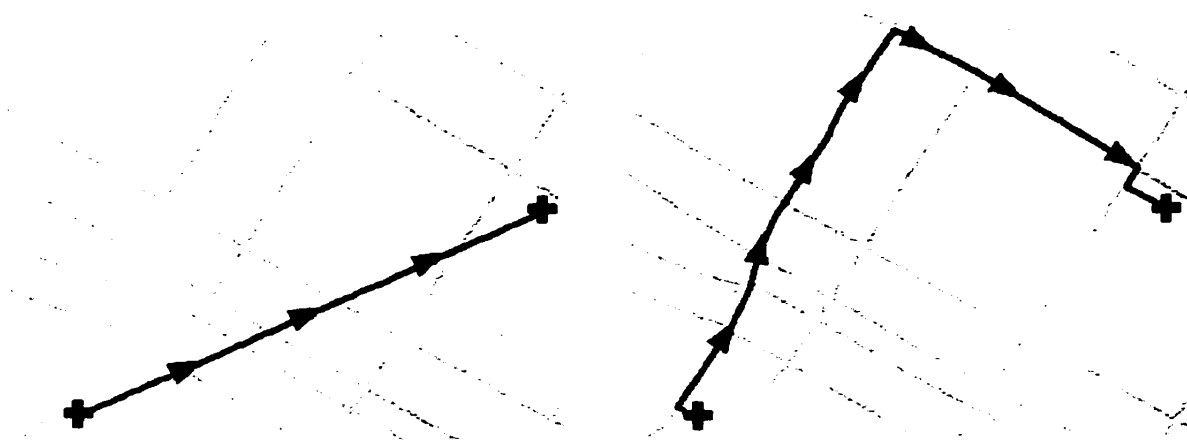


Figure 7.6: Deux représentations d'un déplacement

- L'aspect spatio-temporel est tantôt représenté par la distance parcourue en fonction du temps, ou par la distance au domicile en fonction du temps.

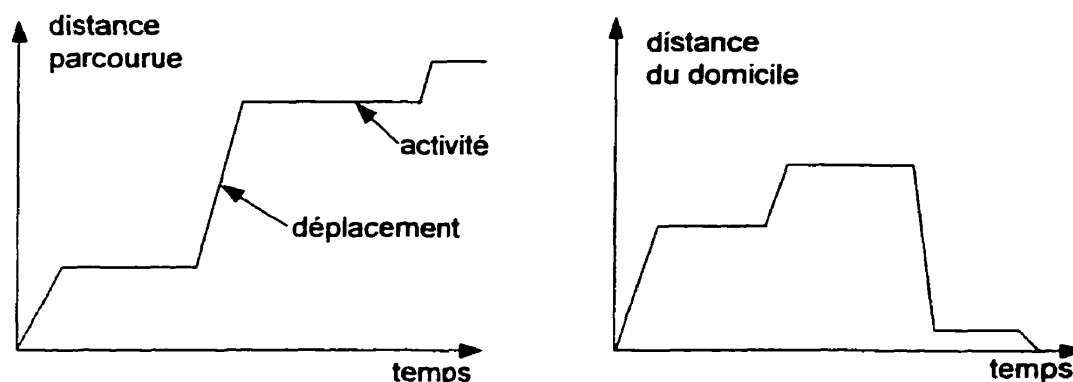


Figure 7.7: Représentation spatio-temporelle des déplacements

La visualisation d'un objet Déplacement est fortement liée à celle d'un objet dérivé, l'activité, dont il sera question à la section 7.6.1.

7.4.3 Visualisation de la personne

En transport, la personne est caractérisée de façon sociale, économique et démographique par ses propriétés touchant l'âge, le sexe, le revenu et d'autres variables propres aux recensements. Par l'appel successif de méthodes de visualisation de déplacements, on est en mesure de décrire la chaîne de déplacements d'une personne à l'aide de représentations tel que celles de la Figure 7.7.

La chaîne de déplacements peut être validée de façon spatiale, en s'assurant que deux déplacements successifs ont une localisation commune, et que deux déplacements successifs ne possèdent pas de vie commune. Ces règles ne sont destinées qu'à démontrer les opérations de visualisation, elles ne constituent pas des conditions *sine qua none* dans tout type d'enquête.

7.4.4 Visualisation du ménage

Le ménage est un groupe de personnes vivant sous un même toit. À cet effet, ces personnes sont susceptibles de partager certains moyens de transport ou de posséder des caractéristiques communes (âge, revenu, etc.). La visualisation contiguë des comportements des personnes d'un ménage est un opérateur puissant. En effet, seul un algorithme lourd permettrait de détecter l'effet de groupe que l'on observe d'un coup d'œil sur un schéma d'activités en barres.

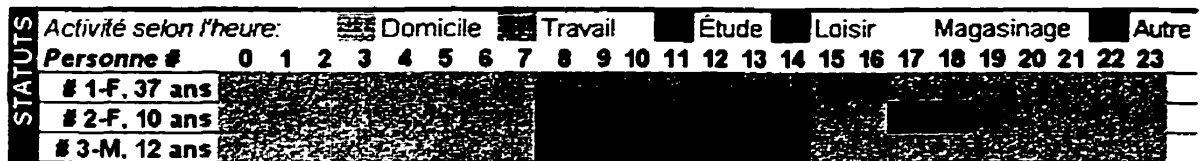


Figure 7.8: Diagramme d'activité en barres

7.5 Le traitement de données spatialisées

La plupart des données sur la demande de transport, tel que celles provenant des enquêtes origine-destination, possèdent des caractéristiques permettant de les localiser dans l'espace. Ce n'est qu'avec l'avènement généralisé des systèmes d'information géographique que cette dimension de l'analyse fait surface.

Quels sont les opérateurs spatiaux à appliquer sur des données de transport? La notion d'opérateur spatial fait appel à des concepts échappant aux lois de modélisation unidimensionnelles. On distingue d'emblée deux niveaux d'opérateurs spatiaux. Le premier niveau regroupe les méthodes qui sélectionnent et caractérisent des objets en vertu de critères spatiaux. Le second niveau concerne les méthodes d'agrégation (union) et de désagrégation, qui ont pour effet de créer de nouveaux objets. Cette section traite de ces opérateurs en tant que méthodes appliquées à des objets de transport.

7.5.1 Premier niveau: adjacence, proximité, inclusion, connexité

Les opérateurs spatiaux de premier niveau permettent de vérifier l'état d'un objet par rapport à un ou plusieurs autres objets. Ces méthodes s'appliquent intuitivement aux objets de transport statiques (générateurs, zones, municipalités).

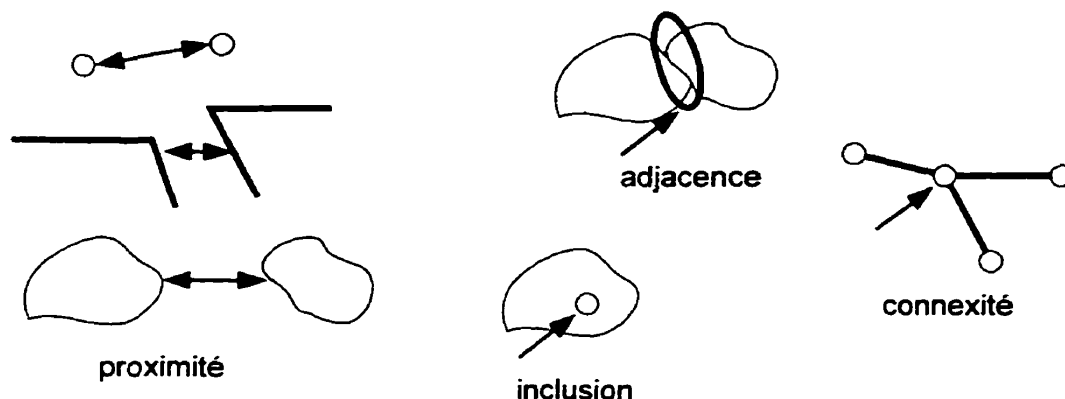


Figure 7.9: Opérateurs spatiaux de premier niveau

La proximité est exprimée par la distance entre deux objets (exemple: la distance entre deux rues). L'adjacence détermine si deux objets possèdent une frontière commune (exemple: frontière de municipalité). Cette méthode permet également de vérifier s'il y a superposition d'objets. L'inclusion est la vérification de la présence d'un objet dans un autre (exemple: générateur dans une municipalité). La connexité est un opérateur de vérification des liens entre les objets (exemple: Rue et Intersection dans un réseau de voirie).

Les opérateurs dits "spatiaux" répondent à un référentiel prédéterminé par l'analyse. Les mesures s'effectuent habituellement dans l'espace, d'où l'obtention de distances en mètres et de cartes isométriques (échelle uniforme). Cependant, ce référentiel peut très bien être augmenté d'une échelle de temps ou prendre la forme d'un réseau. La notion de proximité chez les objets dynamiques et cinétiques fait appel au référentiel espace-temps, c'est-à-dire qu'il faut toujours considérer la localisation spatiale de ces objets à un temps "t". Les objets dynamiques sont en mouvement et possèdent ainsi

une position variable dans le temps. Pour les objets cinétiques, de topologie linéaire, la distance est calculée entre deux points de référence.

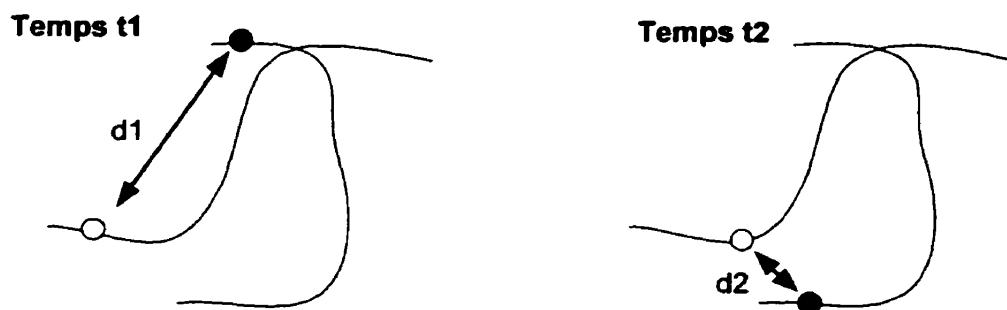


Figure 7.10: Proximité des objets cinétiques et dynamiques

L'utilisation d'un réseau comme référentiel permet de déterminer la proximité des objets de façon plus "adaptée" aux conditions de transport qui prévalent sur le terrain. Par exemple, la distance entre deux points sera habituellement supérieure (ou égale) à la distance à vol d'oiseau lorsque calculée sur un réseau de voirie. L'application des opérateurs spatiaux sur les référentiels temporels et de réseau font partie des méthodes orientées-objet et outrepassent en ce sens la modélisation spatiale imposée par les logiciels actuels de SIG.

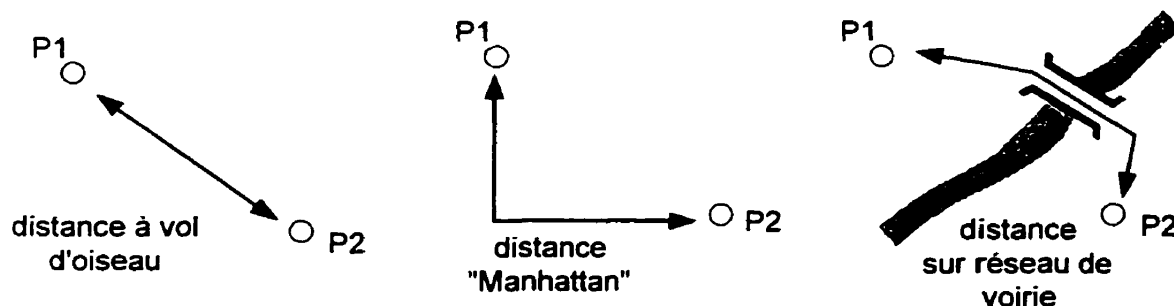


Figure 7.11: Quelques référentiels appliqués à des distances

L'inclusion est une méthode typiquement employée chez les générateurs de déplacements. Par exemple, plusieurs boutiques et autres commerces se retrouvent dans un centre commercial. Or, ces objets font partie d'un même ensemble (les générateurs) et les déplacements associés doivent être comptabilisés avec soin.

L'opérateur est alors l'agrégation et la méthode est de niveau deux. Les méthodes de premier niveau n'imposent pas directement de changement de propriétés aux objets en présence. Au mieux, de nouvelles propriétés sont créées pour exprimer les relations spatiales entre ceux-ci.

7.5.2 Deuxième niveau: agrégation, union, soustraction

Les opérateurs spatiaux de deuxième niveau amènent la création de nouveaux objets à partir d'objets existants sur la base de leurs caractéristiques spatiales. Dans le cas de l'agrégation, le problème consiste à additionner convenablement les propriétés de chacun des objets primaires afin de constituer un tout viable. L'agrégation est fréquemment employée dans le traitement des données d'enquêtes origine-destination, où l'on cherche à dresser un tableau des habitudes de mobilités, des caractéristiques des ménages et des personnes et autres indicateurs à partir d'opérations de calcul effectuées sur des centaines de milliers d'enregistrement contenant une centaine de variables. Le résultat de l'agrégation est alors employé à la modélisation agrégée (montage de matrices origine-destination).

Le processus d'agrégation n'est pas néfaste en soi; cependant, il convient de disposer de méthodes suffisamment adaptées pour pouvoir agréger les données avec "confiance", y compris pouvoir maintenir le lien avec les objets primaires utilisés. La Figure 7.12 permet de décrire en quoi l'approche orientée-objet peut démystifier le processus d'agrégation.

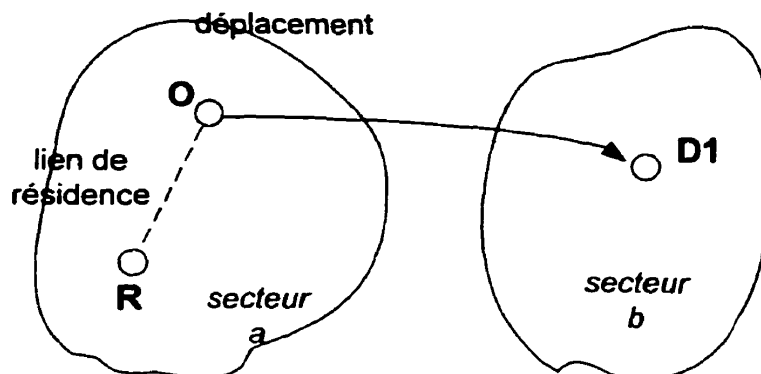


Figure 7.12: L'agrégation d'objets de transport

Soit un découpage territorial en secteurs, où l'on désire obtenir des données agrégées concernant les ménages, les personnes et les déplacements. Plusieurs types d'agrégation sont possibles sur le secteur *a*:

- Agrégation des ménages, personnes et déplacements qui résident dans le secteur *a*;
- Agrégation des déplacements qui ont comme origine un point du secteur *a*, et caractérisation des ménages et des personnes associées;
- Agrégation des déplacements qui ont comme destination un point du secteur *a*, et caractérisation des ménages et des personnes associées;
- Agrégation des déplacements qui ont comme origine et destination deux points du secteur *a*, et caractérisation des ménages et des personnes associées;
- Agrégation croisée de deux ou plusieurs groupes énoncés ci-dessus (par exemple, étude des déplacements qui prennent origine dans le secteur *a* pour se destiner au secteur *b*, etc.)

Dans les gestionnaires de bases de données classiques, ces opérations sont ardues et ne peuvent faire l'objet d'une simple requête de type SQL. Seul un programme bien structuré permet d'effectuer ces calculs. Il faut de plus porter attention aux types

valeurs de propriétés: l'âge ne doit pas être additionné, tout comme les taux. Le programmeur doit alors créer des variables intermédiaires pour stocker de l'information pouvant être additionnée (exemple: âge X facteur d'expansion). Certains déplacements risquent d'être comptés en double s'ils répondent simultanément à plus d'un critère. L'approche orientée-objet propose une méthode simple, sans équivoque, pour effectuer ces agrégations. En fait, toute agrégation correspond à la création de collections d'objets Ménage, Personne et Déplacement (ainsi que tout autre objet s'avérant nécessaire). La collection est un opérateur puissant: elle suppose l'unicité des objets qui la composent, et permet l'application de méthodes globales sur ces objets. Ainsi, chaque propriété de l'objet agrégé résultant est une méthode appliquée à la collection d'objets.

La procédure possède la souplesse requise pour effectuer des analyses supplémentaires et modifier les critères de calcul des propriétés. Par exemple, après avoir coupé un secteur en deux, il suffit de recréer les collections et appliquer de nouveau les mêmes méthodes. D'autre part, si des principes de calcul sont modifiés (sur la distance de déplacement, par exemple), seul la méthode concernée est modifiée, sans affecter le processus. Il est question de l'application de ces méthodes à la section 7.2.

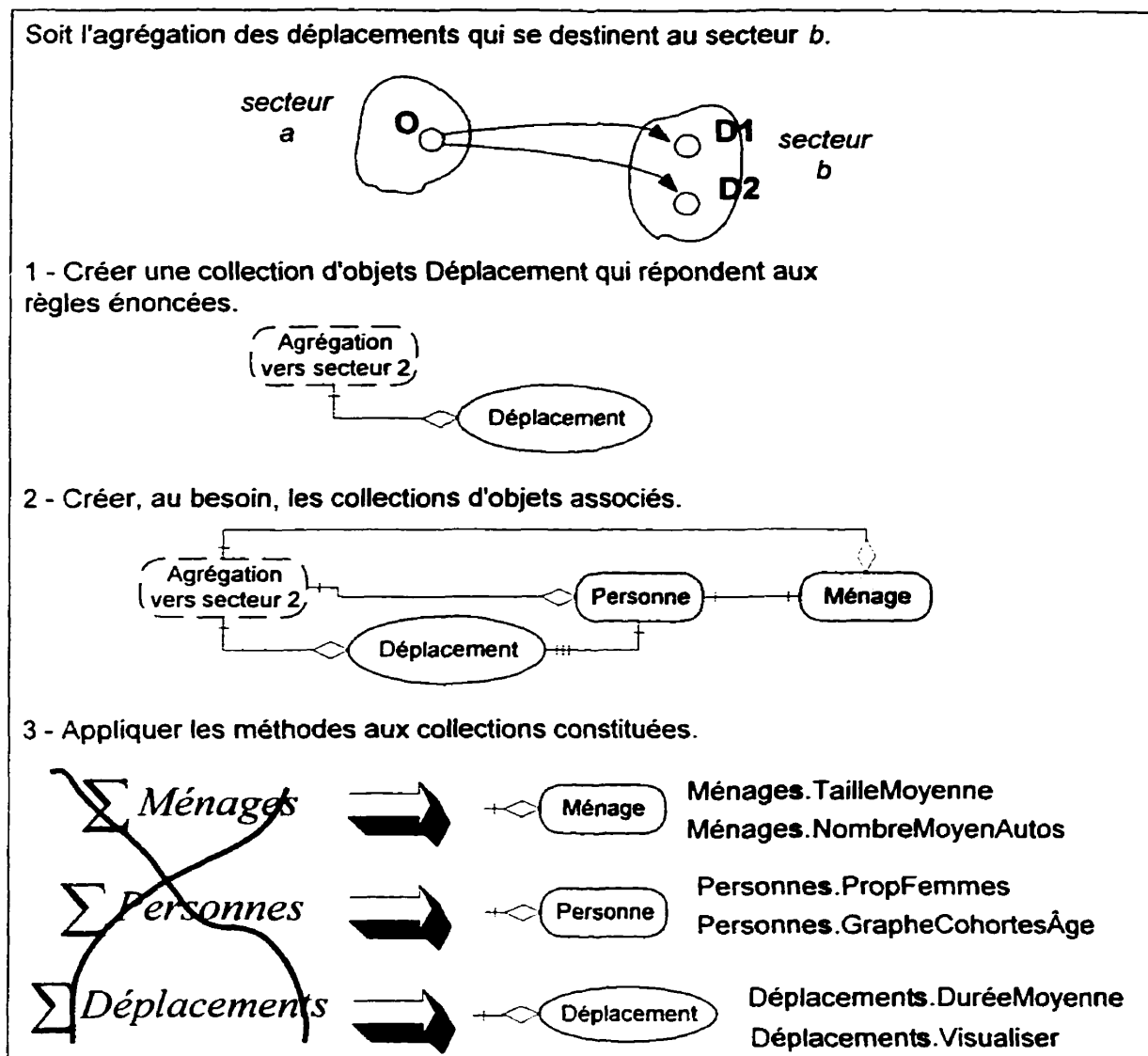


Figure 7.13: Méthode générale d'agrégation orientée-objet

7.5.3 La désagrégation artificielle

L'agrégation spatiale pose certains problèmes méthodologiques et éthiques à cause de la simplification et la perte d'information qu'elle engendre sur les ensembles de données. Elle est largement employée à cause des impératifs de la procédure séquentielle classique, et en ce sens elle est relativement bien maîtrisée. Mais qu'en

est-il de la méthode inverse? Pourrait-on envisager de désagréger la demande sur un territoire?

La microsimulation des déplacements urbains, l'examen de l'usage des infrastructures et l'analyse de couloirs et de zones limitées sont autant de problèmes qui nécessitent une définition précise de la clientèle de transport dans une région. Cette précision a trait à la localisation spatiale des domiciles et des lieux de destination, ainsi qu'à la détermination des chemins empruntés lors des déplacements. La désagrégation artificielle est une méthode génératrice d'objets. Elle consiste à créer des objets de transport et de les localiser dans l'espace à des échelles relativement petites. La génération de ces objets se fait de façon à ce qu'une fois agrégés, ces objets nouvellement créés répliquent les caractéristiques de l'ensemble initial.

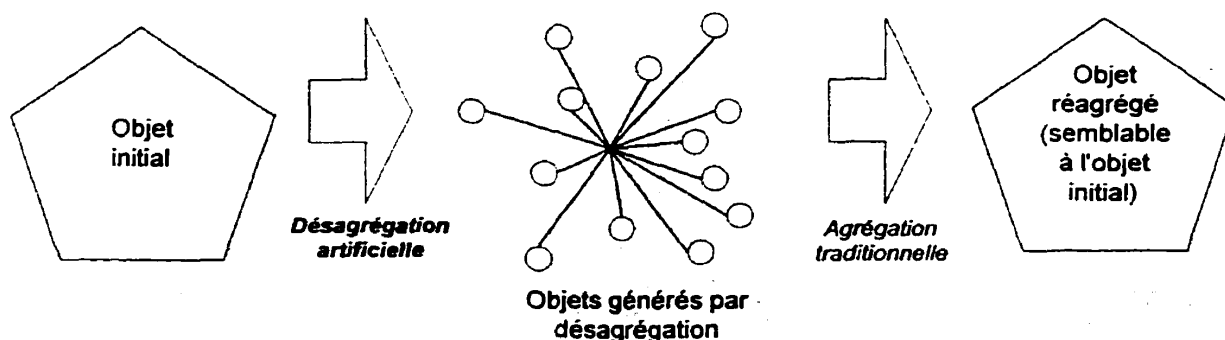


Figure 7.14: Principes de la désagrégation artificielle

La méthode de désagrégation orientée-objet se fonde principalement sur la génération aléatoire "contrôlée" d'objets distribués sur un territoire. La forme de la fonction qui contrôle le processus aléatoire est non seulement mathématique (par exemple uniforme) mais également spatiale (concentrique, semi-circulaire, carré) et dépend du territoire. Soit, par exemple, le problème suivant. On cherche à désagréger spatialement la localisation de la clientèle d'une future école primaire afin de déterminer les corridors à prioriser pour les déplacements des élèves. Certaines informations de base sont accessibles, tel que la géométrie du réseau piétonnier autour du site choisi, le nombre d'élèves, les caractéristiques socio-démographiques de la population environnante (taille des ménages, nombre d'enfants); ces données étant

disponibles à des niveaux agrégés. On sélectionne une unité de désagrégation comme le code postal ou le bloc. Les étapes d'application de la méthode sont:

- Création des X objets Ménage nécessaires à 1, 2 ou plus d'enfants en vertu des caractéristiques démographiques du quartier;
- Dispersion aléatoire de ces ménages par association à des objets CodePostal. Les codes postaux reflètent, par leur localisation, la géométrie du territoire. De plus, certains codes commerciaux ou industriels peuvent ne pas accepter d'association avec des objets Ménage.
- Spatialisation des résultats et calcul de mesures agrégées afin de valider la dispersion des objets Ménage.

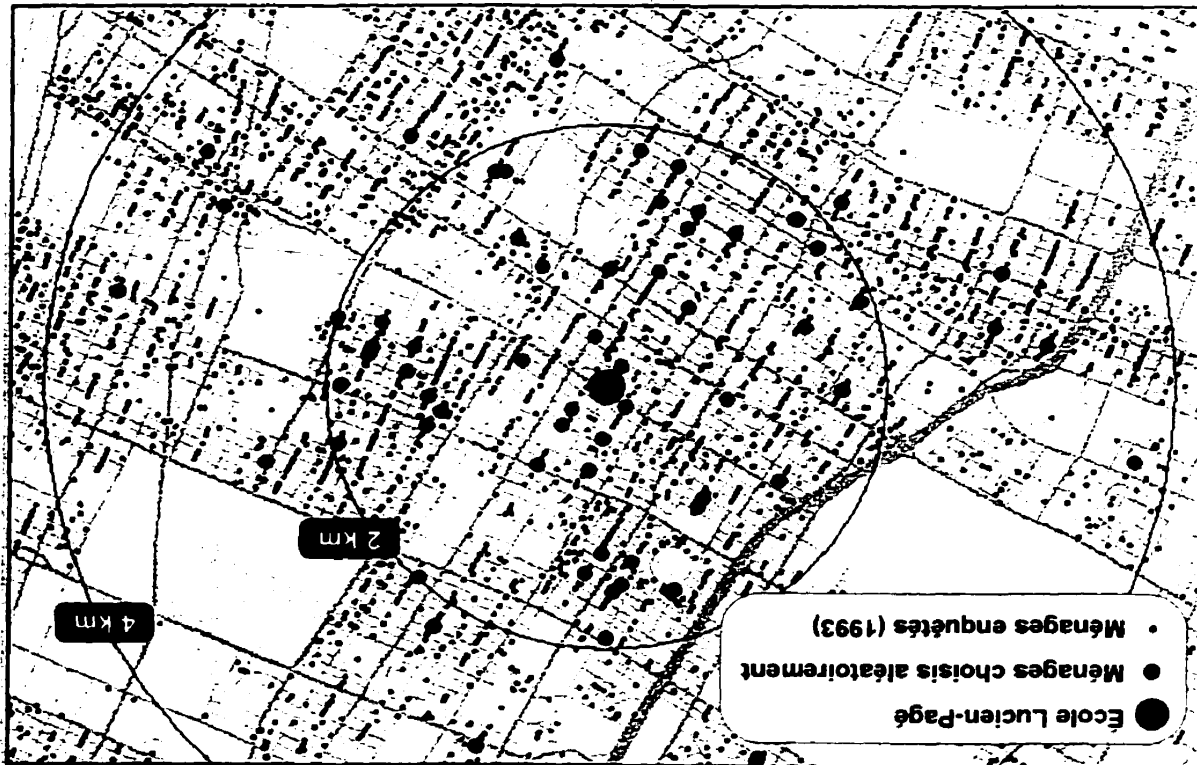
La méthode de désagrégation artificielle peut sembler absurde à prime abord: s'il est difficile de modéliser les comportements de transport agrégés d'une région, comment peut-on tenter de simuler les comportements individuels? Pourtant, cette méthode s'avère utile pour comprendre les hypothèses énoncées dans les modèles agrégés à faible résolution, tel que l'uniformité des populations dans un territoire donnée, ou même l'examen désagrégé de résultats de la modélisation agrégée. Par exemple, on pourrait examiner l'utilisation du réseau de marche (trottoirs et passerelles) d'un quartier en désagrégeant finement la population parmi les côtés d'îlots pour ainsi effectuer une méthode de chargement sur le réseau de voirie. La planification d'une passerelle piétonnière pourrait profiter de ce type de modélisation.

La création d'objets constitue une nouvelle donne parmi les méthodes de planification des transports. Dans le cadre de l'analyse des données d'enquête origine-destination, il ne viendrait pas à l'esprit, sous une approche agrégée, de tenter d'induire de nouveaux objets puisqu'il s'agit du propre de la méthode de synthétiser l'information existante. Par l'examen individuel de grandes quantités de déplacements, l'approche

fait des candidats à de nouvelles analyses. nouveaux objets bénéficient alors d'une existence distincte de ses créateurs, ce qui en les propriétés et méthodes sont héritées des composantes en présence. Ces que l'on soit amené à créer de tous nouveaux objets, non existants au départ, et dont l'application de méthodes en cascade, où l'on reconnaît et observe des objets, il arrive Dans la foulée de l'approche floue où l'on complète des objets, de la visualisation et de

7.6 La création de nouvelles classes d'objets de demande

Figure 7.15: Exemple d'application de la désagrégation artificielle



totallement désagrégée, pour sa part, peut intuitivement permettre le développement de nouveaux objets. Ceux-ci servent:

- À mieux caractériser les objets en présence (comme, par exemple, les objets "Activité" et "Statut");
- À créer de nouvelles relations entre les objets (comme, par exemple, l'objet "Automobile");
- À initier une perspective nouvelle propice à des analyses insoupçonnées (tel que l'objet "Générateur").

7.6.1 La création de l'objet Activité

Dans une journée typique, une personne effectue une séquence de déplacements. De cette séquence on peut déduire un patron de déplacements. Ce patron est le modèle à suivre pour la personne, qui, en vertu de ses activités quotidiennes, effectue à peu près toujours les mêmes déplacements, aux mêmes endroits et au même moment.

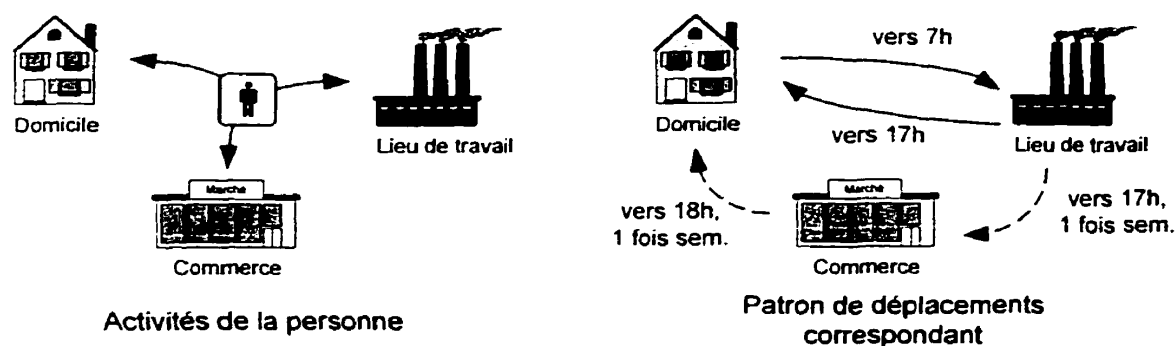


Figure 7.16: Activités et patron de déplacements

La personne représentée à la Figure 7.16 se rend habituellement à son travail vers 7h00, pour y arriver avant 8h00. Elle en revient vers 16h00. Une fois par semaine, elle se rend au centre commercial au retour du travail. Par l'examen approprié des données d'une enquête origine-destination, il est possible de déterminer quelles personnes obéissent à ce patron. Ce type d'analyse nécessite une analyse de haut

niveau des comportements car plusieurs variables sont à valider simultanément. La détermination et l'appariement des patrons dans le cadre d'une approche orientée-objet passe par la création et la caractérisation d'objets Activité. L'objet Activité est d'abord caractérisé (dans le type d'enquête montréalais) par le motif du déplacement qui la précède: travail, étude, loisir. Il est aussi enrichi des propriétés du ménage et de la personne concernés. Enfin, le lieu où se déroule l'activité est également à considérer (usine, centre commercial, école...).

Tableau 7.4: Quelques propriétés et méthodes de l'objet Activité

Nom	Type	Description
Catégorie	Propriété de classification	Type d'activité (travail, étude, santé, etc.)
Classer	Méthode de classification	Catégorise l'activité en fonction du mode, du motif et du lieu
Créer	Méthode génératrice	Crée l'activité à partir du patron
Déplacement	Objet Déplacement	Déplacement qui a engendré l'activité
HeureDébut, HeureFin, Durée	Propriété temporelle	Heures de début et de fin de l'activité, durée
Lieu	Objet Lieu	Lieu où se déroule l'activité
Personne	Objet Personne	Personne qui fait l'activité

7.6.2 La création de l'objet Statut

Une des premières manifestations de l'objet Activité est d'affecter à la personne associée un objet Statut déterminé par ses activités principales. Ainsi, une personne peut être qualifiée de "travailleur" ou "d'étudiant" après l'examen de sa séquence d'activités quotidiennes. Pour ce faire, une méthode par critères peut être utilisée. La Figure 7.17 présente une méthode simplifiée permettant de dériver des objets Statut pour les personnes enquêtées.

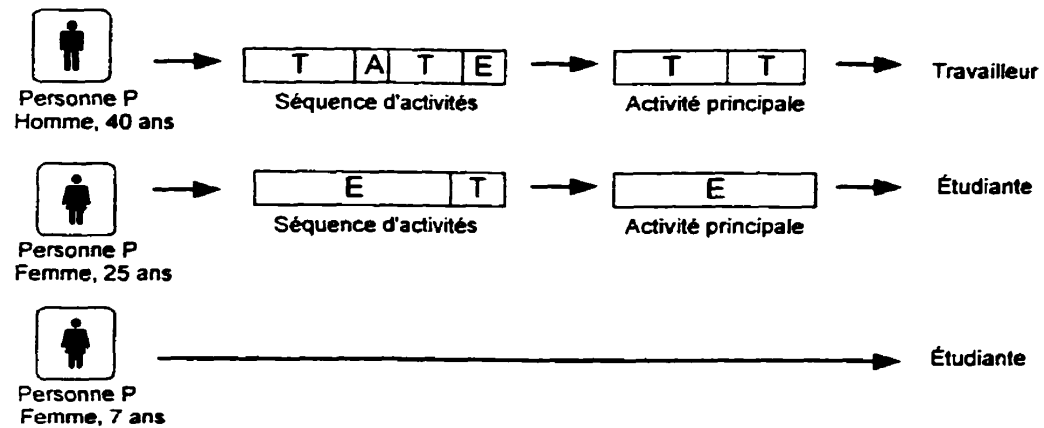


Figure 7.17: Exemple simplifié de dérivation de statuts

Dans la séquence d'activité de l'homme de 40 ans, les activités de travail prédominent, ce qui en fait un "travailleur". La femme de 25 ans est plutôt considérée "étudiante", même si sa séquence d'activités comprend un travail. On attribue *de facto* un statut "étudiant" à la dernière personne, âgée de 7 ans. On peut toutefois prendre soin de vérifier ses déplacements au cours de la journée. Par association à l'objet Générateur, il serait possible, pour une personne donnée, de caractériser plus finement son statut (travailleur dans une usine, dans un bureau, domaine de la santé, etc.). Notons qu'il existe d'autres statuts différenciables dans les comportements en ce qui concerne les déplacements, tel que le retraité, le patient (ou la personne à mobilité réduite), le chômeur, etc.

À quoi peuvent servir les objets Statut nouvellement créés? Dans un contexte de planification totalement désagrégée, l'activité sert non seulement à caractériser la personne (travailleur, étudiant, etc.) mais également à déterminer la nature des déplacements qui seront effectués. Par exemple, lors du déménagement d'un ménage (basé sur des prévisions démographiques), les personnes dites "travailleurs" risquent de ne pas modifier le lieu de destination pour motif travail, tandis que les personnes dites "étudiants" en bas âge, verront probablement la destination de leur déplacement pour motif "étude" déplacée à proximité.

Tableau 7.5: Quelques propriétés et méthodes de l'objet Statut

Nom	Type	Description
Activités	Objet Activités	Collection d'activités associées au statut
Catégorie	Propriété de classification	Type de statut (travailleur, étudiant)
Classer	Méthode de classification	Catégorise le statut en fonction de l'activité
Créer	Méthode génératrice	Crée le statut à partir des activités
Déplacements	Objet Déplacements	Collection de déplacements qui ont trait au statut
Lieux	Objet Lieux	Collection de lieux qui ont trait au statut
Personne	Objet Personne	Personne qui possède le statut

7.6.3 La création de l'objet Automobile

La possession automobile est une information habituellement recueillie dans les enquêtes origine-destination de type ménage. Elle sert par exemple à calculer des taux de possession automobile (par ménage, secteur). Cette variable peut cependant être utilisée de façon plus extensive si l'on crée des objets Automobile (Véhicule) pour le ménage et que l'on détermine leurs caractéristiques.

La Figure 7.18 présente les déplacements de quatre personnes d'un ménage en fonction de l'heure. Selon l'enquête, le ménage possède trois véhicules. Si l'on fabrique trois objets Véhicule, il est possible d'associer les déplacements de chacun de ces véhicules aux déplacements des personnes en vertu des déclarations de mode et des heures de déplacements. Par exemple, le premier déplacement des personnes A, B et D s'effectue vers 7h30. Puisque seul A est conducteur, on en déduit que B et D sont passagers, et il en va de même pour le reste de la journée. On peut de plus identifier un véhicule principal et les véhicules secondaires en vertu de leur temps d'utilisation. À la fin de la journée, on ne peut spécifier quel véhicule est utilisé pour le déplacement de B, mais on est assuré que seul deux véhicules ont été utilisés simultanément par le ménage au cours de la journée. On peut imaginer une des

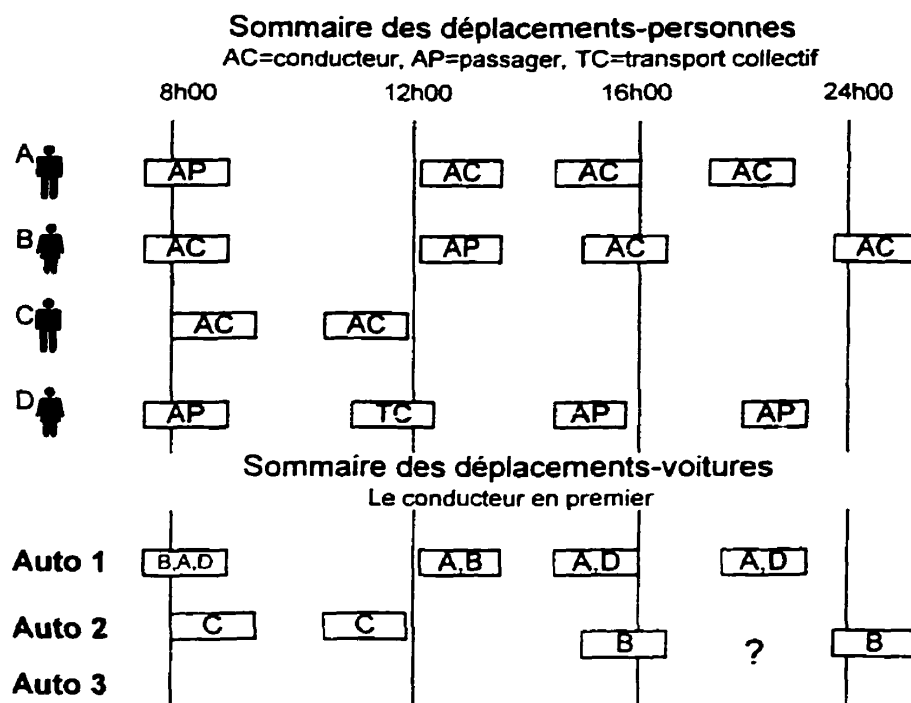


Figure 7.18: Déplacements-personnes VS déplacements-voitures

Tableau 7.6: Quelques propriétés et méthodes de l'objet Automobile

Nom	Type	Description
Classer	Méthode de classification	Détermine s'il s'agit de la première, deuxième ou autre automobile
Créer	Méthode génératrice	Crée l'automobile à partir des déclarations de modes
Déplacements	Objet Déplacements	Collection de déplacements qui sont associés à l'automobile
Lieux	Objet Lieux	Collection de lieux qui sont associés à l'automobile
Occupation	Méthode statistique	Détermine l'occupation véhiculaire en un moment donné
Personnes	Objet Personnes	Collection de personnes qui utilisent l'automobile

7.6.4 La création de l'objet Générateur

Les enquêtes origine-destination recueillent une foule d'information sur les caractéristiques des ménages et des personnes ainsi que sur leurs habitudes de déplacements, cela va de soi. À cet effet, beaucoup d'analyses de ces données porteront sur le lieu de résidence des ménages.

Tableau 7.7: Quelques propriétés et méthodes de l'objet générateur

Nom	Type	Description
Classer	Méthode de classification	Permet de catégoriser le générateur
Créer	Méthode génératrice	Crée le générateur à partir de l'ensemble des déclarations de déplacements
Déplacements	Objet Déplacements	Collection de déplacements qui sont associés au générateur (<i>ce qui permet de faire des analyses de mobilité</i>)
Lieu	Objet Lieu	Lieu physique où se trouve le générateur
Occupation	Méthode statistique	Détermine le nombre de personnes qui se trouvent au générateur en un temps donné
Personnes	Objet Personnes	Collection de personnes qui se rendent au générateur (<i>ce qui permet de faire des analyses socio-démographiques</i>)
Spatialiser	Méthode de spatialisation	Permet de représenter le lieu du générateur dans l'espace

Si l'on inverse le problème et l'on examine les destinations déclarées lors des déplacements, on risque d'obtenir des "masses critiques" de déplacements se destinant vers certains lieux. L'analyse de ces déplacements amène, pour chaque lieu, la création d'un objet "générateur" fortement caractérisé, *a priori*, par le type de déplacement qui s'y rend. On pourrait même, pour une région urbaine parfaitement inconnue, identifier les principaux attraits par le simple examen de données d'enquête ménage. Les générateurs sont donc des objets nouveaux, non pas dérivés pour chaque ménage tel que le statut ou l'automobile, mais bien fondés sur l'amalgame des

nombreux objets déplacements qui y sont destinés. Ces nouveaux objets bénéficient des propriétés et méthodes associés à ces déplacements, tel que les taux, les distributions de modes et de motifs, et également de nouveaux attributs tel que la fonction.

En pratique, les générateurs de déplacements sont parfois difficiles à identifier chez les déclarations des répondants, qui entremêlent adresses, intersections, codes postaux et descriptions de lieux dans leurs libellés d'origine et de destination. Cependant, les lieux importants peuvent être identifiés par l'application d'un jeu de méthodes liés à l'espace (proximité), au motif (magasinage = centre commercial) et aux autres attributs de chaque déplacement (heures d'ouverture, mode voiture et présence de stationnement, etc.)

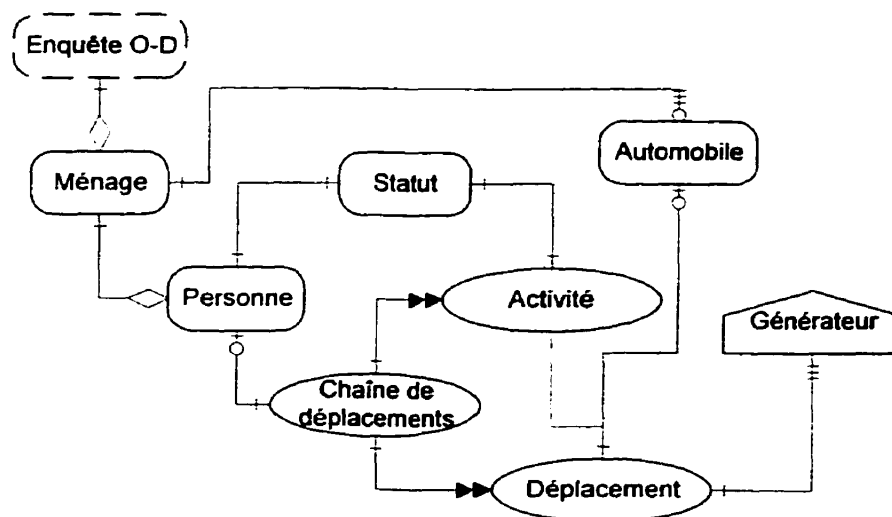


Figure 7.19: Modèle-objets enrichi de l'information provenant des enquêtes origine-destination

7.6.5 Modèle-objets de l'enquête origine-destination (enrichi)

L'obtention des nouveaux objets décrits dans les sections précédentes permet de bonifier le modèle-objets dérivant l'information provenant des enquêtes origine-destination. Les objets de couleur foncée de la Figure 7.19 ont été ajoutés après

l'application de méthodes génératrices sur les objets de base (Ménage, Personne et Déplacement).

Dans le cadre de l'approche totalement désagrégée, les nouveaux objets sont remis en contexte et quelquefois réintégrés à même le fichier d'enquête afin de faire l'objet de post-analyses. Par exemple, le statut devient une propriété de l'objet Personne.

Après avoir expérimenté l'application de méthodes aux objets composant la demande et l'offre de transport, il convient d'expérimenter des applications pouvant s'adresser simultanément aux deux domaines. Le prochain chapitre présente des applications de l'approche totalement désagrégée et orientée-objet, où les composantes de l'offre et de la demande sont fortement interreliées.

CHAPITRE 8: APPLICATION DE L'APPROCHE ORIENTÉE-OBJET À LA MODÉLISATION TOTALEMENT DÉSAGRÉGÉE

Les deux chapitres précédents ont présenté une série de propriétés et méthodes appliquées à des objets de transports tantôt individuels, tantôt placés en collections. Cette thèse ne saurait être complète sans que le rôle de l'approche orientée-objet au sein de la modélisation totalement désagrégée ne soit clairement établi par la remise en contexte de ces objets dans des procédures de plus haut niveau.

L'approche totalement désagrégée repose sur l'examen et le traitement du déplacement individuel, auquel sont associés des d'attributs relatifs au ménage et à la personne qui se déplace, ainsi qu'aux modes empruntés. Les grandes procédures de cette approche tirent leur puissance non pas de la possibilité de synthétiser l'information avant la modélisation, comme le ferait un modèle dit "agrégé", mais bien sur l'application successive de méthodes sur les objets en présence, ce qui permet de conserver l'intégrité de l'information du début à la fin du processus. Chaque méthode est donc appliquée des milliers de fois, soit à une ou plusieurs occasions pour chaque individu. L'utilisation de méthodes dont le propos peut changer d'un individu à l'autre sied bien à une approche orientée-objet, puisqu'elle s'apparente à la différenciation de méthodes *interclasses*, où les notions d'héritage, de collaboration et d'association deviennent importantes. Par exemple, une méthode de calcul de chemin sera différemment appliquée à un itinéraire de transport collectif par rapport à un itinéraire routier, même si, dans l'intention, il s'agit de la *même* procédure. Par sa définition, l'approche orientée-objet démontre cette adaptabilité, notamment au niveau de la formalisation en texte (sinon en code informatique) des opérations à accomplir. Un énoncé clair et précis d'une procédure en termes orientés-objets facilite non seulement la programmation, mais permet également de structurer les opérations et quelquefois même, d'éviter la programmation de certaines tâches envisagées au départ.

Le présent chapitre explicite en termes orientés-objets quelques grandes procédures de planification typiques à la modélisation totalement désagrégée (logiciel MADITUC et dépendants) en les assimilant à des séries de méthodes imbriquées appliquées sur les objets individuels et collectifs. Les extraits de code sont présentés ici en syntaxe française, pour plus de clarté; le lecteur comprendra que la transposition informatique de ce code s'effectue habituellement en syntaxe anglaise. Dans les exemples de code, l'emploi de la lettre majuscule en début de mot indique la dénomination d'une classe d'objets (*Déplacement*, *Itinéraire*, etc.). La présence du pluriel (lettre "s") à ces objets indique la collection (*Déplacements* = collection de déplacements).

8.1 Affectation des déplacements

Dans l'approche totalement désagrégée, le choix de court-circuiter la procédure séquentielle classique (jugée simplificatrice) a conduit à la mise en place d'une série de méthodes permettant de mener à bien une affectation individuelle sur le réseau de transport collectif de tous les déplacements déclarés lors d'une enquête origine-destination. La présente section dresse l'appariement objet des étapes d'extraction, de validation, de simulation (accès et calcul de chemin) et de chargement.

8.1.1 Extraction

La procédure d'extraction consiste à créer des objets itinéraires à partir de données d'enquêtes origine-destination. Pour ce faire, l'objet *Enquête*, explicité dans le chapitre 7, est associé à la méthode *ExtraireItinéraires*. Cette méthode transforme les objets déplacements de l'enquête en itinéraires contenant les points de départ et d'arrivée, la déclaration des lignes empruntées et d'autres indicateurs pertinents. Dans le Tableau 8.1, des instructions "*Pour chaque*" imbriquées sont utilisées afin de sélectionner les déplacements à extraire. À noter la méthode *its.Ajouter*, qui permet d'ajouter les itinéraires à la collection. L'extraction d'objets *Déplacement* répond à certains critères de choix axés sur les localisations, l'âge, le sexe, la chaîne de déplacements, les modes, les motifs ou toute autre condition.

Tableau 8.1: Méthode *ExtraireItinéraires*

Tableau 8.1: Méthode ExtraireItinéraires

```

Méthode Enquête.ExtraireItinéraires(paramètres) comme Collection d'Itinéraires
Définir men comme Ménage, per comme Personne, dep comme Déplacement,
    it comme Itinéraire, its comme Collection d'Itinéraires
Soit its = Rien
Pour chaque men dans Enquête
    Pour chaque per dans men.Personnes
        Pour chaque dep dans per.Déplacements
            Si dep répond aux critères selon paramètres
                Soit it = Rien
                it.Origine = dep.Origine
                it.Destination = dep.Destination
                it.Lignes = dep.SequenceLignes 'etc.
                its.Ajouter it
            Fin Si
        dep Suivant
    per Suivant
men Suivant
Soit ExtraireItinéraires = its
Fin Méthode

```

8.1.2 Validation

La méthode *Itinéraires.Validation* est appliquée à la collection d'itinéraires. Elle appelle la méthode *Itinéraire.Valider* pour chacun des itinéraires de collection. Celle-ci a un double rôle: 1) vérifier la validité des séquences de lignes déclarées (existence de la ligne, correspondances possibles) et 2) déterminer les nœuds d'accès au réseau et de descente à destination. Pour ces deux opérations, la présence de l'objet *RéseauTC*, dont le montage résulte d'opérations de codification interactives graphiques, est nécessaire. Le Tableau 8.2 présente la méthode *Validation* et ses sous-méthodes. À noter que les nombreux paramètres liés à cette méthode (tel que les distances de marche permises, et les poids des temps de la fonction d'impédance) ne sont pas explicités ici.

La méthode *VérifierLignes* s'assure que les lignes et les correspondances déclarées dans la propriété *Itinéraire.Lignes* existent dans le réseau de transport collectif donné en argument. La méthode *DéterminerNoeud* retourne le nœud de transport collectif permettant de desservir le point de localisation passé en argument (origine ou destination). La méthode *Accès* (voir 8.1.3) utilise une procédure semblable. Dans MADITUC, les itinéraires retenus à la suite de la méthode *Validation* sont dits "décrits".

Tableau 8.2: Méthode Validation et ses dépendants

```

Méthode Itinéraires.Validation(res comme Réseau, paramètres) comme Collection
d'Itinéraires
  Définir it comme Itinéraire, its comme Collection d'itinéraires
  Soit its = Rien
  Pour chaque it dans Itinéraires
    Soit it = it.Valider(res, paramètres)'Voir autre méthode ci-dessous
    Si it Existe alors its.Ajouter it 'ne retient que les itinéraires valides
  it Suivant
  Soit Validation = its
Fin Méthode

Méthode Itinéraire.Valider(res comme RéseauTC, paramètres) comme Itinéraire
  Soit Itinéraire = Itinéraire.VérifierLignes(res)
  Si Itinéraire Existe alors
    Itinéraire.NoeudOrigine = res.DéterminerNoeud(Itinéraire.Origine, paramètres)
    Itinéraire.NoeudDestination = res.DéterminerNoeud(Itinéraire.Destination,
    paramètres)
  Fin Si
  Soit Valider=Itinéraire
Fin Méthode

```

8.1.3 Simulation

Le cas échéant où l'on désire simuler les itinéraires sur le réseau de transport collectif à partir d'origines et de destinations plutôt qu'utiliser les déclarations, comme dans le cas de l'impact d'une modification sur le réseau, il suffit de substituer à la propriété *Itinéraire.Lignes* une séquence calculée en fonction du réseau de simulation. Pour ce faire, une procédure d'accès est d'abord nécessaire à la détermination des nœuds d'accès et de débarquement au réseau selon des paramètres établis. La méthode *Chemin* est ensuite utilisée pour calculer des chemins de transport collectif en termes de sections de lignes TC permettant de relier chaque combinaison de nœuds d'accès et de destination. La méthode *Diversión* (non explicitée ici) permet de répartir les flots sur les chemins, dans le cas où plusieurs chemins seraient concurrents entre deux points.

La méthode *Réseau.Accès* peut comporter des variantes intéressantes. En effet, plutôt qu'un simple accès à vol d'oiseau (en ligne droite), il est possible de considérer l'effet de barrières physiques (voie ferrée, autoroute, cours d'eau) empêchant l'accès à certains nœuds. Pour les systèmes d'information à l'usager, il est nécessaire que la

méthode d'accès tiennent compte des conditions réelles du terrain; un calcul de chemin sur réseau de marche est alors nécessaire pour déterminer le ou les nœuds d'accès.

Tableau 8.3: Méthodes de simulation

```

Méthode Itinéraires.Simulation(res comme Réseau, paramètres) comme Collection
d'Itinéraires
  Définir its comme Itinéraire, its comme Collection d'itinéraires
  Soit its = Rien
  Pour chaque it dans Itinéraires
    its.Ajouter it.Simuler(res, paramètres) 'Voir autre méthode ci-dessous
  it Suivant
  Soit Simulation = its.Diversion
Fin Méthode

Méthode Itinéraire.Simuler(res comme RéseauTC, paramètres) comme Collection d'itinéraires
  Définir its comme Collection d'itinéraires, nod1 comme NoeudTC, nod2 comme NoeudTC
  Soit its = Rien
  Itinéraire.NoeudsOrigine = res.Accès(Itinéraire.Origine, nbO, paramètresO)
  Itinéraire.NoeudsDestination = res.Accès(Itinéraire.Destination, nbD, paramètresD)
  Pour chaque nod1 dans Itinéraire.NoeudsOrigine
    Pour chaque nod2 dans Itinéraire.NoeudsDestination
      its.Ajouter res.CalculerChemin(nod1, nod2, paramètres) 'Calcul de chemin sur
      réseau TC avec fonction d'impédance
    nod1 Suivant
  nod2 Suivant
Fin Méthode

Méthode Réseau.Accès(li comme Lieu, nombre, paramètres) comme NoeudsTC
  Définir nods, nods2 comme Collection de NœudsTC
  Pour chaque nod dans RéseauTC.NœudsTC
    Selon paramètres 'Tenant compte des barrières, du réseau de marche ou de tout
    autre considération
      nods.Ajouter nod, paramètres
    Fin Selon
  nod Suivant
  Soit nods2 = ConserverNoeuds(nods, nombre, paramètres) 'Nœuds à conserver selon
  nombre et paramètres
  Soit Accès = nods2
Fin Méthode

```

8.1.4 Chargement

La méthode chargement consiste à affecter les itinéraires décrits ou simulés sur le réseau de transport collectif en vue de produire des statistiques d'achalandage par nœud ou par ligne, des profils de charge, des itinéraires désagrégés ou tout autre résultat concernant l'effet des déplacements sur le réseau. La méthode se sert des propriétés *Lignes* et *Nœuds* de l'objet *Itinéraire* pour associer un flot à chacune des sections de lignes du réseau de transport collectif, ce qui permet d'interroger après coup chaque objet du réseau de façon individuelle pour en obtenir de l'information désagrégée. Le Tableau 8.4 présente ce que pourrait représenter une méthode telle

que *Chargement* en orienté-objet: détermination des sections de lignes pour chaque itinéraire, et cumul de références objets permettant de faire des analyses *a posteriori*.

Parmi les principales caractéristiques de la méthode *Chargement*, citons le traitement individuel de chaque itinéraire et de chaque ligne de cet itinéraire, une sous-méthode permettant de déterminer les sections de lignes touchées, et l'association des itinéraires à ces sections. Cette opération ouvre la porte au calcul d'une foule de statistiques sur les montants et descendants, les volumes à chaque point, les temps moyens, le nombre de sections empruntées, les correspondances, etc. (tel que proposé dans MADITUC). Ces statistiques sont calculées à partir d'une collection d'itinéraires, tel que démontré au Tableau 8.5. Par association objet, il est même possible de remonter jusqu'aux personnes et aux ménages pour peaufiner l'analyse.

Tableau 8.4: Méthode de chargement

```
Méthode Réseau.Chargement(its comme Itinéraires)
  Définir sct comme SectionLigneTC, lig comme LigneTC
  Définir it comme Itinéraire, cpt comme Entier
  Pour chaque it dans its
    ...
    cpt=0
    Pour chaque lig dans it.Lignes
      cpt=cpt+1
      Soit sct = lig.DéterminerSection(it.Nœuds(cpt), it.Nœuds(cpt+1))
      ...
      sct.Itinéraires.Ajouter it
    ...
    lig Suivant
  it Suivant
Fin Méthode
```

Tableau 8.5: Méthode de statistiques sur les noeuds

```
Méthode Réseau.Stator(its comme Itinéraires)
  Définir scts comme Collection de Sections, its comme Collection de Itinéraires
  Définir it comme Itinéraire, nod comme NoeudTC
  Soit Réseau = Réseau.Chargement(its)
  Pour chaque nod dans Réseau.NoœudsTC
    ...
    Soit scts = nod.DéterminerSections 'Détermine une collection de sections associées
    à un nœud particulier
    ...
    Pour chaque sct dans scts
      Pour chaque it dans sct.Itinéraires
        its.Ajouter it 'Construction d'une collection d'itinéraires associés
      it Suivant
    sct Suivant
    ...
    its.CalculerStatistiques
  nod Suivant
Fin Méthode
```


8.2 Modèles prévisionnels axés sur la socio-démographie

L'examen individuel des déplacements proposé au sein de l'approche totalement désagrégée a permis de passer à des modèles prévisionnels dits désagrégés, basés sur les caractéristiques socio-démographiques et de mobilité des individus en présence. Une fois les dimensions démographiques, de mobilité et de spatialité (désagrégation spatiale) mis en présence, l'approche est en mesure de prédire les comportements futurs de mobilité de façon beaucoup plus fine que les modèles classiques, basés sur des prévisions agrégées.

8.2.1 Prévision de la demande

Le modèle de prévision de la demande de transport MADEDE est fondé sur l'examen approfondi des tendances en ce qui concerne l'évolution démographique de la population, les comportements des clientèles, la répartition spatiale des déplacements et d'autres facteurs dont les quelques lignes de code présentées ici ne sauraient rendre grâce. Cependant, contrairement aux modèles agrégés, les hypothèses sont appliquées ici à chacun des individus (ménage, personne) et non à l'ensemble. Une série de facteurs correctifs k sont appliqués au facteur d'expansion de chaque déplacement afin de refléter ses poids actuels et futurs. Les résultats d'un tel exercice, réagrégés, risquent de coller beaucoup plus aux attentes qu'une équation unidimensionnelle. Le Tableau 8.8 présente la méthode d'application du modèle de prévision de la demande, une fois les hypothèses tendanciennes posées. On y retrouve les méthodes pour déterminer les facteurs k ainsi que leur application individuelle sur les ménages, les personnes et les déplacements. L'instruction "*Pour année*" indique le caractère itératif de l'application du modèle.

8.2.2 Répartition modale

Le modèle de répartition modale à seuils incrémentaux (MADMODAL) est fondé sur la détermination des gains de temps amenés par une amélioration au réseau de transport collectif. Chaque itinéraire est chargé (méthode Chargement) sur les réseaux de

référence et modifiés afin de vérifier le gain de temps qui y est associé. La décision de transfert modal repose ensuite sur l'application d'une fonction de répartition, si un seuil suffisant est atteint. Cela engendre la création de deux nouveaux itinéraires, un sur le transport collectif et un bi-modal (avec point de jonction le plus probable à l'origine en pointe du matin). Les facteurs d'expansion de ces trois itinéraires sont ajustés afin de maintenir le poids initial de l'ensemble.

Tableau 8.6: Méthode de statistiques sur les nœuds

```

Méthode Enquête.PrévisionDemande
Définir men comme Ménage, per comme Personne, dep comme Déplacement
Définir annee comme Entier, delta comem Entier
Pour année = 1993 à 2011 Saute delta
  Pour chaque men dans Enquête
    Pour chaque per dans men.Personnes
      Pour chaque dep dans per.Deplacements
        kdem = per.Déterminer_kdem(année) 'Déterminer le facteur pour la
        démographie
        kmot = men.Déterminer_kmot(année) 'Déterminer le facteur pour la
        motorisation
        -
        dep.FExpansion(année) = dep.Fexpansion(année-delta) * kdem * kmot * ..
        -
      dep Suivant
    per Suivant
  men Suivant
année Suivante
Fin Méthode

```

Tableau 8.7: Méthode de répartition modale par seuils incrémentaux

```

Méthode RépartitionModale(ColIt comme Collection d'Itinéraires) comme Collection
d'itinéraires
Définir Itref, Itmod, ItrefTC, ItrefBiModal comme Itinéraire, its comme Collection
d'itinéraires
ColItref = RéseauTC.Chargement(ColIt)
ColItmod = RéseauTCModifié.Chargement(ColIt)
Pour chaque itref dans ColItref
  Itmod = ColItMod(itref.Iperef) 'En supposant deux collections semblables
  Delta = itmod.TempsTotalTC - itref.TempsTotalTC
  Si delta > ValeurSeuil et itref.Deplacement.Mode = mdAuto alors
    ItrefTC = Itref.CréerCopie
    ItrefTC.Deplacement.Mode = mdModeTC
    ItrefTC.Fexpansion = Itref.FExpansion * FonctionRépartitionTC(delta)
    its.Ajouter ItrefTC
    ItrefBiModal = Itref.CréerCopie
    ItrefTC.Deplacement.Mode = mdBiModal
    ItrefBiModal.Fexpansion = Itref.Fexpansion * FonctionRépartitionBiModal(delta)
    ItrefBiModal.Jonction = ItrefBiModal.Deplacement.Origine.DeterminerJonction
    its.Ajouter ItrefBiModal
    Itref.Fexpansion = Itref.Fexpansion - ItrefTC.Fexpansion -
    ItrefBiModal.Fexpansion
  Fin Si
  its.Ajouter itref
itref Suivant
Soit RépartitionModale = its
Fin Méthode

```

8.3 Statistiques agrégées

8.3.1 Compilations de statistiques sur la mobilité

La compilation de statistiques de mobilité dans le cadre de l'approche totalement désagrégée s'effectue par l'examen individuel des ménages, personnes et déplacements du fichier d'enquête origine-destination, auxquels sont appliquées des procédures d'agrégation spatiale en secteurs ou en régions. Les déplacements y sont catégorisés et compilés selon les origines (provenance d'un secteur), destinations (vers le secteur), internes (déplacements effectués à l'intérieur du secteur) et résidants (effectués par les résidants).

Tableau 8.8: Méthode de compilation de statistiques agrégées sur la mobilité

```
Méthode CompilerStatistiquesAgregées(enq comme EnquêteOD, dic comme Dictionnaire, fichxls
    comme ClasseurExcel)
    Définir men comme Ménage, per comme Personne, dep comme Déplacement
    NbSecteurs = Dictionnaire.Compte
    Définir MenEOD(NbSecteurs) comme Collection de Ménages
    Définir PerEOD(NbSecteurs) comme Collection de Personnes
    Définir OrigEOD(NbSecteurs) comme Collection de Déplacements
    Définir DestEOD(NbSecteurs) comme Collection de Déplacements
    Définir InteEOD(NbSecteurs) comme Collection de Déplacements
    Définir RésiEOD(NbSecteurs) comme Collection de Déplacements
    Pour chaque men dans enq.Ménages
        secteuragregé = dic.UesAZone(men.Domicile.Ues)
        MenEOD(secteuragregé).Ajouter men
    Pour chaque per dans men.Personnes
        secteuragregé = dic.UesAZone(men.Domicile.Ues)
        PerEOD(secteuragregé).Ajouter per

    Pour chaque dep dans per.Déplacements
        sorig = dic.UesAZone(dep.Origine.Ues)
        sdest = dic.UesAZone(dep.Destination.Ues)
        sdomi = dic.UesAZone(men.Domicile.Ues)
        OrigEOD(sorig).Ajouter dep
        DestEOD(sdest).Ajouter dep
        Si sorig=sdest Alors
            InteEOD(sorig).Ajouter dep
        Fin Si
        RésiEOD(sdomi).Ajouter dep
    dep Suivant
    per Suivant
    men Suivant
    Pour t = 1 à nbsecteurs
        MenEod(t).FabriquerRapportMénages(fichxls)
        PerEod(t).FabriquerRapportPersonnes(fichxls)
        OrigEod(t).FabriquerRapportDéplacements("ORIGINES", fichxls)
        DestEod(t).FabriquerRapportDéplacements("DESTINATIONS", fichxls)
        InteEod(t).FabriquerRapportDéplacements("INTERNES", fichxls)
        RésiEod(t).FabriquerRapportDéplacements("RÉSIDENTS", fichxls)
    t Suivant
Fin Méthode
```

La méthode orientée-objet consiste à identifier des objets à analyser en vertu du découpage territorial, à les regrouper en collections pour ensuite cibler des sous-méthodes spécifiques à chacune de ces collections afin d'obtenir des statistiques particulières sur l'âge, le sexe, les modes, les motifs, etc.

L'objet *Dictionnaire* sert de lien d'agrégation entre la propriété *Ues* (unité élémentaire de surface) des objets lieux et le numéro de zone en vertu du découpage demandé. Les méthodes de type *FabriquerRapport...* sont appliquées aux collections en présence après compilation.

8.3.2 Statistiques sur les générateurs de déplacements

Une procédure similaire aux statistiques sur la mobilité par secteur peut être appliquée pour les générateurs de déplacements. La construction des objets générateurs peut se faire soit en parcourant individuellement les déplacements, soit en utilisant une liste prédéfinie (voir La création de l'objet Générateur, en 7.6.4). Pour la compilation des statistiques, on parcourt l'enquête afin d'associer à chaque générateur une collection de déplacements, ce qui permet à la suite de reprendre les méthodes de calcul de statistiques appliquées sur cette collection dans le Tableau 8.8.

Tableau 8.9: Méthode de compilation de statistiques agrégées sur la mobilité

```
Méthode CompilerStatistiquesGenerateurs(enq comme EnquêteOD, colGen comme Collection de
    Générateurs, fichxls comme ClasseurExcel)
    Définir men comme Ménage, per comme Personne, dep comme Déplacement, gen comme
    Générateur
    Pour chaque men dans Enquête
        Pour chaque per dans men.Personnes
            Pour chaque dep dans per.Deplacements
                Si dep.Destination EstDans colGen
                    Soit gen = colGen(dep.Destination)
                    gen.Deplacements.Ajouter dep
                Fin Si
            dep Suivant
        per Suivant
    men Suivant
    Pour chaque gen dans colGen
        gen.Deplacements.FabriquerRapportDéplacements("Générateur " & gen.Nom, gen.mcdgen)
    gen Suivant
Fin Méthode
```

8.4 Procédures avancées

La constante progression de l'abacule des méthodes orientées-objets offre des possibilités d'analyse étendues, notamment lorsqu'il s'agit d'étudier des questions traditionnellement non traitées par les planificateurs de transport.

8.4.1 Effets de débordement (ressources consommées)

Cette thèse ne s'attardera pas ici sur la question des effets de débordement causés par un financement inéquitable des services et infrastructures de transport collectif dans une grande région métropolitaine. L'approche totalement désagrégée peut contribuer au débat en déterminant de façon objective et systématique la part de chaque réseau utilisé par chaque usager. Le calcul des ressources consommées peut être effectué à partir de données d'enquêtes origine-destination (téléphonique, à bord ou autres) à l'aide des méthodes énoncées précédemment, telle que *Réseau.Chargement*.

Tableau 8.10: Méthode de statistiques sur les noeuds

```
Méthode Réseau.DéterminerUsage(its comme Itinéraires)
Définir scs comme Collection de Sections, its comme Collection de Itinéraires
Définir it comme Itinéraire, lig comme LigneTC
Soit Réseau = Réseau.Chargement(its)
Pour chaque lig dans Réseau.Lignes
  Pour chaque it dans lig.Itinéraires 'les itinéraires ayant été associés aux lignes
    lors du chargement
      CueillirInfo it.Personne 'Recueillir de l'information sur la personne associée,
        dont le lieu de domicile
      CalculerStats it.Sections(lig.Index) 'Calculer des statistiques concernant la
        section de ligne touchée par l'itinéraire
    it Suivant
  lig Suivant
Fin Méthode
```

8.4.2 Information à l'usager (calcul de chemins)

Le calcul interactif de trajets de transport collectif destiné à l'usager dans le cadre des activités d'un centre de renseignements téléphonique d'une société de transport est une procédure qui bénéficie d'un amalgame de méthodes développées au fil des ans dans le cadre de l'approche totalement désagrégée. La transposition de ces activités en langage objet facilite l'interfaçage et le rendu du résultat. Le Tableau 8.11 présente les méthodes nécessaires à son élaboration. La méthode *Territoire.DéterminerLieu* se

charge du mode de spécification des lieux d'origine et de destination: carte, fichiers de géoréférences, références opérationnelles (arrêts, nœuds) ou autres (résultats d'un autre calcul). La méthode *RéseauMarche.AccèsMarche* effectue un calcul de chemin sur le réseau de marche pour déterminer les itinéraires de marche pour se rendre aux nœuds d'origine et de destination. La méthode *Réseau.CalculerChemin* utilise ensuite les nœuds extrémités de ces itinéraires de marche pour calculer le chemin de transport collectif. Le tout fait ensuite l'objet d'une méthode générale *Habillage*, qui bonifie l'information avant de la rendre à l'utilisateur.

Tableau 8.11: Méthode de calcul de chemins dans le cadre d'un système d'information à l'utilisateur

```
Méthode Réseau.CalculerChemin (terr as Territoire)
  Définir lieuO as Lieu, lieuD as Lieu, it as ItinéraireTC, itmO as ItinéraireMarche,
    itmD as ItinéraireMarche
  Soit lieuO = terr.DéterminerLieu 'Déterminer à l'aide d'une interface les points
    d'origine et de destination
  Soit lieuD = terr.DéterminerLieu
  ...
  Soit itmO = RéseauMarche.AccèsMarche(lieuO, nombre, paramètres)
  Soit itmD = RéseauMarche.AccèsMarche(lieuD, nombre, paramètres)
  ...
  Soit it = Réseau.CalculerChemin(itmO.DernierNoeud, itmD.PremierNoeud, paramètres)
  ...
  Habillage itmO, itm, itmD
Fin Méthode
```

CONCLUSION

Cette thèse a présenté l'approche totalement désagrégée et orientée-objet en planification des transports urbains. Par une revue de littérature, une définition des concepts orientés-objets en transport et des expérimentations touchant l'offre et la demande, elle a démontré la faisabilité et la nécessité de coupler une approche orientée-objet à la modélisation totalement désagrégée existante.

Les méthodes de planification des transports n'ont guère changé depuis les dernières décennies. D'un côté, les praticiens utilisent des modèles essentiellement agrégés et de l'autre, certains chercheurs font de la modélisation désagrégée du comportement des personnes. À cet égard, on perçoit une certaine évolution des modèles mathématiques utilisés, notamment l'utilisation de réseaux neuraux, des approches "fuzzy" et d'autres nouvelles pratiques. Cependant, l'esprit analytique initial, centré sur la procédure séquentielle classique, demeure présent. Quelques chercheurs et praticiens se sont intéressés à la modélisation totalement désagrégée développée dans le contexte montréalais. Cependant, l'approche tarde à percer, notamment à cause d'une certaine incrédulité face aux possibilités de transposition de la méthode à des contextes urbains où les données se font rares.

Les systèmes d'information géographiques (SIG) ont pour leur part connu un essor fulgurant, notamment à cause de l'évolution technologique des supports logiciels et matériels. L'usage des SIG, qui devient généralisé chez les organismes de transport, est également supporté par la disponibilité, surtout aux États-Unis, de données géographiques gouvernementales "gratuites", quoique de qualité inégale. Cependant, malgré toutes ces percées au niveau informationnel, les SIG semblent toujours désadaptés face aux modèles de transport. Ce que plusieurs n'osent dire, c'est que les modèles agrégés classiques supportent mal la très grande quantité de données offertes au sein des SIG, d'autant plus que les planificateurs peuvent maintenant examiner de visu, à l'aide de l'outil, les erreurs d'approximation engendrées par l'application de leurs modèles. D'autre part, les instruments de planification des

transports fondés sur l'approche totalement désagrégée ont résisté à la vague des SIG. En fait, ils les ont même intégrés naturellement puisqu'ils ont toujours été basés sur la donnée individuelle face au modèle (notion d'*informodèle*).

Il existe beaucoup de disciples de l'approche orientée-objet, et ce dans plusieurs sphères scientifiques. Les concepts de classes, méthodes et propriétés prennent différentes formes et appellations selon les auteurs, mais l'esprit méthodologique demeure sensiblement le même: créer des objets, les caractériser et les mettre en relation afin de constituer un système. Les applications orientées-objet demeurent cependant essentiellement informatiques, notamment parce qu'on a vite su y trouver des avantages dans les environnements de programmation et de stockage des données. L'effet structurant des langages de programmation a d'ailleurs influencé plus d'une approche de modélisation. En transport, les quelques applications orientées-objet visent essentiellement l'encadrement des données dans des programmes et modèles existants, ce qui n'est cependant pas à rejeter vu l'importance capitale de l'accès à l'information sous une forme conviviale à tout niveau de modélisation. Dans ce contexte -- méthodes agrégées, systèmes informationnels en évolution, instruments émergents, programmation orientée-objet -- l'approche orientée objet et totalement désagrégée tente de contribuer à l'avancement des méthodes de planifications des transports de multiples façons.

Clarifier les enjeux. La première expérimentation visait à démontrer l'applicabilité de l'approche préconisée à divers domaines de la planification des transports par la fabrication de modèles-objets. Ces derniers sont des instruments équivoques présentant des objets de transport impliqués dans un problème ainsi que les relations qui les lient entre eux. Ces expérimentations ont également permis, par l'utilisation ou non de logiciels associés, de dissiper les doutes concernant l'insécabilité de la programmation et de la modélisation dans l'application de la méthodologie orientée-objet:

- Le modèle-objets se consulte de façon intuitive et naturelle, il est indépendant du processus de modélisation et du code de programmation;
- Les objets conceptualisés se transposent *a posteriori* en code informatique pour usage dans diverses applications.
- L'interrogation des propriétés des objets et l'application de méthodes se fait plus aisément dans un code programmé orienté-objet.

Une petite réserve cependant: il existe dans ces applications une séparation entre les données stockées (fichiers et tables) et les objets en mémoire, ce qui nécessite l'ajout de procédures d'interfaçage (lecture et écriture des données).

Appliquer des méthodes sur les réseaux et enrichir l'information. Le chapitre 6 (Propriétés et méthodes associées à des réseaux de transport viaire et collectif) visait à expliciter en quoi l'approche préconisée peut pallier l'absence "apparente" de données dans l'application des modèles. Le montage d'un réseau de voirie en milieu urbain représente généralement un casse-tête sans fin puisque l'objet modélisé et ses milliers d'objets dépendants changent sans cesse de valeurs de propriétés. Il est en effet difficile d'imaginer la représentation complète d'un territoire en constante évolution. L'approche orientée-objet offre, par son caractère évolutif et adaptatif, une réponse favorable à l'ajout de nouvelles données sans affecter l'utilisation des propriétés et méthodes existantes. Dans le cas du réseau de transport collectif, l'approche compte sur les acquis de la modélisation totalement désagrégée dans l'exploitation de l'information. Le logiciel MADTOO est le résultat expérimental d'un montage simultané de réseaux viaire et collectif dans l'optique d'une superposition amenant un transfert de propriétés. Cet échange d'attributs est un fait rare en transport, où les systèmes et instruments tendent à maintenir leurs propres données de référence. Les expérimentations réalisées à cet effet dans le cadre montréalais avec MADTOO démontre la possibilité d'effectuer la fusion des réseaux dans l'espoir de procéder à des échanges.

L'utilisation de l'approche floue, relative au développement du centre de renseignement de la STCUM, repose ici sur des expérimentations effectuées en parallèle à l'implantation du système MADPREP par le groupe MADITUC. L'approche floue pourrait être perçue comme une preuve d'impuissance de la part du concepteur qui ne peut pas déterminer à l'avance tous les tenants et aboutissants du système à développer. Cependant, aucun système d'information dotée d'une telle complexité ne saurait être complètement modélisé à priori. Les technologies informationnelles évoluent trop rapidement pour faire l'objet d'une approche prévisionnelle classique; un horizon de deux ans représente maintenant ce qu'était une décennie il y a quelques années. D'où l'importance de monter des modèles-objets indépendants de la technologie employée et d'appliquer une approche floue en vue de développer l'information qui doit s'y trouver.

Décortiquer les données de demande et fabriquer de l'information. Le chapitre 7 (Propriétés et méthodes liées à la demande de transport) a décrit diverses propriétés et méthodes relatives à la demande de transport en milieu urbain. Vu le contexte montréalais, l'attention a été portée sur les données des grandes enquêtes origine-destination, qui ont le mérite de décrire la demande de transport des personnes dans ses aspects de mobilité, de socio-démographie et d'utilisation de l'offre. Par l'attribution de propriétés et de méthodes aux objets Ménage, Personne et Déplacement, l'approche orientée-objet constitue une suite naturelle à l'esprit de la modélisation totalement désagrégée. D'une part, le traitement de l'objet individuel y a été clairement exprimé. D'autre part, la constitution de collections d'objets provenant soit de groupes homogènes (personnes d'un ménage), d'agrégations spatiales ou de tout autre regroupement a été expérimenté, avec l'application des méthodes associées (qui diffèrent de celles de l'objet individuel). Les méthodes de visualisation et de traitement des données spatialisées ont fait l'objet d'une insistance particulière, bien que ces méthodes s'appliquent à tous les genres d'objets (y compris ceux de l'offre). En transport, la visualisation de l'information est une action à privilégier; c'est à ce que sont en partie voués les systèmes d'information géographique. Cependant, les SIG ne peuvent pas, par leur structure topologique rigide, engendrer autant de représentations

éclectiques qu'un tableur comme Excel, couplé à une analyse orientée-objet, est en mesure de produire pour un seul objet de transport. Le traitement des données spatialisées, pour sa part, est habituellement bien maîtrisé par les SIG; cependant, le danger se situe au niveau des opérations d'agrégation et de désagrégation. Ces actions, tout comme la détermination de propriétés pseudo-géométriques (non déterminées par la géométrie intrinsèque au SIG), tirent profit d'une modélisation par objets. Le logiciel MADAME, créé pour la cause, visait trois objectifs expérimentaux:

- Le montage du modèle-objets d'une enquête origine-destination à partir d'extraits du fichier de données.
- Le montage interactif de rapports d'analyse, soit l'agencement contrôlé de propriétés et méthodes appliquées à des objets individuels et à des collections.
- L'application itérative, récursive et en cascade de ces méthodes sous diverses formes (descriptive, de compilation, tabulaire, graphique, cartographique).

La dernière section du chapitre 7 visait à démontrer la possibilité de créer de nouveaux objets à partir de l'information existante. Les notions de statut et d'activité ont déjà été traitées dans le cadre de l'approche totalement désagrégée, leur rappel dans le cadre d'une approche orientée-objet se veut prédictive des possibilités de recherche futures.

Intégration des modèles complexes. Le chapitre 8 (Application de l'approche orientée-objet à la modélisation totalement désagrégée) a exemplifié les possibilités d'utiliser les méthodes développées lors des expérimentations précédentes pour la construction de modèles d'une complexité supérieure, tel que l'affectation de déplacements désagregés sur un réseau de transport collectif.

Autres contributions. Cette recherche apporte d'autres contributions à certains points précis de la planification des transports:

- Il s'agit d'une façon originale d'appliquer une méthodologie générique au domaine des transports.

- Elle engendre des outils qui utilisent des classes programmées d'objets de transport.
- Elle présente une classification des objets de transport en quatre métaclassees différenciées et exemplifiées (dynamique, cinétique, statique et systémique) comportant leurs propriétés et méthodes intrinsèques.
- Elle démontre la continuité de l'approche totalement désagrégée dans l'approche orientée-objet.

Insertion. À la suite de toutes ces expérimentations, plusieurs commentaires s'imposent quant à la présence et l'insertion de la modélisation orientée-objet et totalement désagrégée parmi les méthodes et instruments de planification des transports urbains. Le montage d'un modèle-objets n'est pas une tâche facile pour un professionnel planificateur de transport. Il est difficile de laisser tomber les contraintes mathématiques, les tabous liées aux bases de données, les contraintes de programmation et les préjugés tenaces du milieu vis-à-vis l'organisation des données afin de monter, en toute liberté, un modèle constitué d'objets dont quelques-uns auront été définis à l'avance, et certains en cours de montage.

Si l'approche orientée-objet peut *a priori* s'accorder le mérite de pouvoir répliquer les modalités des modèles classiques tel que la procédure séquentielle classique, elle peut cependant contribuer à l'avènement de transparence dans le processus par les méthodes d'examen individuel, de visualisation, d'interrogation tacite et de manipulation d'information. Le fait qu'elle puisse intégrer la modélisation traditionnelle en fait une approche utilisable pour la planification stratégique à long terme. La linéarité des modèles mathématiques traditionnels (données → calculs → résultats) ne résiste pas aux préceptes de la méthodologie orientée-objet, où l'on compte sur des objets (acteurs) pour agir en relation de façon interactive, itérative, récursive et multidimensionnelle. La modélisation totalement désagrégée et orientée-objet compte sur les instruments pour enrichir les données et les transformer en information,

contrairement au paradigme agrégé traditionnel, où les instruments ne servent qu'à appliquer les modèles prédéfinis.

L'application d'une approche orientée-objet "non programmatique" aux transports est intéressante car elle implique la création d'objets qui existent dans les contextes spatial et temporel, ce qui est plutôt rare puisque la plupart des problèmes scientifiques sont approchés sur une base événementielle (temporelle) ou spatiale. Il serait impensable, lors d'une modélisation orientée-objet, de décider à l'avance de tous les acteurs en cause, de toutes leurs propriétés, de toutes leurs méthodes et de toutes les relations entre eux. C'est justement cette "finalité prédéterminée" que l'on reproche aux modèles classiques, avides de données (valeurs des variables) mais pas d'information (signification de la donnée). L'utilisation d'une approche orientée dans le domaine des transports nous amène à découvrir l'ontologie des objets. En effet, tous savent ce qu'est une personne humaine (qui existe), mais se pose-t-on cette question d'existence lorsqu'on est amené à modéliser les comportements d'une personne dans un système de transport? Dans les modèles classiques, tout élément est caché sous une représentation mathématique. Ce faisant, on évite tout recours à la réification des objets dans le système. Somme toute, l'approche orientée-objet, tout comme l'approche totalement désagrégée, ne sert pas exclusivement à la modélisation proprement dite. Elle est destinée à occuper une place de choix dans toutes les activités du praticien: simulation, observation, analyse, planification et enfin, modélisation.

Apports actuels. Les quelques expérimentations décrites jusqu'à maintenant ont déjà commencé à influencer les exercices de modélisation et de planification de l'auteur à divers égards. Certains instruments développés à l'occasion d'activités de recherche bénéficient d'une modélisation orientée-objet. Ces applications touchent les systèmes d'information géographique, les systèmes d'information à l'usager, la conception de sites INTERNET et les méthodes d'analyses de données de transport.

Recherches futures. Certaines questions soulevées dans cette thèse feront surface dans d'autres projets de recherche en vue de poursuivre l'examen approfondi des

tenants et aboutissants d'une approche orientée-objet en transport. Parmi les sujets les plus intéressants, citons:

- La recherche sur l'application de l'approche floue dans la complétion d'information sur la demande, les réseaux et le territoire.
- La recherche sur les patrons de déplacements, notamment dans l'analyse fine des données d'une grande enquête origine-destination et la création de nouveaux objets en découlant, tel que les générateurs de déplacements.
- La recherche sur les méthodes de fusion des réseaux de hiérarchie et fonctions différentes en vue d'opérer des transferts de propriétés.
- La recherche sur l'utilisation des objets "arbre" en tant qu'éléments de planification interactive et d'analyse des réseaux de transport, pour l'accessibilité, l'indication des performances, l'évaluation des ressources, etc.

On peut difficilement douter de l'importance grandissante que prendront les systèmes informationnels, et notamment leur côté géographique, dans les organismes de transport au cours des prochaines années. Le développement fulgurant des technologies associées (ordinateurs, instruments de mesure, logiciels) ne sera pas stoppé. On peut donc miser, comme ce fut le cas dans d'autres domaines d'application scientifiques, sur la part majeure que pourra prendre l'approche de modélisation orientée-objet et totalement désagrégée dans le domaine des transports, dans un souci d'utilisation efficiente des ressources à la disposition du planificateur.

RÉFÉRENCES

- ADAMS, T., TANG, A. et WIEGAND, N. (1993), *Spatial Data Models For Managing Subsurface Data*, Journal Of Computing In Civil Engineering, Vol. 7, No 3, 16 pages.
- AFFUM, Joseph K. (1998), *Integration of Geographic Information Systems and Models for Transport Planning and Analysis*, 8th World Conference on Transport Research, Anvers, Belgique.
- ALLARD, Bruno et CHAPLEAU, Robert (1991), *MADIGAS: Système d'analyse interactif-graphique de MADITUC*, 26^e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Québec.
- ALLARD, Bruno, GRONDINES, Jocelyn et CHAPLEAU, Robert (1992), *SIGGAR: Système interactif et graphique de gestion et d'analyse des arrêts*, 27^e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Sherbrooke.
- ANDERSON, Michael D. et SOULEYRETTE, Reginald, *Geographic Information System-Based Transportation Forecast Model for Small Urbanized Areas*, Transportation Research Record no. 1551, Washington, DC.
- ATKINS, Stephen T. (1986), *Transportation planning models – what the papers say*, Traffic Engineering Control, pp. 460-467.
- AUBERT, J.-P. et DIX-NEUF, P. (1991), Conception et programmation par objets, Masson, Paris, 172 pages.
- BABIN, A., FLORIAN, M., JAMES-LEFEBVRE, L. et SPIESS, H. (1984), *EMME/2: Une méthode interactive-graphique pour la planification du transport urbain multimodal*, Routes et Transports, p. 22.

BAUGH, J. et REHAK, D.R. (1992), *Data Abstraction in Engineering Software Development*, Journal of Computing in Civil Engineering, vol. 6, no. 3, juillet 1992, pp. 282-301.

BEN-AKIVA, Moshe, BOWMAN, John L. et GOPINATH, Dinesh (1996), *Travel demand model system for the information era*, Transportation, volume 23, pp. 241-266.

BERARD, E.V. (1993), Essay on Object-Oriented Software Engineering, Volume 1, Prentice Hall.

BOCK, C. et ODELL, J., <http://www.intellicorp.com/ooieonline/relation1.html>

BONNEL, P., LE NIR, M. et NICOLAS, J.-P. (1993), Les enquêtes déplacements urbaines, École Nationale des Travaux Publics de l'État, Lyon.

BOOCH, G. (1991), Object-Oriented Design with Applications, Benjamin/Cummings.

CALIPER Corporation, TRANSCAD, User's Manual.

CHAPLEAU, R., ALLARD, B. et TRÉPANIÉ, M. (1996), *Transit Path Calculation Supported by a Special GIS-Transit Information System*, Transportation Research Board, Washington.

CHAPLEAU, R., ALLARD, B., TRÉPANIÉ, M. et LAVIGUEUR, P., (1996), *Origin-Destination Survey Data Dissemination in a Metropolitan Context: A Multimedia Experience*, Transportation Research Board, Washington.

CHAPLEAU, R., ALLARD, B., TRÉPANIÉ, M., ROUSSE, L., NADEAU, J., DESJARDINS, R. et TESSIER, G. (1995), *Système d'information à l'usager: SINCRAUTOBUS À LA S.T.C.U.M.*, 30^e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Hull, 19 pages.

CHAPLEAU, R., ALLARD, B., TRÉPANIÉ, M., TOUTANT, M. et GAUTHIER, B. (1996), *Gestion des parcours de déneigement à Laval: outil informationnel à saveur*

désagrégée, 31^e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Mont-Sainte-Anne.

CHAPLEAU, R. et TRÉPANIÉ, M., (1995) *Les logiciels multimédias pour amateurs*, L'informateur, volume 3, numéro 2, décembre 1995.

CHAPLEAU, R. et TRÉPANIÉ, M. (1994), *Méthodologie d'analyse multimodale des grands générateurs de déplacements: cas des hôpitaux de Montréal*, 29^e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Valleyfield, 19 pages.

CHAPLEAU, R. et TRÉPANIÉ, M. (1995), *Cas des hôpitaux de la grande région de Montréal: mobilité révélée par les enquêtes O-D, façon désagrégée*, Routes et Transports, automne 1995.

CHAPLEAU, R., TRÉPANIÉ, M. et ALLARD, B. (1996), *INTERNET et le multimédia: deux puissant outils de dissémination d'information en transport*, 31^e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Mont-Sainte-Anne.

CHAPLEAU, Robert (1992), *La modélisation de la demande de transport urbain avec une approche totalement désagrégée*, World Conference on Transportation Research, Lyon.

CHAPLEAU, Robert (1992), *Profil socio-économico-démographique du métro de Montréal: anatomie de la ville dans le voisinage du métro*, 27^e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Sherbrooke.

CHAPLEAU, Robert (1995), *MADECHET: L'allocation optimale des contrats de déchets sur micro-ordinateur*, 30^e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Hull.

CHAPLEAU, Robert (1995), *Symphonie d'usage des grandes enquêtes origine-destination, en totalement désagrégé majeur, opus Montréal 1987 et 1993*, Entretiens Jacques-Cartier.

CHAPLEAU, Robert, ALLARD, Bruno et Le BEAU, Louise (1986), *Embryon d'un système expert pour le transport collectif urbain*, 21^e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Québec.

CHAPLEAU, Robert, ALLARD, Bruno et TRÉPANIÉ, Martin (1996), *Transit Path Calculation Supported By A Special GIS-Transit Information System*, Transportation Research Board, Washington.

CHAPLEAU, Robert, ALLARD, Bruno, TRÉPANIÉ, Martin, TOUTANT, Michel et GAUTHIER, Benoît (1996), *Gestion des parcours de déneigement à Laval: outil informationnel à saveur désagrégée*, 31^e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Québec.

CHAPLEAU, Robert et BERGERON, Daniel (1991), *Modèles simples de planification opérationnelle en transport collectif: allocation des garages et traitement des comptes*, Routes et Transport, septembre 1991.

CHAPLEAU, Robert, MACH, Kinh Sanh, Primeau, Jean-Pierre, TURCOTTE, Alain et ALLARD, Bruno (1994), *La modélisation stratégique du transport urbain des marchandises dans la grande région de Montréal*, 29^e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Salaberry-de-Valleyfield.

CHAPLEAU, Robert, TRÉPANIÉ, Martin et BERGERON, Daniel, MAD(QRS II), Documentation d'appoint, Publication du groupe MADITUC, septembre 1993.

CHAPLEAU, Robert, TRÉPANIÉ, Martin, LAVIGUEUR, Pierre et ALLARD, Bruno (1996), *Origin_destination Survey Data Dissemination in a Metropolitan Context: A Multimedia Experience*, Transportation Research Board, Washington.

COAD, P. et YOURDON, E. (1991), Object-Oriented Design, Prentice Hall.

COLBERT, E. (1989), *The Object-Oriented Software Development Method: A Practical Approach to Object-Oriented Development*, ADA Technology in Context, New York.

CROWSON, Jane L., LEASURE, David E., SMITH, Robert W. et WORTHEN, Frederick (1997), *A GIS for Public Transit*, Proceedings of the 1997 ESRI User Conference.

DALY, Andrew (1997), *Living models for continuous planning*, 8th meeting of the International Association of Travel Behaviour Research, Austin, Texas.

DAVIS, G., OLSON, M., AJENSTAT, J. et PEAUCELLE, J. (1986), Systemes d'information pour le management, Éditions G. Vermette, 336 pages.

DIAL, Robert B. (1975), *Urban Transportation Planning System Philosophy and Function*, Transportation Research Record 599, Washington, p.60.

DICKEY, John W. (1983), Metropolitan Transportation Planning, Hemisphere Publishing Corporation.

DOMENCICH, Thomas A. et MCFADDEN, Daniel (1975), Urban Travel Demand, North-Holland.

DUBUISSON, Marie-Pierre, JAIN, Anil K. et TAYLOR, William C. (1993), *Segmentation and Matching of Vehicles in Road Images*, Transportation Research Record 1442, Washington, p. 57.

EMBLEY, D.W., KURTZ, B.D. et WOODFIELD, S.N. (1992), Object-Oriented Systems Analysis, A Model Driven Approach, Yourdon Press/Prentice Hall.

EVANS, James R. et MINIEKA, Edward (1992), Optimization Algorithms for Networks and Graphs, Marcel Dekker Editions, New York, 470 pages.

FOSTER, E., BARNARD, A.J. et ZHAO, L. (1994), *PoeT, Object Engineering in Public Transport*, University of Leeds, <http://www.class-sc.demon.co.uk/poeT.html>

GIRARD, D., BROUSSEAU, D., PIMPARÉ, M., BLANC, P., ALLARD, B., CHAPLEAU, R. et TRÉPANIÉ, M. (1994), *L'enquête O-D de Montréal de 1993: une réalisation*

technico-collective, 29^e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Valleyfield, 19 pages.

GOLLEDGE, Reginald G. (1997), *Dynamics and ITS: Behavioral Responses to Information Available from ATIS*, 8th Meeting of the International Association for Travel Behaviour, Austin, Texas.

HASSOUNAH, Mazen I., CHEAH, Loy-Sai et STEUART, Gerald N. (1993), *Underreporting of Trips in Telephone Interview Travel Surveys*, Transportation Research Record 1442, Washington.

HINSHAW, D. et ARNAUD, K., <http://lhea-www.gsfc.nasa.gov/users/dah/>

HOROWITZ, A.J. (1993), QRS II, Windows version manual, AJH Associates, Milwaukee.

HOROWITZ, Alan J. (1992), logiciel *Quick Response System II*.

HSIAOS, S. et STERLING, J. (1993), *Use of Geographic Information System for Transportation Data Analysis*, 4th International Conference on Microcomputer in Transportation, Baltimore.

HUXHOLD, W.E. (1991), An Introduction to Urban Geographic Information Systems, Oxford Press, New York, 550 pages.

INSTITUTE OF TRANSPORTATION ENGINEERS (1994), Manual of Transportation Engineering Studies, extrait de Donna C. Nelson, Prentice Hall.

KALFS, Nelly et HARVEY, Andrew S. (1997), *Emerging developments in time use and mobility*, 8th meeting of the International Association for Travel Behaviour Research, Austin, Texas.

KANNEL, E.J. et HEATHINGTON, K.W. (1973), *Temporal Stability Of Trip Generation Relations*, Highway Research Record No 472.

KOSKENOJA, Pia et PAS, Eric (1997), *Complexity and Activity-Based Travel Analysis and Modeling*, 8th meeting of the International Association for Travel Behaviour Research, Austin, Texas.

LAURIN, R. et THOMPSON, D. (1991), *Fundamentals of Spatial Information Systems*, Academic Press, p. 56.

LAVIGUEUR, Pierre et CHAPLEAU, Robert (1990), *Instruments de publication et d'analyse de données d'enquêtes origine-destination*, Routes et Transports, no.1, Montréal.

LEURENT, Fabien (1995), Une boîte-à-outils pour opérer diverses affectations statiques du trafic routier, Rapport INRETS no 198.

MANHEIM, Marvin L. (1979), Fundamentals of Transportation Systems Analysis, The MIT Press.

MARTIN, J. et ODELL, J.J. (1992), Object-Oriented Analysis and Design, Prentice Hall.

MARTIN, James (1993), Principles of Object-Oriented Analysis and Design, Prentice Hall.

MARTINEZ, Julio César (1996), STROBOSCOPE: State and Resource Based Simulation of Construction Processes, Thèse de doctorat, University of Michigan, Civil Engineering, 540 pages.

MASINI, Gérald et als. (1990), Les langages à objets, InterÉditions.

MEYER, Bernard (1990), Conception et programmation par objets, InterÉditions.

MONTGOMERY, S.L. (1994), Object-Oriented Information Engineering, AP Professional, 324 pages.

NELSON, Donna C., (1994), *Transportation Planning Data*, Manual of Transportation Studies, Prentice-Hall.

NIELSEN, Otto Anker, ISRAELSEN, Thomas et NIELSEN, Erik Rude (1998), *Handling Traffic Modelling Networks in GIS – Conflicts, Solutions and Applications*, World Conference on Transportation Research, Anvers, Belgique.

NG, Jerry C.N. et SARJEANT, Paul M. (1993), *Use of Direct Data Entry for Travel Surveys*, Transportation Research Record 1442, Washington.

PURVIS, Charles L., *Survey of Travel Surveys II*, Transportation Research Record no. 1271, Washington, DC.

RAFANELLI, Maurizio (1998), *A graphical interface to define and store data on transportation using an object-oriented Geographic Information System*, 8th World Conference on Transportation Research, Anvers, Belgique.

RIZZI, Michel et GUICHOUX, Bruno (1997). Système d'information objet pour l'exploitation des réseaux de surface. RATP, Paris, 277 pages.

ROBERTSON, Douglas (1994), *Inventories*, Manual of Transportation Studies, Prentice-Hall.

ROBERTSON, Douglas et HUMMER, Joseph E. (1994), *Volume Studies*, Manual of Transportation Studies, Prentice-Hall.

ROBINSON, Arthur H., MORRISSON, Joel L., MUEHRCKE, Phillip C., KIMERLING, A. Jon et GUPTILL, Stephen C. (1995), Elements of Cartography, Sixth Edition, John Wiley & Sons, 674 pages.

ROSS, T.J., WAGNER, L.R. et LUGER, G.F. (1992), *Object-Oriented Programming for Scientific Codes*, Journal of Computing in Civil Engineering, vol. 6, no. 4, octobre 1992, pp. 480-495.

RUMBAUGH, James et als. (1995), OMT: Modélisation et conception orientées-objet, Masson.

SCHNEIDER, P., <http://sun1000.ci.pwr.wroc.pl/adanew/BoochReferenz/object.html>

SCHOLL et als (1996), SGBD géographiques, International Thomson Publishing, Paris.

SHLAER, Sally et MELLOR, Stephen J. (1996), *The Shlaer Mellor Method*, <http://www.projtech.com>

SHLAER, Sally et MELLOR, Stephen J. (1992), Object-Oriented Systems Analysis: Modeling the World in States, Yourdon Press.

SLAVIN, H. (1996). *An integrated, dynamic approach to travel demand forecasting*, Transportation, volume 23, pp. 313-350.

SMITH, Brian Cantwell (1996). On the Origin of Objects. The MIT Press, Cambridge, 420 pages.

SPRAGUE, Ralph et WATSON, Hugh J. (1996), Decision Support for Management, Prentice Hall, 490 pages.

STATISTIQUES CANADA (1987), Le recensement 1986 en bref, Ministère de l'approvisionnement et des services, Ottawa, 160 pages.

STOPHER, Perter R., HARTGEN, David T. et LI, Yuanjun (1996), *SMART: simulation model for activities, resources and travel*, Transportation, volume 23, pp. 293-312.

STOPHER, Perter R. (1992), *Use of an activity-based diary to collect household travel data*, Transportation, volume 19, pp. 159-176.

STOPHER, Peter R. et MEYBURG, Arnim H. (1975), Urban Transportation Modeling and Planning, Lexington Books.

STRISBOS, Egbert, ESHUIS, Rik et CANDIA, Hector Rodriguez (1996), The Object Schema Technique, <http://wwwis.cs.utwente.nl:8080/dmrg/MEE/misop015/index.html>

SUTTON, J. C. (1996). *Role of Geographic Information System in Regional Transportation Planning*. Transportation Research Record no. 1518, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 25-31.

THE OBJECT AGENCY, Comparison of Object-Oriented Technologies, <http://www.toa.com>

TRÉPANIÉ, Martin (1995), Référentiels spatiaux et opérationnels pour la caractérisation de la mobilité en transport urbain, mémoire M.Sc.A., École Polytechnique.

TRÉPANIÉ, Martin (1995), Référentiels spatiaux et opérationnels pour la caractérisation de la mobilité en transport urbain, Mémoire M.Sc.A., École Polytechnique de Montréal, 180 pages.

TRÉPANIÉ, Martin et CHAPLEAU, Robert (1996), *Un modèle d'analyse désagrégée des générateurs de déplacements: vers une connaissance détaillée de l'utilisation des lieux urbains*, 31^e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Québec.

TRÉPANIÉ, Martin, Élaboration de systèmes d'information et de référence aux fins d'analyse et de planification des transports pour les municipalités québécoises, Projet de fin d'études B.Ing., École Polytechnique, avril 1993.

VOELLER, John G. (1996), *Data-Centered Thinking*, Journal of Computing in Civil Engineering, January 1996, p.1.

WIRFS-BROCK, Rebecca, et als. (1990), Designing Object-Oriented Software, Prentice Hall.

ZHAO, Fang (1997), *Transportation Applications of Temporal GIS*, Proceedings of the 1997 ESRI User Conference.

ANNEXE A. MODÈLES-OBJETS

A.1 Quelques exemples de modèles-objets

Cette section porte sur les prémisses de toute analyse objet d'un problème de transport, soit l'identification générale des éléments en présence et les relations qui les lient entre eux. L'accent n'est pas mis sur les méthodes de résolution, mais bien sur les habiletés de l'approche orientée-objet à structurer les données et à intégrer les modèles qui y sont associés.

Dans ce contexte, l'emploi de différents moyens informatiques (Visual Basic, Excel) vise à démontrer l'indépendance de la modélisation vis-à-vis de la programmation orientée-objet. Au programme: modèles-objets de transport, simulation du métro (section A.2), interface d'édition de réseaux dans Excel (section A.3).

A.1.1 Modèle-objets d'un service de transport adapté

La gestion du transport des personnes handicapées et en perte d'autonomie est une tâche qui met en cause la fourniture d'un service de transport personnalisé à un individu, à l'aide de deux modes de transport (cas montréalais), sous des contraintes d'optimisation de temps et d'argent.

Le service fonctionne comme suit: le client appelle le centre de répartition, et mentionne les déplacements qu'il doit effectuer au cours de la journée (certains abonnés ont également des déplacements quotidiens réservés). Le répartiteur regroupe les déplacements de plusieurs usagers pour en fabriquer une tournée (séquence ordonnée). Ces tournées sont assignées à des chauffeurs de minibus. Certains déplacements sont également assignés à des chauffeurs de taxi, qui transportent les cas moins lourds.

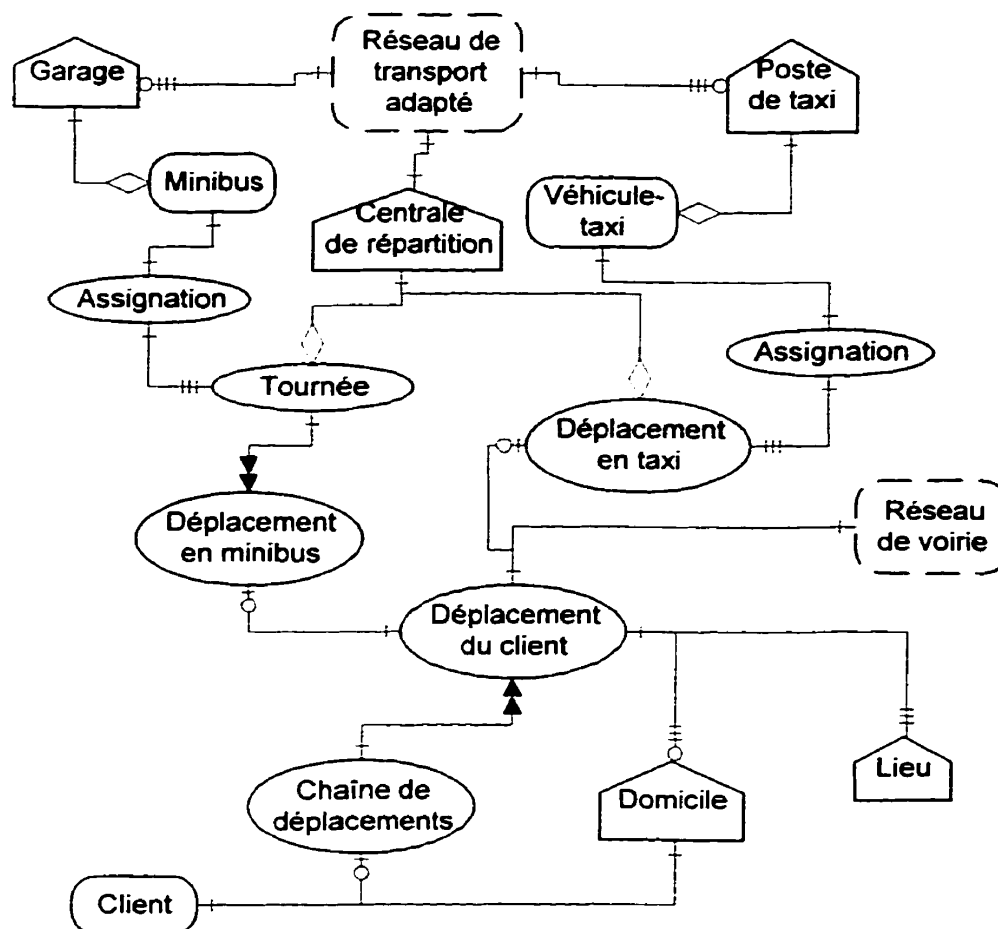


Figure An- 1: Modèle-objets du transport adapté

La Figure An- 1 présente le modèle-objets qui en résulte. Trois points d'observation sont présentés: l'opérateur des minibus (gauche), les opérateurs de taxi (droite) et les clients (en bas). La chaîne de déplacements du client est composée de déplacements effectués soit par minibus ou taxi. Chacun des déplacements est effectué entre deux lieux, dont peut faire partie le domicile.

Ce genre de modèle-objets est courant en transport. Les déplacements suivent des collections orientées, tandis que les véhicules (modes) font partie de collections libres. Comme dans tout système de transport, le réseau de transport adapté est en relation avec d'autres réseaux, en l'occurrence le réseau de voirie sur lequel s'effectue le

déplacement du client. Le Tableau An- 1 contient quelques propriétés et méthodes liées à quelques-uns des objets.

Tableau An- 1: Propriétés et méthodes associées au modèle-objets du transport adapté

Objet	Quelques propriétés	Quelques méthodes
Client	Nom, Âge, Sexe, Code de handicap, Priorité	AssocierTournée CréerDéplacement
Lieu	Adresse, NombreClients	Spatialiser AssocierDéplacement
Déplacement Client	HeureDébut, HeureFin, Origine, Destination, TypeMode	CalculerDistance, CalculerDurée, Spatialiser, AssocierChaîne
Tournée Minibus	HeureDépart, HeureArrivée, NombreDéplacements	ValiderCohérence, AssocierDéplacementsClients, AssignerMinibus Spatialiser
RéseauTA	NombreClients, NombreAssignations, NombreVéhicules, NombreChauffeurs	CréerTournées CréerAssignations CalculerStatistiques

A.1.2 Modèle-objets du transport des marchandises

Le transport des marchandises sur réseau routier est un domaine qui implique plusieurs intervenants possédant chacun leurs propres intérêts. D'abord, le fabricant distributeur désire faire acheminer ses produits dans les meilleures conditions. Le transporteur désigne un ou plusieurs véhicules de sa flotte à cette fin. Le client espère, pour sa part, recevoir la marchandise en bon état et dans un laps de temps prédéterminé. Enfin, les gestionnaires du réseau de voirie tentent de rendre minimes les impacts des déplacements des véhicules lourds sur leurs infrastructures.

La Figure An- 2 présente le modèle-objets qui y est associé. On y remarque l'objet dynamique Camion, qui emprunte les itinéraires d'une tournée afin de transporter les produits (types A, B, etc.). Chaque itinéraire est composé de sections de rues. Les rues empruntées font partie d'un réseau de voirie "dédié" au transport des marchandises. En effet, la circulation des camions lourds est interdite sur plusieurs

rues (résidentielles) ou dans les tunnels (pour les matières dangereuses). Le réseau résultant forme un sous-ensemble du réseau de voirie global.

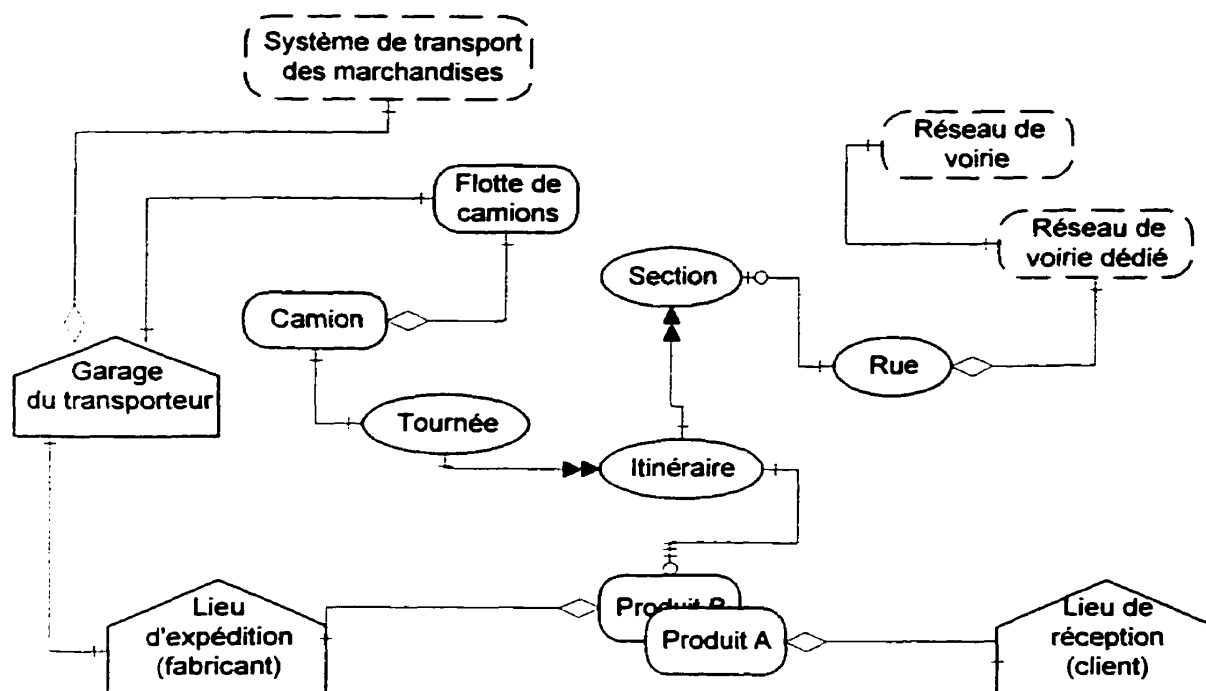


Figure An- 2: Modèle-objets du système de transport des marchandises (routier)

Le transport des marchandises est un problème multi-commodités, c'est-à-dire qu'il implique le transport de plusieurs types de produits, souvent incompatibles, ne pouvant pas être transportés sur un même type de véhicule (conteneurs, boîtes, vrac, grosse pièces de machinerie, etc.). Le tableau suivant décrit quelques objets associés au transport des marchandises.

A.2 Cas pratique: simulation du métro

Cette section concerne la simulation par représentation d'événements du métro de Montréal. Les sous-sections décrivent quelques étapes de l'application de l'approche orientée-objet: identification du système-objets, montage du modèle-objets, création de l'interface, programmation de méthodes.

Tableau An- 2: Propriétés et méthodes associées au modèle-objets du transport des marchandises

Objet	Quelques propriétés	Quelques méthodes
Transporteur	Identification TailleFlotte Tarifs	FabriquerTournées ChercherExpéditeur ChercherClient OptimiserLivraisons
Client	ProduitDemandé HeuresLivraisonPossible Localisation TypeInstallationLivraison	DemanderLivraison OptimiserCommande
Expéditeur (fabricant)	ProduitOffert HeuresExpédition TypeInstallationExpédition	DemanderExpédition OptimiserExpédition
Camion	ProduitTransporté Capacité TypeCamion	AssocierTournée FabriquerItinéraire AssocierProduit
Itinéraire	SéquenceSections Longueur, Durée TypeProduit	CalculerChemin
Produit	TypeProduit TypeCamionPossible Quantité	DéterminerItinéraire

A.2.1 Présentation du système-objets

Chaque ligne du métro de Montréal est divisée, dans chaque direction, en segments de voie d'une longueur d'environ 200 mètres identifiés par un "code de voie" (y compris les stations). Chacun de ces codes de voie est muni de détecteurs qui permettent de déterminer, à la seconde précise, l'entrée ou la sortie d'une rame de métro.

Le principal élément de donnée de ce problème est un fichier dans lequel on retrouve la liste des événements d'occupation et de libération de ces segments de voie pour une période de temps donnée.

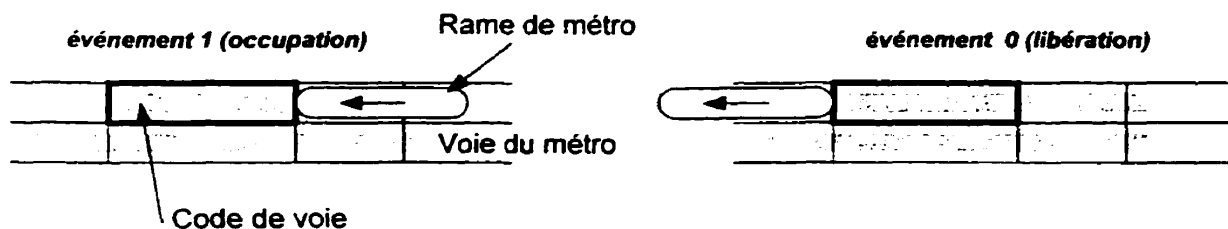


Figure An- 3: Système-objets du problème de simulation du métro

Le système-objets comprend principalement: un objet "voie du métro" sur laquelle sont placés les objets "code de voie", où l'on identifie deux événements clés, soit l'occupation ou la libération de ce segment par une rame de métro.

A.2.2 Modèle-objets

Le modèle-objets intègre les objets décrits précédemment et d'autres objets propres à l'analyse. L'objet système "RéseauMétro" est vu comme une collection de rames et de lignes. L'objet "Rame" est une collection chronologique de voyages effectués par des véhicules (objet Voyage). L'objet "Voyage" est une séquence chronologique d'objets "Événement", dictée par la géométrie de l'objet "Direction" de la ligne. Cet objet "Direction" est une collection géométrique d'objets "CodeVoie".

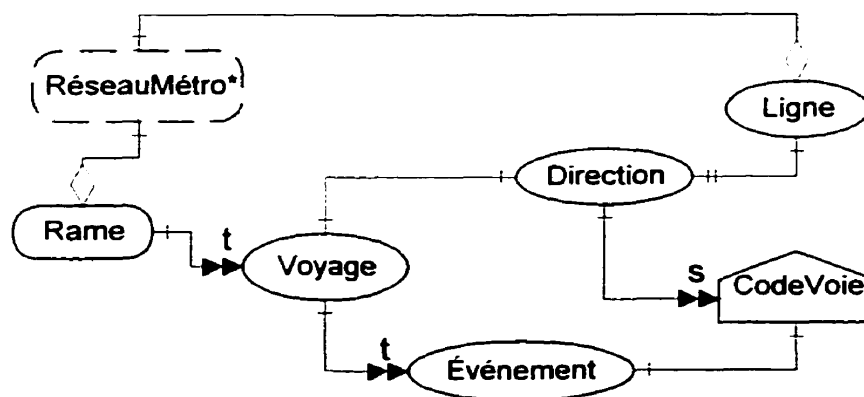


Figure An- 4: Modèle-objets du problème de simulation du métro

La représentation schématique du modèle-objets n'est pas unique; elle dépend du référentiel utilisé. En effet, à la Figure An- 4, le schéma est présenté dans le référentiel

de l'objet "RéseauMétro" (marqué d'un astérisque). La relation entre l'objet "CodeVoie" et l'objet "Événement" est alors de type "un à un", puisque à un moment donné, dans le réseau du métro, chaque événement n'est associé qu'à un seul segment de voie.



Figure An- 5: Projection dans le référentiel du code de voie

Cependant, à la Figure An- 5, dans le référentiel de l'objet "CodeVoie", celui-ci peut être perçu comme une collection chronologique d'événements. À chaque objet "Événement" sera associé un objet "Voyage", et ainsi de suite pour les autres objets.

A.2.3 Représentation graphique (interface)

Les objets "CodeVoie" sont présentés de façon schématique au centre de l'interface usager, programmée dans le langage Visual Basic. Les données fictives (utilisées sous toute réserve) sont basées sur des fichiers de la STCUM.

Voici les principaux éléments de l'interface:

- A. La barre d'outils permet de contrôler la simulation (démarrage, arrêt, statistiques).
- B. La carte affiche l'état des segments (objet "CodeVoie") et la position des véhicules (objets "Voyage").
- C. La partie gauche affiche des informations (propriétés et méthodes) touchant un objet "CodeVoie" sélectionné. On y retrouve, en plus de son identification, la liste des événements qui s'y sont produits depuis le début de la simulation.
- D. La partie droite affiche des informations similaires pour un véhicule (objet "Voyage") sélectionné. Dans la liste des objets "CodeVoie" visités, seul les stations de métro sont affichées.

- E. La barre d'état affiche l'heure de simulation, le nombre d'objets "CodeVoie" occupés, le nombre de voyages et de rames actives, ainsi que le nombre total d'événements depuis le début de la simulation.
- F. Le graphe présente une "empreinte" du nombre d'objets "CodeVoie" occupés en fonction du temps, ainsi que le nombre estimé de rames dans le système.

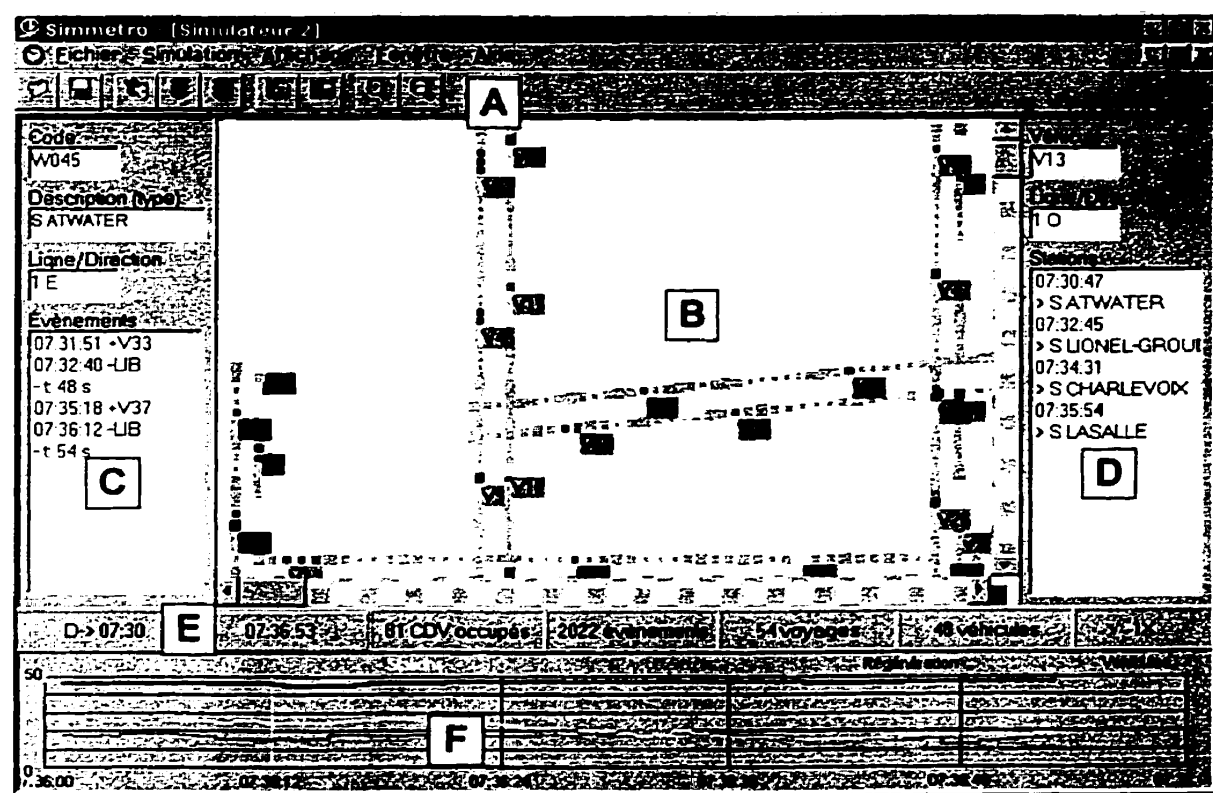


Figure An- 6: Interface du simulateur métro

A.2.4 Propriétés et méthodes

En plus de la représentation graphique et du stockage de l'information sur les objets "CodeVoie", voici quelques autres méthodes qui ont été implémentées:

- ☐ La fabrication d'objet "Voyage" est une méthode génératrice associée aux événements. En effet, la notion de véhicule ne se retrouve pas dans les fichiers de

données. Elle est dérivée en examinant l'occupation successive (dans le temps) de segments de voie successifs (dans l'espace).

- "CodeVoie.ToccMaximum" est une méthode statistique qui calcule le temps d'occupation maximale de chaque segment de voie, ce qui permet d'identifier rapidement les stations de métro du réseau (les véhicules y arrêtent, ce qui occasionne un temps d'occupation plus long pour le segment associé).

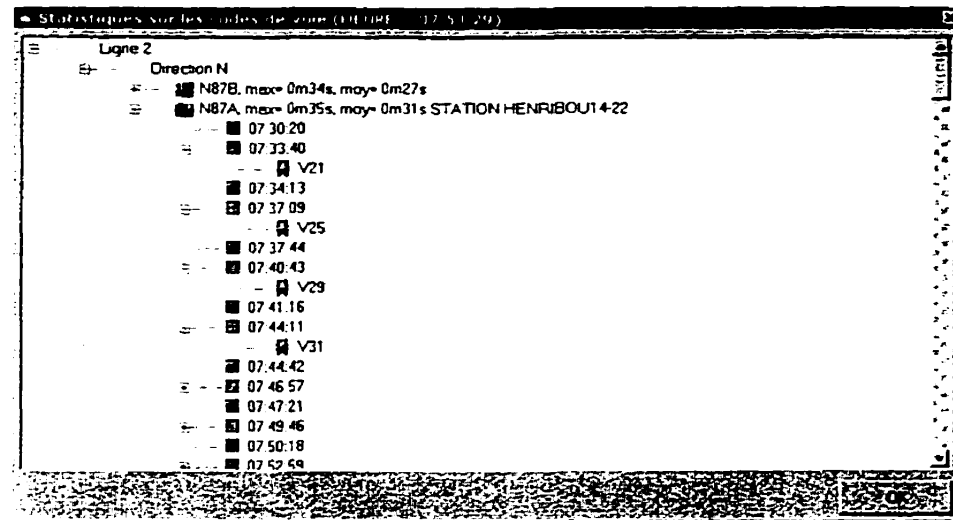


Figure An- 7: Affichage de statistiques sur les objets "CodeVoie"

- Une méthode complexe de statistiques et de visualisation permet d'afficher tous les objets "Événements" ordonnés géométriquement.

Le Tableau An- 3 présente les principaux objets du système programmé.

Tableau An- 3: Quelques objets du simulateur de métro

Objet	Quelques propriétés	Quelques méthodes
CodeVoie	Code, Xpos, Ypos, Etat, SeqEvenements	ToccMaximum, ToccMoyenne, AffInfoCodeVoie
Événement	Heure, CodeVoie, Vehicule	CréerVoyage (collection)
Voyage	Identificateur, SeqEvenements	AffInfoVoyage
Ligne	Numero, SeqCodeVoie	AffStatCodeVoie

A.3 Utilisation de l'approche orientée-objet en transport dans Excel

Le logiciel Excel de Microsoft est un "tableur", c'est-à-dire un outil permettant à priori de créer des tableaux de données, d'effectuer des opérations de calcul et de représenter les résultats sous forme de graphes et de tableaux imprimés. Depuis quelques versions, les concepteurs y ont greffé le langage Visual Basic pour Application (VBA), ce qui permet d'utiliser à bon escient les "objets" programmés du logiciel: classeurs, feuilles, plages, cellules, graphes, formes graphiques, etc.

La présence d'un langage de programmation orienté-objet dans un logiciel tel qu'Excel en découple les fonctionnalités. En fait, le logiciel devient un instrument de stockage de données (dans les feuilles), un outil de représentation (graphes, formes graphiques) et un analyseur (formules, programmes) utilisant des méthodes appliquées aux objets. La présente section décrit une utilisation sommaire du logiciel dans un contexte de modélisation orientée-objet en transport.

A.3.1 Présentation du modèle-objets

La Figure An- 8 présente le modèle-objets d'une topologie de réseau à sa plus simple expression. À partir de ce modèle, cinq classes ont été créées dans Excel. La partie gauche présente un graphe composé de liens orientés et de nœuds. La partie droite fait état des classes développées en VBA afin de reproduire de tels graphes.

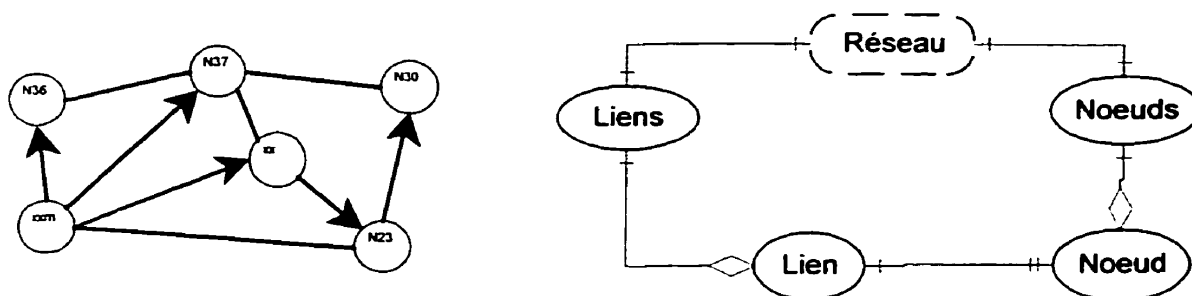


Figure An- 8: Modèle-objets du graphe employé dans Excel

L'objet "Réseau" (de type système) contient un objet "Liens" et un objet "Nœuds". Ces deux objets sont des collections de nœuds et de liens (tous des objets cinétiques), objets liés par une relation "deux nœuds pour chaque lien".

A.3.2 Propriétés des objets Réseau, Nœud et Lien

Le tableau suivant décrit les propriétés de chaque type d'objet élémentaire (et non les collections) qui se sont avérés nécessaires pour le montage de la topologie du réseau. Toute propriété subséquente est liée à l'application de méthodes sur ces objets.

Tableau An- 4: Propriétés des objets élémentaires

Objet	Propriété	Type	Description
Réseau	ID	Chaîne	Identifiant du réseau.
	Nœuds	Collection	Contient tous les objets nœuds.
	Liens	Collection	Contient tous les objets liens.
Nœud	Nom	Chaîne	Identifiant du nœud.
	Cellule	Cellule Excel	Première cellule Excel de la rangée de la feuille Données où sont stockées les propriétés du nœud.
	Forme	Objet graphique Excel ("Oval")	Référence à l'objet graphique utilisé pour représenter le nœud.
	Liens	Collection de liens.	Collection des objets "lien" qui sont connectés à l'objet nœud.
Lien	Nom	Chaîne	Identifiant du lien.
	Cellule	Cellule Excel	Première cellule Excel de la rangée de la feuille "Données" où sont stockées les propriétés du lien.
	Forme	Objet graphique Excel ("Connector")	Référence à l'objet graphique utilisé pour représenter le lien.
	Noeud1	Nœud	Objet nœud situé au début du lien.
	Noeud2	Nœud	Objet nœud situé à la fin du lien.
	Sens	Entier	Numéro indiquant le sens du lien.

Le stockage des propriétés est effectué dans une feuille de calcul puisque le logiciel ne maintient pas les variables objets en mémoire lors des sauvegardes du classeur; il faut

alors relire le réseau. Les classes "Nœud" et "Lien" possèdent une propriété de type objet ("Forme") qui contient une référence à la forme Excel associée (cercle ou connecteur).

À noter la redondance de l'association nœuds-lien: une collection de liens pour chaque nœud et la référence aux deux nœuds pour chaque lien. Cette redondance permet une utilisation plus rapide des méthodes appliquées à ces objets.

A.3.3 Premier groupe de méthodes: création et édition du réseau

Les premières fonctionnalités à envisager concernent l'interface graphique de montage et d'édition du réseau. Pour ce faire, une feuille Excel sert de "fond de carte". L'ajout de nœuds (objets graphiques: cercles blancs) se fait à l'aide d'une méthode associée au classeur (Figure An- 9). L'ajout de liens se fait en cliquant successivement sur deux nœuds. En cliquant sur le lien ainsi fabriqué, l'usager peut, par une boîte de dialogue, demander un lien unidirectionnel ou bidirectionnel (Figure An- 10).

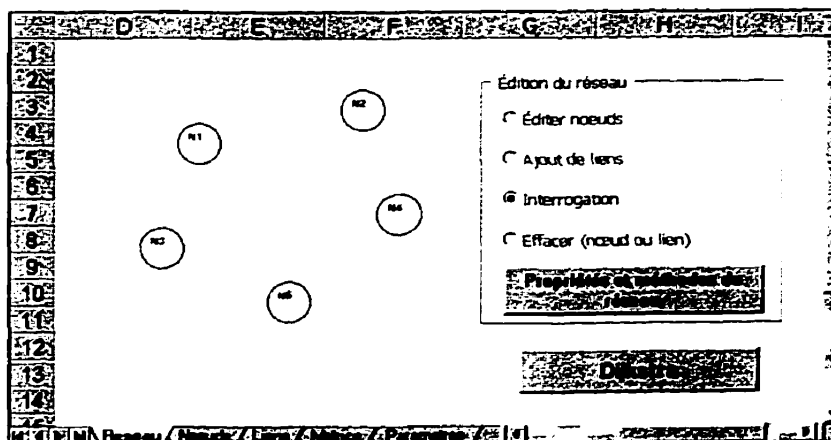


Figure An- 9: Création des nœuds

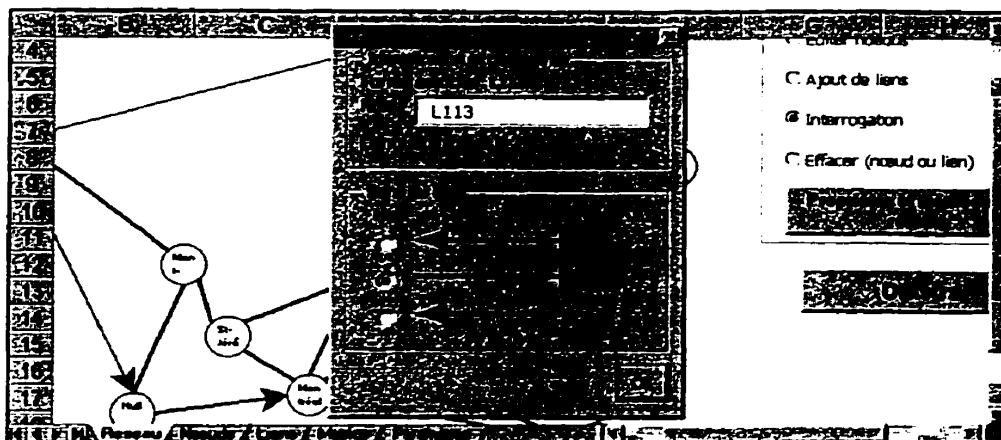


Figure An- 10: Création et caractérisation des liens

A.3.4 Deuxième groupe de méthodes: calcul d'arbre et de tours

La méthode *TourAléatoire* permet de fabriquer une tournée qui parcourir les nœuds dans un ordre aléatoire, sans repasser par un même lien. Le procédé est simple en langage objet; voici les méthodes nécessaires:

- *Reseau.ChoisirUnNoeud* choisit un nœud à partir d'une boîte de dialogue.
- *Nœud.LienAuHasard* sélectionne un lien non marqué sortant de l'objet Nœud. Marque le lien sélectionné (propriété Marqué de type Booléen).
- *Lien.AutreNoeud* retourne l'objet Nœud situé à l'autre extrémité de l'objet lien.
- *Reseau.TourAleatoire* applique la méthode *Nœud.LienAuHasard* à partir du nœud de départ tant que cette méthode retourne un objet lien et applique ensuite la méthode au nœud situé à l'extrémité de cet objet lien (récursif).

L'utilisation de méthodes simples vise à démontrer la souplesse de l'approche objet. En effet, le concepteur peut aisément intervenir dans le code de chacune de ces méthodes sans pour autant altérer la méthode globale.



- 

- *Nœuds.NoëudDistMin* renvoie l'objet Nœud possédant la distance d'accès minimale parmi une collection de nœuds.
- *Reseau.Dijkstra(NœudGen)* marque les nœuds accessibles par la collection *Nœud.LiensLibresSortant* et les place dans une collection Nœuds. Applique la méthode *Nœuds.NoëudDistMin* et marquer l'objet lien concerné. Répète l'opération jusqu'au parcours de tous les nœuds (si possible).

L'intérêt ne doit pas être porté ici sur l'application sur la méthode de Dijkstra (programmé de façon sûrement plus efficace dans d'autres langages), mais sur le stockage, durant toute l'opération, de *valeur ajoutée* (nouvelles propriétés et méthodes) aux objets Nœud et Lien.

A.3.5 Troisième groupe de méthodes: interrogation des objets

L'utilisation d'une approche orientée-objet implique le stockage de propriétés résultant de l'application de différentes méthodes. La boîte de dialogue (Figure An- 12) indique les propriétés d'un nœud sélectionné à la suite d'un calcul d'arbre. La section "Connexité et degrés" indique des propriétés inhérentes à l'objet Nœud. La section "Arbre courant" indique des propriétés associées au Nœud, celui-ci étant placé dans le *contexte* de l'objet Arbre calculé.

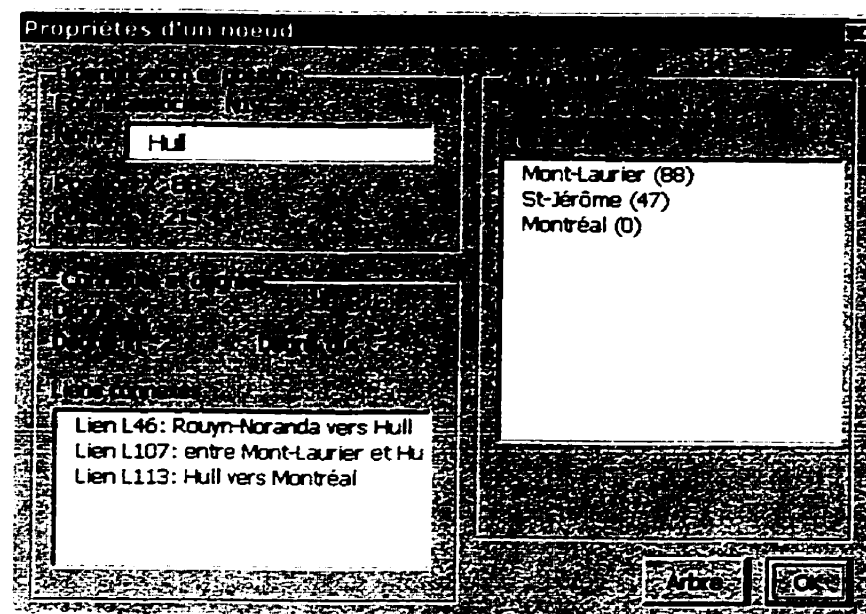


Figure An- 12: Écran sur les propriétés d'un objet nœud

Enfin, mentionnons l'écran sur les propriétés de l'objet Réseau. Les mentions "Le graphe n'est pas symétrique" et "Le graphe n'est pas complet" provient de l'application de méthodes simples préparées à cet effet. La liste des arbres minimums est obtenue suite à l'application de la méthode *Réseau.Dijkstra(x)* à partir de chacun des nœuds de la collection.

Tableau An- 5: Code VBA d'affichage de la matrice des distances minimales

```

For k = 1 To res.Noeuds.Count 'Pour chaque nœud
    Set nod = res.Noeuds.Item(k) 'Sélection d'un nœud
    Set lis = Dijkstra(nod, -1) 'Calcul de l'arbre
    For t = 1 To res.Noeuds.Count 'Pour chaque nœud de l'arbre
        Sheets("Matrice").Cells(k + 1, t) = res.Noeuds.Item(t).DistCum
        'Afficher la distance
    Next t
Next k

```

Une application imbriquée de méthodes permet d'obtenir rapidement des résultats explicites, tel qu'une matrice de distances minimales entre les nœuds (Figure An- 14). Le code VBA qui y est associé tient en quelques lignes (Tableau An- 5).

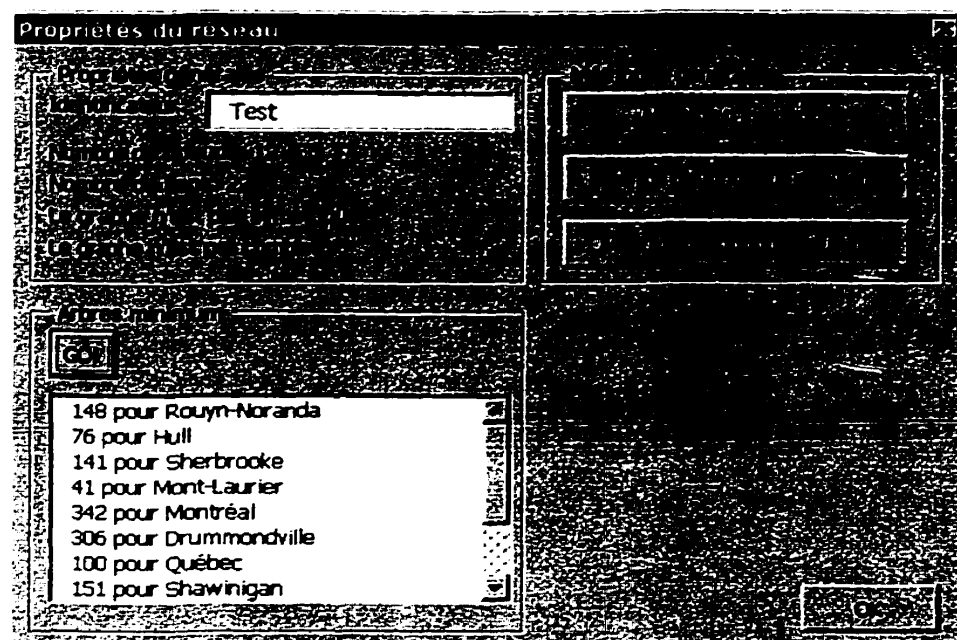


Figure An- 13: Écran sur les propriétés du réseau

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Distances les plus courtes entre chacun des nœuds										
2		Rouyn-N	Hull	Sherbro	Mont-La	Montréal	Drummc	Québec	Shawini	Chicouti	St-Jérôr
3	Rouyn-N	0	148	323	100	188	307	347	310	247	141
4	Hull	176	0	214	76	79	198	282	203	303	117
5	Sherbro	323	299	0	223	135	156	141	259	241	182
6	Mont-La	100	76	223	0	88	207	262	210	310	41
7	Montréal	188	164	135	88	0	119	203	124	224	47
8	Drummc	307	283	254	207	119	0	97	110	197	166
9	Québec	347	367	338	291	203	97	0	154	100	250
10	Shawini	312	288	259	212	124	110	154	0	100	171
11	Chicouti	247	388	359	312	224	197	100	100	0	271
12	St-Jérôr	141	117	182	41	47	166	221	169	269	0
13	Granby	239	215	186	139	51	68	165	175	265	98
14	Trois-Riv	292	268	239	192	104	59	103	51	151	151

Figure An- 14: Matrice des distances minimales entre les nœuds

ANNEXE B. SUPPLÉMENT SUR LES RÉSEAUX DE VOIRIE

B.1 Propriétés supplémentaires des réseaux de voirie

En vertu de la théorie des graphes, le réseau de voirie est non complet (les nœuds ne sont pas complètement reliés entre eux). Il est cependant complètement connexe (tous les nœuds sont accessibles). Quelques propriétés d'un réseau de voirie s'avèrent intéressantes en ce qui concerne l'accessibilité au transport ou les caractéristiques urbanistiques du tissu urbain. Plutôt que le simple compte des nœuds et des liens, des statistiques de longueur, le nombre d'objets Rue et d'objets Intersection renseignent sur la configuration du réseau.

Le Tableau An- 6 évoque quelques statistiques sur des réseaux de voiries de la région métropolitaine de Montréal. On peut en dériver des indicateurs tel que le nombre d'intersections par rue (forte dans le cas d'un réseau maillé de type Manhattan) ou la longueur moyenne d'une rue (faible dans le cas des nouvelles géométries des développements résidentiels).

Tableau An- 6: Exemples de propriétés attribuées à des réseaux de voirie

Réseau	Rues	Intersections	Longueur (km)	Intersections par rue	Longueur par rue (km)
Anjou	247	523	109	2,1	0,44
Verdun (centre)	91	276	71	3,0	0,78
Lemoyne	36	75	15,3	2,1	0,41
Brossard	679	1166	351	1,7	0,52

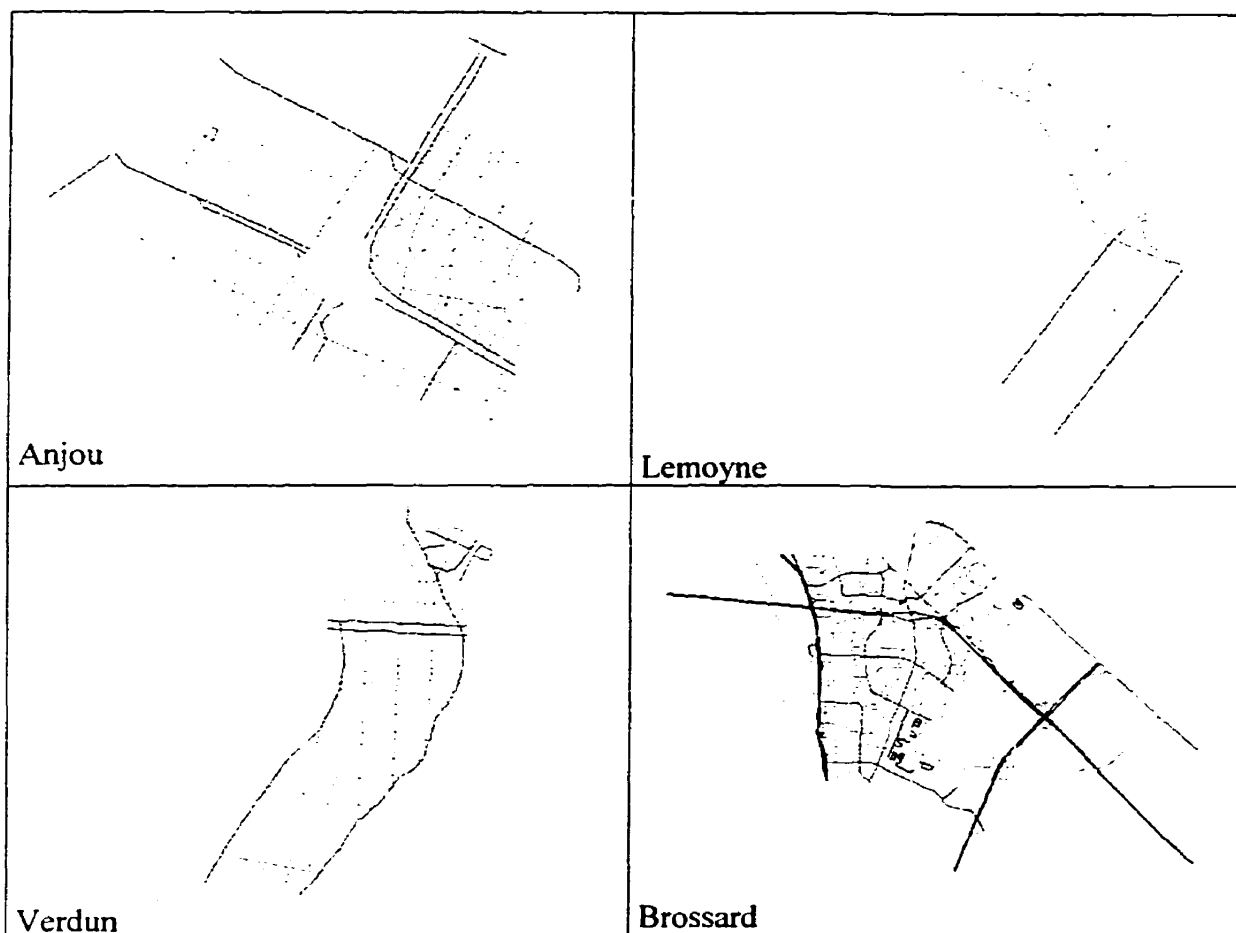


Figure An- 15: Cartes de quelques réseaux de voirie

B.2 La variabilité des temps de parcours

Un autre problème classique du calcul d'arbre est la présence de variabilité sur les temps de parcours des objets cinétiques du réseau. En effet, le temps de parcours d'un lien routier peut varier considérablement selon la période de la journée et la présence de congestion ou non. Par une modification simple de la méthode "Distance" attribuée aux objets liens, il est possible de faire varier intrinsèquement les temps de parcours sur les liens sans pour autant affecter l'application de l'algorithme.

À titre d'exemple, la Figure An- 16 présentent deux arbres calculés sur un réseau de voirie urbain. Le second arbre (à droite) a été obtenu après application d'une méthode de variation de 5% du temps de parcours sur les liens (distribution uniforme de la

variation positive ou négative). On examine des différences structurelles entre les deux arbres.

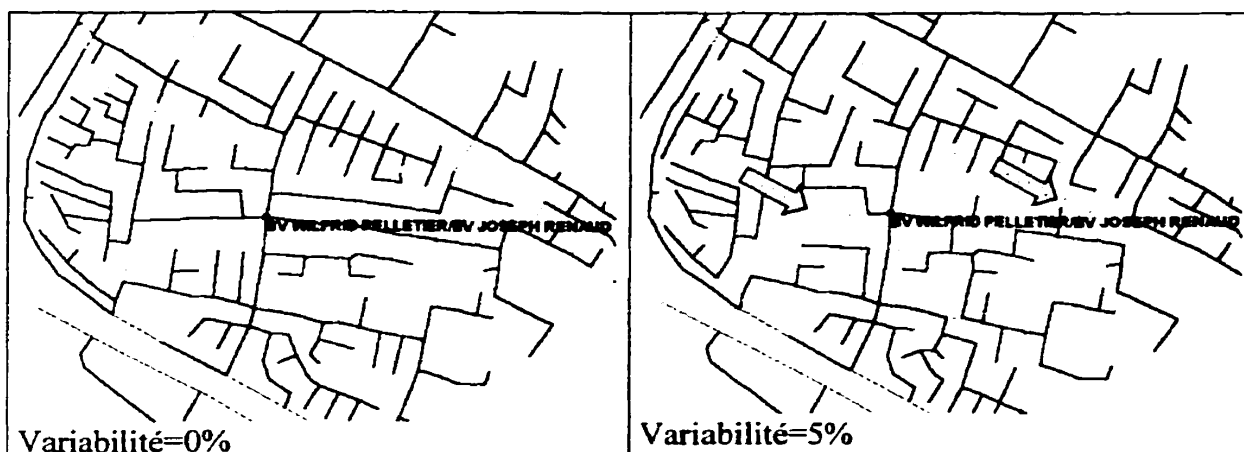


Figure An- 16: Calcul d'arbres avec variabilité des temps de parcours

L'application interactive de méthodes de calcul d'arbres peut ainsi renseigner efficacement sur les effets structurants des réseaux, l'effet de la variabilité des temps de parcours, l'application de pénalités, etc.

Les mêmes fonctionnalités peuvent être employées pour les calculs de chemins.

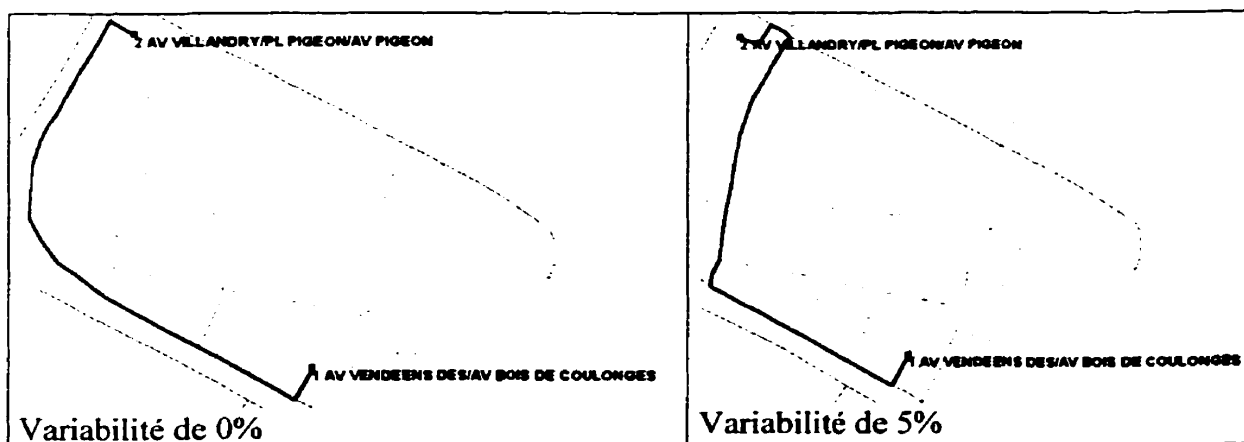


Figure An- 17: Chemin le plus court avec et sans variabilité

ANNEXE C. MADTOO: MODÈLE D'ANALYSE DÉSAGRÉGÉE TRANSPORT ORIENTÉ OBJET

Cette section fait état d'expérimentations effectuées à partir des bases analytiques énoncées aux sections précédentes sur les propriétés et méthodes des réseaux viaire et de transport collectif.

C.1 Présentation

Le modèle d'analyse désagrégée transport orienté objet (MADTOO) est un logiciel permettant d'effectuer le montage d'un modèle-objets de réseaux de transport et d'y appliquer des méthodes interactives graphiques. Le logiciel comporte une interface de système d'information géographique qui sert à visualiser les résultats de l'application des méthodes. Il a été programmé en Visual Basic, langage léger de programmation orientée-objet.

C.2 Fonctionnalités

L'interface du logiciel MADTOO comporte deux parties principales. Le volet situé à gauche contient la liste des objets présentés dans l'écran du système d'information géographique, qui occupe le volet droit (voir Figure An- 18).

Les objets RéseauViaire et RéseauTC sont obtenus à partir d'une lecture de fichiers de données. À la lecture, ces réseaux sont placés en mémoire selon la structure du modèle-objets associé. La fabrication d'une couche du SIG n'est alors qu'une méthode parmi d'autres appliquée à l'objet réseau.

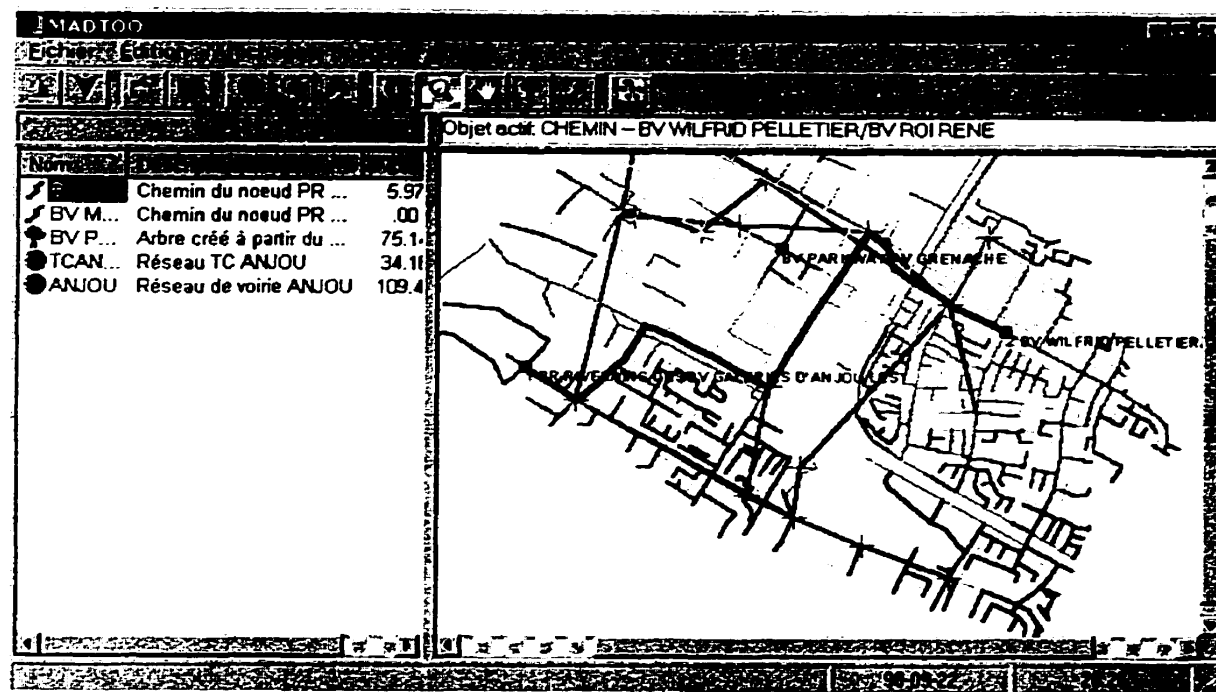
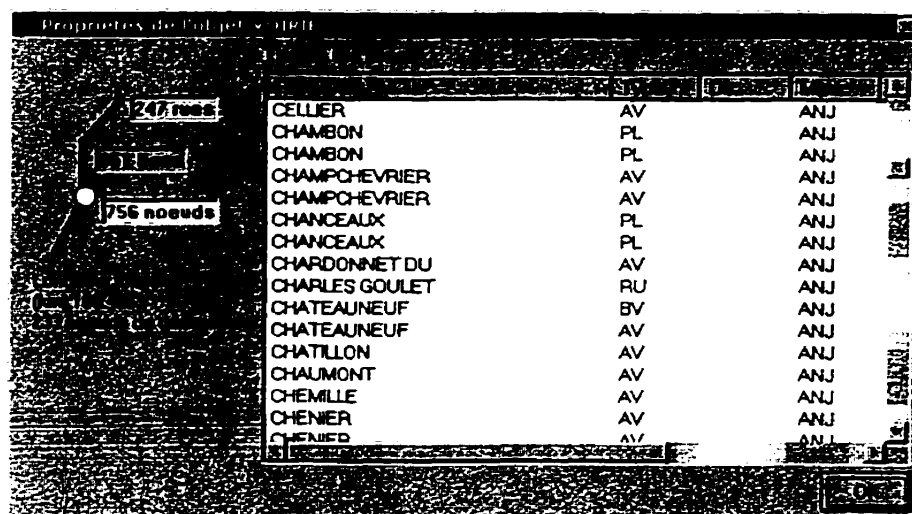


Figure An- 18: Interface de MADTOO

Contrairement aux SIG traditionnels, où les objets sont monocouches, le SIG de MADTOO associe à chaque objet une collection de couches. Ces couches peuvent alors être manipulées en groupe lors des modifications apportées à l'objet maître. Par exemple, l'objet Chemin compte trois couches: deux couches décrivant les points d'origine et de destination (type point), ainsi qu'une couche décrivant le chemin entre ces deux points (type ligne).

Tout comme pour l'application réseau dans Excel et celle sur la simulation du métro, l'interrogation des propriétés d'un objet fait partie intégrante du logiciel MADTOO et constitue une de ses premières facilités. Les informations présentées à l'écran de la Figure An- 19 ont été obtenues suite à l'application de méthodes interrogatives sur l'objet RéseauViaire.



Node Name	Code 1	Code 2
CELLIER	AV	ANJ
CHAMBON	PL	ANJ
CHAMBON	PL	ANJ
CHAMPCHEVRIER	AV	ANJ
CHAMPCHEVRIER	AV	ANJ
CHANCEAUX	PL	ANJ
CHANCEAUX	PL	ANJ
CHARDONNET DU	AV	ANJ
CHARLES GOULET	RU	ANJ
CHATEAUNEUF	BV	ANJ
CHATEAUNEUF	AV	ANJ
CHATILLON	AV	ANJ
CHAUMONT	AV	ANJ
CHEMILLE	AV	ANJ
CHENIER	AV	ANJ
CHENIER	AV	ANJ

Figure An- 19: Affichage de propriétés

C.3 Expérimentations supplémentaires

Le logiciel MADTOO effectue le calcul d'arbres à partir d'un point, ainsi que le calcul de chemins à partir d'une paire de points. Les représentations graphiques présentées dans les sections précédentes (calcul d'arbres, calcul de chemins) sont d'ailleurs tirées d'expérimentations effectuées à l'aide de ce logiciel. Pour peaufiner les opérations, une série d'options y sont disponibles, tel que l'utilisation d'un réseau de marche ou de voirie et la sélection du mode de calcul des arbres et chemins (distance, temps ou unité-lien).

L'animation est une fonctionnalité rare dans les systèmes d'information géographiques. Par manipulation de la couche d'un objet Arbre, MADTOO peut créer un phénomène animé en modifiant les couleurs de façon séquencée. L'animation de l'arbre permet de mieux cerner sa forme sur le réseau (taux de remplissage du réseau, séquence de liens empruntés, etc.).

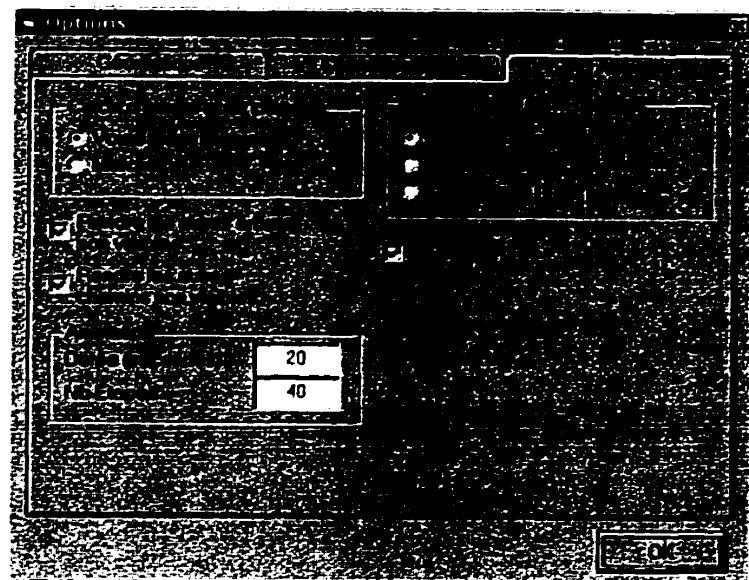


Figure An- 20: Options de MADTOO

L'application d'une série de méthodes dans MADTOO permet d'obtenir la superposition du réseau de transport collectif au réseau de voirie, tel qu'expliqué à la section 6.3.4. Tout d'abord, une relation est créée entre les objets NoeudTC et les objets NoeudVR (voirie) par l'application d'une méthode de proximité spatiale. Ensuite, chaque lien de transport collectif entre deux NoeudsTC est soumis à une méthode de calcul de chemins sur le réseau de voirie (récupération de la même méthode utilisée précédemment). Des relations sont alors créées entre les liens du réseau TC et les liens du réseau de voirie. La Figure An- 22 montre les situations "avant" et "après" ce processus.



Figure An- 21: Méthode d'animation de l'objet arbre

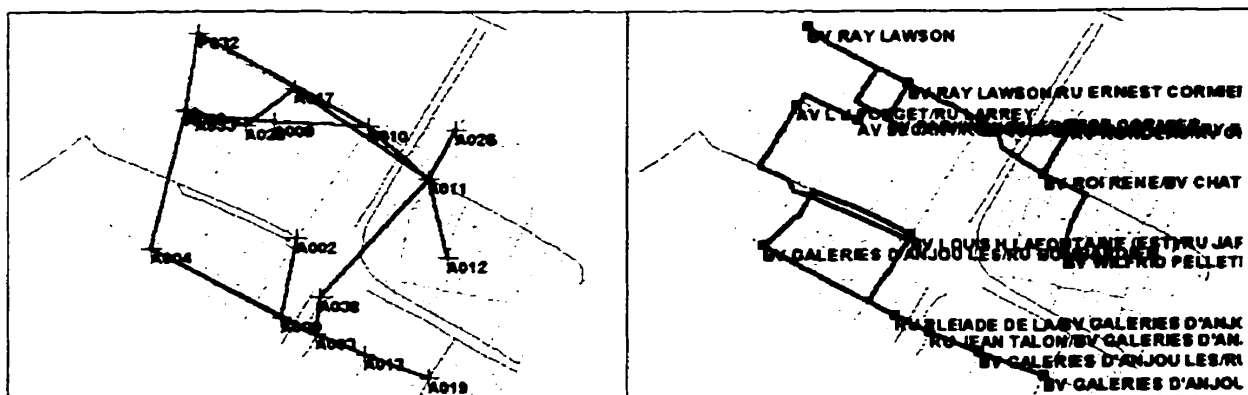


Figure An- 22: Méthode de superposition des réseaux dans MADTOO

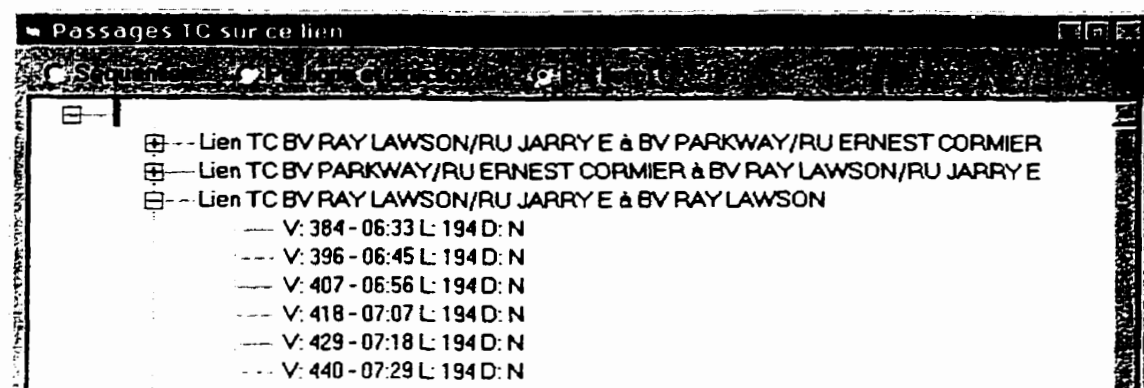


Figure An- 23: Caractérisation des objets associés à un lien de voirie

Toutes ces expérimentations tirent profit de la réutilisation des composantes (objets, propriétés, méthodes) du logiciel et du modèle-objets associé.

ANNEXE D. MADAME: MODULE D'ANALYSE DÉSAGRÉGÉE DES ATTRIBUTS ET MÉTHODES DE DONNÉES D'ENQUÊTES

Cette sous-section présente quelques expérimentations traitant des propriétés et méthodes applicables aux objets d'enquête origine-destination. Tout comme pour les réseaux, une application Visual Basic a été développée afin de supporter les actions: MADAME, le module d'analyse désagrégée des attributs et méthodes de données d'enquêtes.

D.1 Présentation

Le logiciel MADAME est constitué principalement d'une interface multi-documents permettant de préparer des "rapports", soit des documents HTML présentant les résultats de l'application de méthodes imbriquées et en cascade appliquées à un échantillon tiré d'un fichier d'enquête origine-destination. *Les bribes d'échantillons sont des tirés à part rendus anonymes de l'enquête origine-destination 1993 de la STCUM et sont utilisées ici sous toute réserve et sous haute confidentialité.*

Le format HTML a été choisi pour les rapports car il permet une grande flexibilité quant à la forme et la taille des documents fabriqués. Ils peuvent contenir du texte, des tableaux, des graphes, des cartes et autres figures. Le tout est affiché dans une fenêtre d'un "navigateur" faisant partie intégrante de l'application MADAME (voir Figure An- 24), ou peut être consulté à partir d'un autre logiciel de navigation Internet.

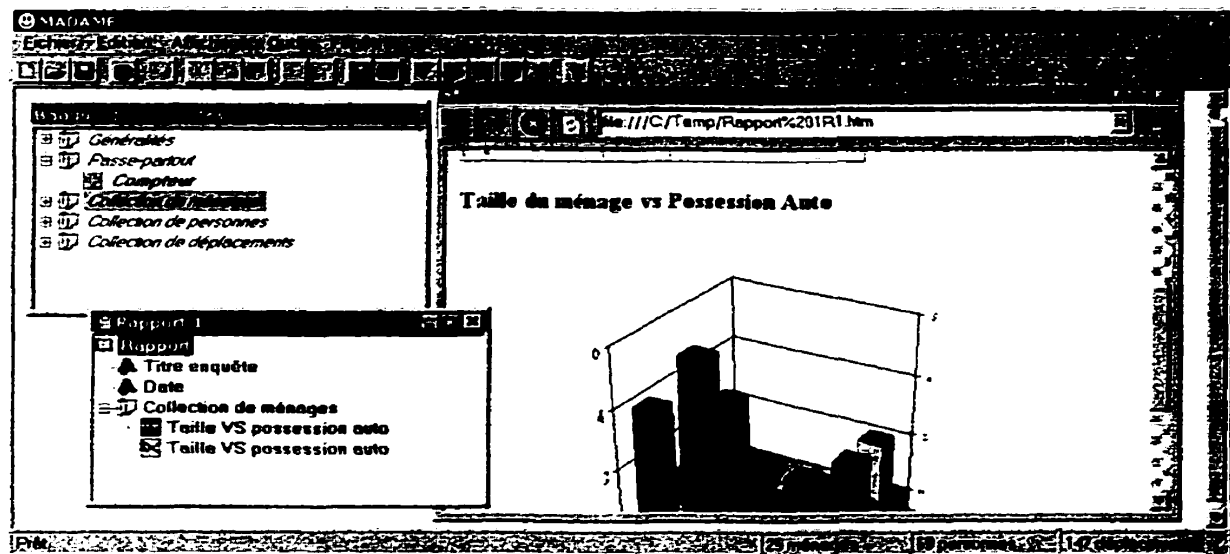


Figure An- 24: Interface de MADAME

D.2 Fonctionnement






L'utilisation du logiciel est relativement simple: il s'agit de fabriquer des rapports à partir d'une banque de méthodes offertes à l'ouverture. Chaque rapport prend la forme d'une liste hiérarchisée constituée de nœuds qui auront été "dragués" de la banque de méthodes. Chaque nœud représente une méthode appliquée à l'objet renvoyé par le nœud situé à un échelon supérieur de la hiérarchie.

À cet effet, quatre types de nœuds sont identifiés:

- Le nœud "Rapport" est situé au sommet de la hiérarchie et supporte tous les autres types de nœuds. Il représente l'échantillon (objet "enquête").
- Les nœuds "Collection de ..." sont des méthodes permettant de constituer des collections d'objets tel que les ménages, personnes et déplacements.
- Les nœuds "Pour chaque ..." sont des méthodes d'énumération successive des objets d'une collection.

- Les autres nœuds sont des méthodes spécifiques aux objets créés par les trois autres types de nœuds (sous-méthodes) et le résultat de leur application prend diverses formes dans le rapport, tel que décrit dans Tableau An- 7.

Tableau An- 7: Types de méthodes associées aux objets dans MADAME

	Ces méthodes renvoient de l'information textuelle, tel que l'identification des objets, l'heure, la date, la description des origines et destinations.
	Ces méthodes impliquent une compilation, un calcul de taux ou une manipulation des objets. Elles peuvent ainsi renvoyer des résultats sous forme de tableau, selon le cas.
	Ces méthodes fabriquent et affichent un graphique à partir des propriétés des objets associés.
	Ces méthodes fabriquent et renvoient une carte géographique sur laquelle sont dessinés des déplacements et des localisations.
	Ces méthodes spéciales ne s'appliquent pas spécialement à un type d'objet et peuvent ainsi être affichées à tout endroit du rapport.

D.2.1 Règles de fabrication des rapports

Les nœuds de la banque utilisés pour la fabrication de rapports reflètent les méthodes applicables aux objets Ménage, Personne, Déplacement et leurs dérivés. Ils doivent donc répondre aux règles du modèle-objets de l'enquête origine-destination, tel qu'énoncé à la section 7.4.1.

Ainsi, on ne pourra pas, par exemple, placer une collection de ménages sous une collection de personnes, et ou une instruction "Pour chaque personne" sous une collection de déplacements. À cet effet, le logiciel guide l'utilisateur en indiquant les nœuds-méthodes qu'il est possible de placer sous le nœud du rapport sélectionné. Par exemple, à la figure suivante, le nœud "Collection de ménages" est sélectionné dans le

rapport (fenêtre de droite). Comme suite à cette sélection, on retrouve dans la fenêtre de gauche des nœuds, en caractères gras, pouvant être sélectionnés et "dragués" sous le nœud "Collection de ménages".

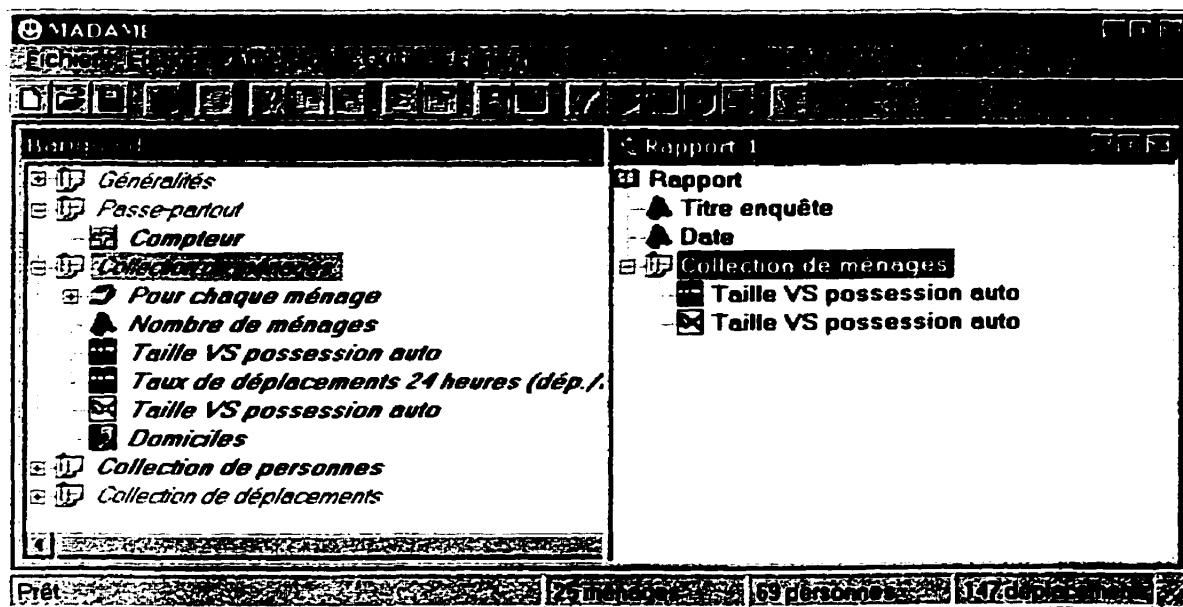


Figure An- 25: Sélection des noeuds-méthodes dans MADAME

Si on poursuit avec l'exemple, on remarque qu'il est possible de glisser sous une collection de ménages les nœuds suivants:

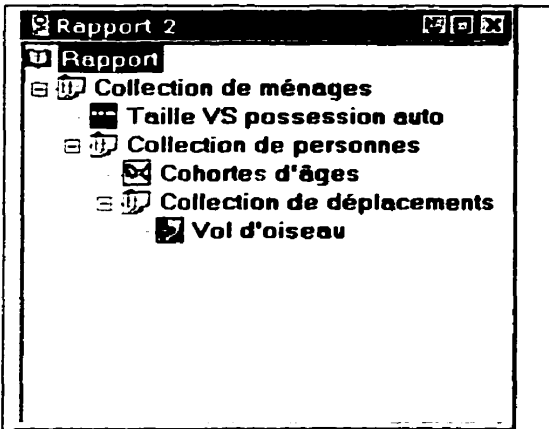
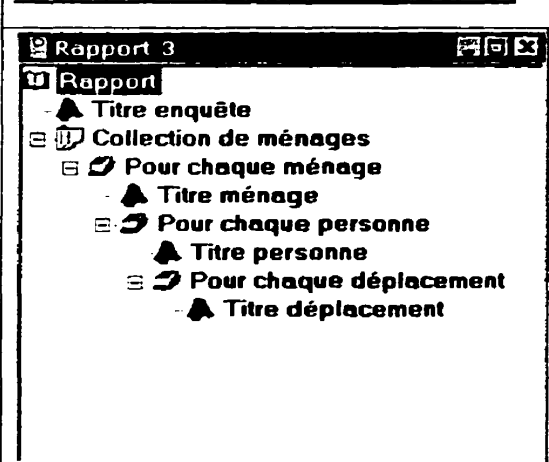
- La méthode "Compteur", qui est une méthode passe-partout indiquant un numéro séquentiel. Cette méthode s'applique à tous les niveaux et est donc proposée.
- La méthode "Pour chaque ménage", qui permet d'énumérer un à un les objets Ménage de la collection.
- Les méthodes applicables à un groupe de ménages, tel que le nombre, le tableau "taille VS possession automobile", des taux de déplacements (non exhaustif).

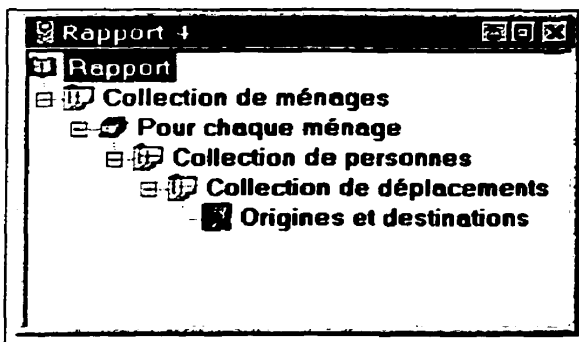
- La méthode "Collection de personnes" peut être placée directement sous une collection de ménage. On obtiendra ainsi un ensemble de toutes les personnes membres de ces ménages, auquel on pourra associer d'autres nœuds-méthodes.

D.2.2 Interprétation des rapports

La hiérarchie de nœuds instituée dans les rapports représente des imbrications et des méthodes en cascade, toutes exécutées à partir du nœud racine par itération. Chaque nœud peut soit renvoyer un objet à ses nœuds enfants, soit générer un code HTML ajouté au document constituant le rapport, et ainsi de suite jusqu'au dernier niveau. Voici quelques exemples de rapport et les actions qu'ils engendrent (Tableau An- 8).

Tableau An- 8: Quelques exemples de rapports de MADAME

	<p>Fabrique 1 tableau "Taille VS possession auto" regroupant tous les ménages de l'échantillon.</p> <p>Fabrique 1 graphique de cohortes d'âges regroupant toutes les personnes de l'échantillon.</p> <p>Fabrique 1 carte de tous les déplacements de l'échantillon (à vol d'oiseau).</p> <p>= 3 éléments fabriqués.</p>
	<p>Insère 1 fois le titre de l'enquête.</p> <p>Insère le titre du ménage (numéro de feuillet) pour chaque ménage, chaque personne et chaque déplacement, le tout étant imbriqué.</p> <p>= le nombre d'éléments fabriqués est égal à la somme des ménages, personnes et déplacements.</p>

	<p>Fabrique une carte des origines et destinations des déplacements de chaque ménage de l'échantillon.</p> <p>= le nombre d'éléments fabriqués est égal au nombre de ménages. En enlevant le nœud "Pour chaque ménage", on n'obtiendrait qu'une seule carte pour tout l'échantillon.</p>
---	--

Le nœud racine du rapport contient un objet "enquête" généré suite à la lecture d'un extrait ou de l'entièreté d'un échantillon d'une l'enquête origine-destination (format DBF). Cette lecture entraîne le montage informationnel des objets Déplacement, Personne et Ménage en vertu du modèle-objets de l'enquête.

Chaque méthode est explicitement appliquée à l'objet associée, et ce même dans le code Visual Basic. Par exemple, le deuxième rapport du Tableau An- 8 correspond, en langage informatique, au contenu du Tableau An- 9.

Les applications des méthodes de type "For Each" et celles effectuant le montage des collections peuvent être fortement nuancées. En effet, des conditions peuvent être ajoutées à chaque nœud du rapport, ce qui permet de ne retenir que les objets répondant à des critères déterminés, comme, par exemple, les ménages de plus de 4 personnes ou les déplacements de plus de 10 kilomètres utilisant tel ou tel mode.

Tableau An- 9: Exemple de code Visual Basic généré pour un rapport de MADAME

```
Dim ms as Menages, m as Menage
Dim ps as Personnes, p as Personne
Dim ds as Deplacements, d as Deplacement
Set ms = Enquete.Menages
For Each m in ms
    GenHTML m.Titre 'Méthode qui génère le code HTML
    Set ps=m.Personnes
    For Each p in ps
        GenHTML p.Titre
        Set ds = p.Deplacements
        For Each d in ds
            GenHTML d.Titre
```


Next d Next p Next m

D.3 Requêtes multivariées et multicritères

Bien que la forme des rapports et l'agencement des méthodes semble simple, à priori, ceux-ci constituent —et c'est bien une force de l'approche orientée-objet et totalement désagrégée— de formidables outils d'examen, d'analyse et de validation des données. L'interface de montage par "dragage" est conviviale, certes, mais le traitement itératif et à plusieurs niveaux imbriqués des nœuds-méthodes constitue une action multivariées et multicritères dépassant les simples requêtes de type SQL pouvant être effectuées sur un fichier plat.

En effet, la méthode traditionnelle (SQL-SGBD) consiste à préparer, dans le fichier d'enquête origine-destination, les variables à analyser. Cela nécessite des pré-calculs et un formatage spécial, allant de la répétition de champs de données à la création de champs balises permettant, par exemple, de déterminer le début des enregistrements traitant d'un ménage. Ces fichiers peuvent ensuite faire l'objet de requêtes SQL relativement efficace, donnant naissance à de nouveaux fichiers plats pouvant être post-analysés.

Dans MADAME, on est en présence du même fichier plat d'enquête, qui contient du reste l'ensemble des données "de base" dont on dispose. Cependant, le modèle-objets est monté dès la lecture du fichier, ce qui engendre la création des objets Ménage, Personne et Déplacement sujets à l'application des méthodes. On peut utiliser plusieurs formes de fichier d'enquête (un ménage demeure un ménage quelle que soit la forme du fichier initial), seul quelques propriétés risquant d'être indisponibles d'une enquête à l'autre. Le code programmé derrière les nœuds-méthodes s'applique toujours aux même objets et n'a donc pas besoin d'être modifié.

D.4 Expérimentations

Les figures suivantes présentent quelques représentations de rapports créés par MADAME: sommaires, graphes, cartes, tableaux et autres. Plusieurs autres modes de représentation sont envisagées: fabrication de classeurs Excel, application de méthodes de tableaux croisés dynamiques, calculs de chemins sur les déplacements, rapports détaillés sur les modes, ajout de types de nœuds dans la banque pour mieux refléter l'utilisation du réseau de transport collectif et la desserte des générateurs de déplacements (nœuds métro, générateur, ligne TC).

file:///C:/Temp/RapportIR4.htm

Information descriptive sur le ménage

Taille du ménage: 3
 Nombre de véhicules: 1
 Nombre de personnes qui se sont déplacées: 2

Personne #1

Âge: 38
 Sexe: Femme
 Nombre de déplacements: 5

Déplacement #1

Motif: 6
 Heure de départ: 07:55:00

Origine

DOMICILE	39	H8P3C3
----------	----	--------

Destination

NOTRE DAME DES RAPIDES	LASALLE	H8P1G5
------------------------	---------	--------

Déplacement #2

Figure An- 26: Rapport de MADAME sous forme descriptive

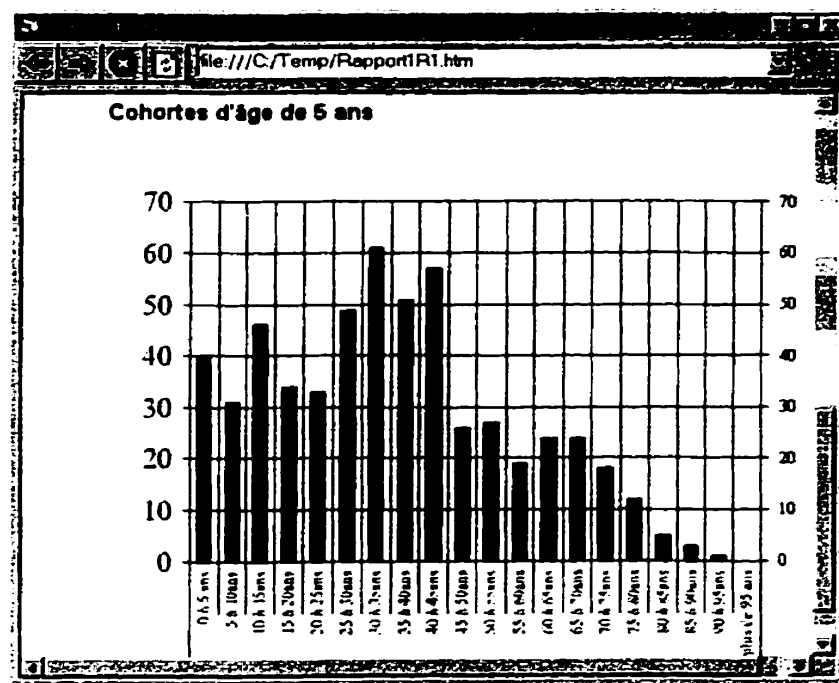


Figure An- 27: Rapport de MADAME sous forme de graphe

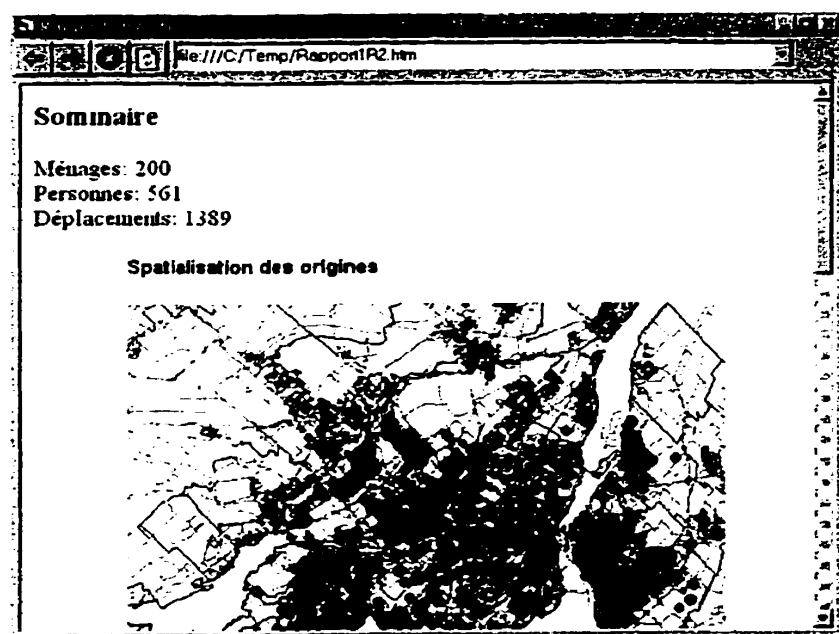


Figure An- 28: Rapport de MADAME sous forme de carte

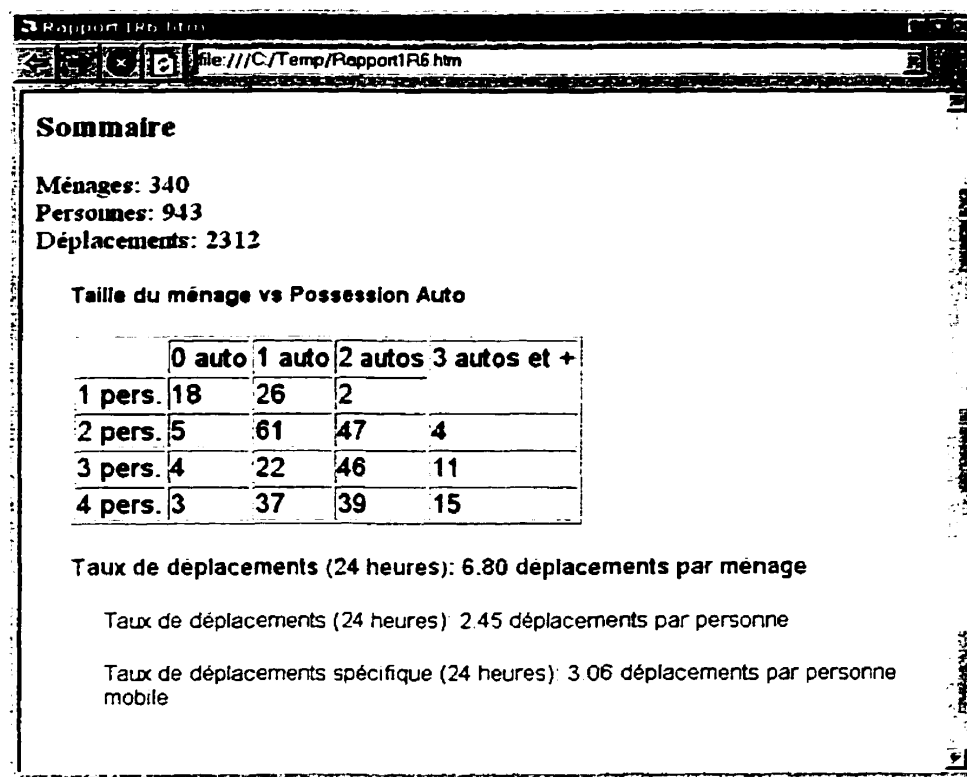


Figure An- 29: Rapport de MADAME sous forme de sommaire

ANNEXE E. LA VISUALISATION INTÉGRÉE DES DONNÉES D'ENQUÊTE À L'AIDE D'UNE APPLICATION EXCEL

La visualisation intégrée des ménages, personnes et déplacements présents dans un fichier d'enquête origine-destination tire profit d'une modélisation objet dans le logiciel Excel. En effet, ce tableur dispose déjà de plusieurs outils nécessaires aux représentations graphiques et à la mise en forme des données. Figure An- 30: Écran de visualisation d'un déplacement dans Excel présente le premier écran d'une application de visualisation développée en langage VBA dans le tableur Excel.

E.1 Écran sur le déplacement

Les sections "EOD", "ménage", "personne" et "domicile" présentent l'information contenue dans les champs du fichier d'enquête. Les cartes du déplacement et du centre-ville indiquent les localisations de l'origine et de la destination du déplacement à vol d'oiseau. En cas d'utilisation du métro, une représentation spéciale des stations d'entrée et de sortie est ajoutée.

La section "Lieux" mentionne l'origine, le point de jonction et la destination du déplacement. La section "Déplacement" en indique les propriétés: motif, heure, ponts empruntés. L'affichage des modes fait l'objet d'une méthode spéciale qui met en forme l'information à afficher tel que la dénomination des modes empruntés et le libellé abrégé des stations de métro.

Index: 758 Feuille: 761 Semaine: 37
 Observations globales: Feuille: 765 Jour: 1

Langue: ☐ Anglais ☒ Français
 Nombre de personnes: 3
 Nombre de véhicules: 0

Numéro de la personne: 1
 Age: 38
 Sexe: Masculin
 Statut: Marié
 Possession automobile (d): Oui

Origine: Domicile (H3H2G6)
 Destination: PEERLESS CLOTHING, MONTREAL

Motif: Travail
 Heure de départ: 8:15
 Pont(s): Ne s'applique pas

Mode(s): Métro
 Ligne(s): 1
 Station(s): GUY RIE

Carte du déplacement

Carte du métro

—○— Ligne 1 —○— Ligne 2 —○— Ligne 4
 —○— Ligne 5 —●— Entrée —●— Sortie

Figure An- 30: Écran de visualisation d'un déplacement dans Excel

E.2 Écran sur le ménage

Le second écran (Figure An- 31) présente les activités effectuées par les membres du ménage au cours de la journée. Un diagramme à barre décrit la séquence d'activités, auxquelles est associée une coloration selon le motif déclaré. De plus, un diagramme indique l'occupation du domicile en fonction du temps (dual de l'activité).

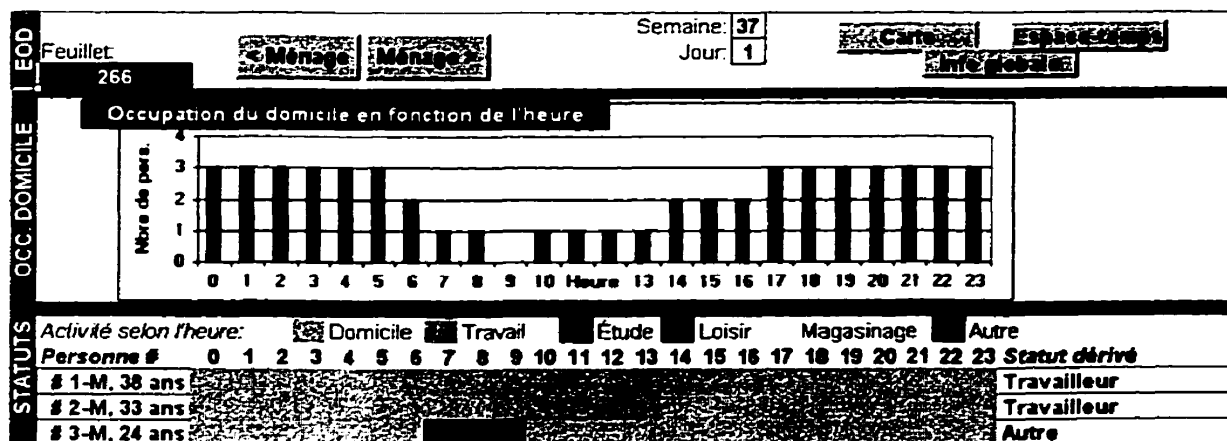


Figure An- 31: Écran de visualisation des activités dans Excel

E.3 Écran sur les caractéristiques spatio-temporelles

Le troisième écran (Figure An- 32) présente les caractéristiques spatio-temporelles des déplacements des membres du ménage. Les graphes de la distance et de l'éloignement en fonction du temps permettent de calculer des vitesses et mesurer la zone d'influence d'un déplacement. Une carte schématique des déplacements effectués par le ménage est également disponible (Figure An- 33). Cette carte est tout simplement un graphe Excel de type "nuage de points" (X-Y).

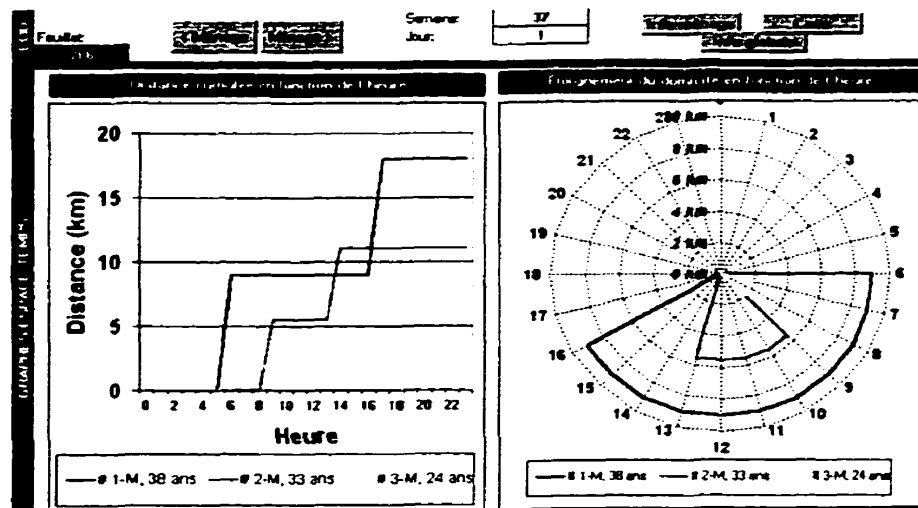


Figure An- 32: Écran de visualisation des propriétés spatio-temporelles dans Excel

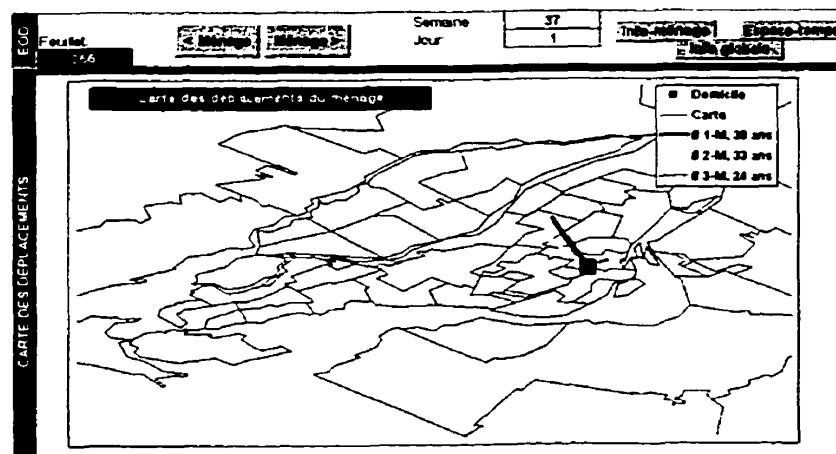


Figure An- 33: Carte des déplacements du ménage

LISTE DES FIGURES DES ANNEXES

Figure An- 1: Modèle-objets du transport adapté.....	189
Figure An- 2: Modèle-objets du système de transport des marchandises (routier)	191
Figure An- 3: Système-objets du problème de simulation du métro.....	193
Figure An- 4: Modèle-objets du problème de simulation du métro.....	193
Figure An- 5: Projection dans le référentiel du code de voie.....	194
Figure An- 6: Interface du simulateur métro	195
Figure An- 7: Affichage de statistiques sur les objets "CodeVoie"	196
Figure An- 8: Modèle-objets du graphe employé dans Excel.....	197
Figure An- 9: Création des nœuds	199
Figure An- 10: Création et caractérisation des liens	200
Figure An- 11: Calcul interactif d'un arbre	201
Figure An- 12: Écran sur les propriétés d'un objet nœud.....	203
Figure An- 13: Écran sur les propriétés du réseau	204
Figure An- 14: Matrice des distances minimales entre les nœuds.....	204
Figure An- 15: Cartes de quelques réseaux de voirie	206
Figure An- 16: Calcul d'arbres avec variabilité des temps de parcours.....	207
Figure An- 17: Chemin le plus court avec et sans variabilité.....	207
Figure An- 18: Interface de MADTOO	209
Figure An- 19: Affichage de propriétés	210
Figure An- 20: Options de MADTOO.....	211
Figure An- 21: Méthode d'animation de l'objet arbre	212

Figure An- 22: Méthode de superposition des réseaux dans MADTOO	212
Figure An- 23: Caractérisation des objets associés à un lien de voirie	213
Figure An- 24: Interface de MADAME	215
Figure An- 25: Sélection des noeuds-méthodes dans MADAME	217
Figure An- 26: Rapport de MADAME sous forme descriptive	221
Figure An- 27: Rapport de MADAME sous forme de graphe	222
Figure An- 28: Rapport de MADAME sous forme de carte	222
Figure An- 29: Rapport de MADAME sous forme de sommaire.....	223
Figure An- 30: Écran de visualisation d'un déplacement dans Excel	225
Figure An- 31: Écran de visualisation des activités dans Excel.....	225
Figure An- 32: Écran de visualisation des propriétés spatio-temporelles dans Excel	226
Figure An- 33: Carte des déplacements du ménage	226

LISTE DES TABLEAUX DES ANNEXES

Tableau An- 1: Propriétés et méthodes associées au modèle-objets du transport adapté	190
Tableau An- 2: Propriétés et méthodes associées au modèle-objets du transport des marchandises	192
Tableau An- 3: Quelques objets du simulateur de métro	196
Tableau An- 4: Propriétés des objets élémentaires	198
Tableau An- 5: Code VBA d'affichage de la matrice des distances minimales	203
Tableau An- 6: Exemples de propriétés attribuées à des réseaux de voirie	205
Tableau An- 7: Types de méthodes associées aux objets dans MADAME	216
Tableau An- 8: Quelques exemples de rapports de MADAME	218
Tableau An- 9: Exemple de code Visual Basic généré pour un rapport de MADAME	219