

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

REPRÉSENTATION ET VISUALISATION
DES OBJETS DU TRANSPORT URBAIN

GANG CAO

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

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

© Gang CAO, 2005.



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-16762-5

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-16762-5

NOTICE:

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

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

AVIS:

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

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

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

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

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

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


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

REPRÉSENTATION ET VISUALISATION
DES OBJETS DU TRANSPORT URBAIN

présenté par: CAO Gang

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

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

Mme MORENCY Catherine, Ph.D. présidente

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

M. BAASS Karsten, Ph.D. membre

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je veux remercier mon directeur de recherche, Monsieur le professeur Robert Chapleau, ing., Ph.D., pour l'encouragement et les conseils qu'il m'a promulgués tout au long de la recherche et de la rédaction de ce mémoire.

Je désire aussi souligner les aides que j'ai reçues du mon collègue, Luc Pellecuer, étudiant doctoral.

Mes remerciements vont également à Émilie Voyer, à Daniel Piché, à Eya-Wetu Talaki, à Sébastien Gagné, à Vincent Dionne et à tous les autres étudiants et étudiantes de local B-330 et du laboratoire de transport.

RÉSUMÉ

Il y a environ quatre-vingts ans, la phrase «One picture is worth a thousand words» (Barnard 1921), soulignait déjà la puissance de l'image relativement au texte. Les recherches récentes démontrent que la visualisation profite de l'efficacité du traitement d'une immense quantité de données ainsi que de son unique capacité de découvrir la structure et la tendance des informations spatiales du système visuel de l'homme. Depuis l'ère de l'informatique, cet avantage de la visualisation a été renforcé par les avancements techniques des matériels informatiques (l'ordinateur personnel, les réseaux Internet, les cartes graphiques 3D etc.) et des logiciels (les graphiques interactifs sur ordinateur, les animations, les outils des visualisations 3D, etc.)

En ce qui concerne le domaine des transports urbains, la modélisation et la planification des transports impliquent toutes sortes d'informations incluant les informations sociodémographiques, spatio-temporelles, topologiques et opérationnelles. Sur ce point, les instruments de visualisation conventionnellement utilisés dans le domaine des transports ne suffisent plus pour représenter les données de multiples caractères et sources.

Dans cette perspective, ce mémoire démontre le rôle indispensable de la visualisation dans l'analyse des transports à l'aide de divers types de représentations et visualisations (les diagrammes, les images, les cartes thématiques et les animations) sur deux groupes des objets de transport : les objets de l'offre de transport (les objets du réseau de transport en commun comme, un arrêt, une ligne d'autobus, etc.) et les objets de la demande de transport (les objets des enquêtes Origine-Destination comme une personne, un déplacement, etc.) dans le contexte de la Grande Région de Montréal. Ces objets de transport sont définis dans le cadre d'une approche totalement désagrégée orientée-objet qui permet d'effectuer les traitements et analyses systématiques de ces informations.

L'étude consiste alors en deux étapes :

Dans un premier temps, nous débutons avec l'étude des concepts fondamentaux de la visualisation (sa définition et la sémiologie graphique associée) et des diverses techniques récentes de la représentation graphique. Par ailleurs, l'étude sur les représentations thématiques 3D pour les données multivariées ainsi que les techniques de représentation des données spatio-temporelles sont également exposées.

Dans un second temps, les expérimentations sur les objets de l'offre et de la demande de transport confirment l'intérêt et la pertinence de la visualisation dans le but de représenter et d'analyser des phénomènes de transport en utilisant diverses applications et langages (VBA, Excel, les logiciels SIG, VRML). Pour les objets de l'offre de transport, les objets d'arrêt, ligne, voyage, tournée et véhicule sont étudiés, tandis que pour les objets de la demande de transport, la visualisation des trois objets des enquêtes (la personne, le déplacement et le ménage) est présentée. Il est à noter que, dans cette étape, nous nous sommes particulièrement intéressés au caractère spécifique de la propriété spatio-temporelle des objets. Plusieurs exemples réalisés à l'aide du langage VRML montrent les potentialités de l'utilisation des visualisations 3D et des animations pour ce type de propriété.

ABSTRACT

About eighty years ago, the sentence “one picture is worth a thousand words” (Barnard 1921), revealed the power of visualization in comparison of the text. Recent researches show that the visualization can take the advantage of the efficiency of treating large quantity of information and the unique pattern and trend recognition capabilities of the human visual system. From the beginning of information era, these advantages have been reinforced by the progress in both hardware and software, like personal computer, Internet, interactive computer graphic, animations, 3D technologies etc.

When it comes to the ground of urban transportation, the transportation modeling and planning often involve all kinds of information, for example, the socio-demographic information, the spatial-temporal information, topological information, operational information, etc. So, those visualization tools which were conventionally used in the domain of transportation are not sufficient for representing these data of multi-characters and sources.

From this point of view, this thesis demonstrates the essential role of visualization in the transportation analysis by the various types of visualizations (charts, images 2D, 3D and the animations) of two groups of transportation objects: the transportation supply objects (the transit network) and the demand objects (the objects of the origin-destination survey) within the context of the Greater Montreal Region. Those transportation objects are defined in the framework of Object-Oriented Totally Disaggregate Approach (Chapleau 1992) which allows this information to be processed and to be analyzed systematically.

Two steps of research were conducted in this thesis:

Topics addressed in this research are twofolds: firstly, we present a study upon the fundamental concepts of visualization (the notion and the semiology of graphic) and the types, methods and graphic technologies of visualization 2D, 3D. Moreover, a study

regarding the 3D visualization of the multivariable data and the methods about representing the spatial-temporal information were also covered.

Secondly, the experiments concerning the transportation supply objects and demand objects confirmed that the interest and significance of the visualization for the purpose of representation and analysis of the transportation phenomena by using the software and language like VBA, Excel, GIS and VRML in 2D, 3D representations and animations. For the transportation supply objects, the objects bus stop, transit line, trip, tour and vehicle were investigated; while for the transportation demand objects, the work was focused on the three survey objects, the person, the trip and the household. Especially, some particular attentions were given to the visualization of those attributes carrying spatial-temporal information. And the result demonstrates the potential of using 3D visualization/animation using the VRML as an effective solution for this purpose.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	IV
RÉSUMÉ	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIERES.....	IX
LISTE DES FIGURES.....	XII
LISTE DES TABLEAUX	XIX
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 Objectifs	2
1.2 Méthodologie	2
1.3 Contenu	3
CHAPITRE 2 : LA DEFINITION ET LES FONCTIONS DE LA VISUALISATION.....	4
2.1 Notion de visualisation.....	4
2.2 Une revue de littérature sur les techniques de visualisation.....	7
2.2.1 La cartographie.....	7
2.2.2 La géovisualisation.....	10
2.2.3 La visualisation informationnelle/Data visualisation.....	11
2.2.4 La visualisation scientifique et la géovisualisation.....	12
2.3 Les fonctions de la visualisation de transport	13
2.3.1 Fonction représentative de la visualisation de transport	13
2.3.2 Fonction communicative de la visualisation en transport.....	15
2.3.3 Fonction analytique de la visualisation de transport.....	16
CHAPITRE 3 : SEMIOLOGIE GRAPHIQUE	19
3.1 Système graphique – sémiologie et langage de cartographie.....	19
3.2 Sémiologie 3D.....	26

3.2.1 La modélisation d'une scène 3D	26
3.2.2 La typologie de la sémiologie 3D	30
3.2.3 Classification des données selon la nature de l'information.....	31
3.3 Les variables visuelles.....	32
3.3.1 La position.....	32
3.3.2 L'orientation.....	34
3.3.3 La forme	35
3.3.4 La taille.....	37
3.3.5 La couleur.....	41
3.3.6 La <i>texture-structure</i>	47
3.3.7 La transparence	47
3.3.8 Le choix des variables en fonction de la nature des informations	48
3.4 Les présentations thématiques 3D.....	49
3.4.1 Représentation des informations qualitatives.....	49
3.4.2 Représentation d'une seule variable quantitative et ordonnée	50
3.4.3 Représentation multivariée.....	53
3.5 Représentation des données spatio-temporelles.....	59
CHAPITRE 4 : LA MODELISATION TOTALEMENT DESAGREGEE ET	
ORIENTEE- OBJET	64
4.1 Les systèmes d'information géographique en transport.....	64
4.1.1 SIG et SIG-T	64
4.2 La modélisation totalement désagrégée de la demande en transport	66
4.2.1 La modélisation agrégée	67
4.2.2 La modélisation désagrégée	68
4.2.3 L'approche orientée-objet de la modélisation totalement désagrégée	69
CHAPITRE 5 : VISUALISATION DES OBJETS DU RESEAU DE	
TRANSPORT COLLECTIF.....	73
5.1 Les composants d'un réseau de transport collectif.....	73

5.2	La représentation des objets <i>Ligne</i> et <i>Arrêt</i>	74
5.2.1	La représentation des objets <i>Ligne</i> et <i>Arrêt</i> 1D.....	75
5.2.2	La représentation des objets <i>Ligne</i> et <i>Arrêt</i> en 2D	84
5.3	Les représentations des objets <i>Voyage</i> , <i>Tournée</i> et <i>Véhicule</i>	92
5.3.1	La visualisation de l'objet <i>Voyage</i> 1D	93
5.3.2	La visualisation de l'objet <i>Voyage</i> 2D	95
5.3.3	La visualisation des véhicules par l'animation	104
 CHAPITRE 6 : REPRESENTATION DES OBJETS DES ENQUETES		
	ORIGINE-DESTINATION.....	106
6.1	Les objets de l'enquête Origine-Destination.....	106
6.1.1	Les enquêtes Origine-Destination Montréalaises.....	106
6.1.2	Les objets de l'enquête Origine-Destination.....	108
6.1.3	Description des données.....	110
6.2	Présentation des propriétés non spatiales des objets.....	110
6.2.1	Présentation de la composition du ménage univariée	111
6.2.2	Présentation multivariée de la composition du ménage	112
6.2.3	Visualisation des relations entre les propriétés socio-démographiques	118
6.3	La visualisation des propriétés pseudo-geométriques du ménage	120
6.3.1	La représentation des localisations des phénomènes - Nuage des points 2D	120
6.3.2	Nuage de points en 3D	121
6.3.3	La visualisation des données en surface.....	123
6.4	Visualisation de l'objet <i>Déplacement</i>	129
6.4.1	Visualisation des itinéraires de l'objet <i>Déplacement</i>	129
6.4.2	La visualisation de l'objet <i>Personne</i>	135
6.4.3	Représentation de la matrice de déplacements.....	137
 CONCLUSION		1

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 L'image mentale et le monde environnant (Muehrcke et Muehrcke 1992)	5
Figure 2.2 Les relations entre les intervenants de la visualisation.	6
Figure 3.1 Les sept variables visuelles de Bertin (Bertin et Barbut 1967).....	21
Figure 3.2 Carte tactique d'implantation de sept variables visuelles en 3D (Vasconcellos 1992).....	23
Figure 3.3 Les exemples de la transparence et de <i>Crispness</i>	24
Figure 3.4 Carte d'implantation des variables visuelles (Slocum 1999).....	26
Figure 3.5 Le processus de Rendu 3D	30
Figure 3.6 La variable de position appliquée aux objets ponctuels, linéaires et zonaux	32
Figure 3.7 Utilisation du plan demi transparent	34
Figure 3.8 Utilisation de ligne de référence	34
Figure 3.9 Utilisation de la lumière (une lumière est placée dans le coin inférieur couche de la scène).....	34
Figure 3.10 Variable d'orientation pour les phénomènes de point, de ligne et de zone.	35
Figure 3.11 Illusion Ebbinghaus.....	38
Figure 3.12 Illusion Müller-Lyer.....	38
Figure 3.13 Illusion Ponzo.....	38
Figure 3.14 La variation de taille appliquée aux différents axes sur la forme de cylindre et cône	38
Figure 3.15 Utilisation du volume des sphères et des cubes.	39

Figure 3.16 Représentation de données multidimensionnelles avec la variable de taille.....	40
Figure 3.17 Représentation graphique du modèle HSL	43
Figure 3.18 Les types de schéma de couleur et combinaison (Brewer 1999).	44
Figure 3.19 Schéma séquentiel.....	45
Figure 3.20 Schéma quantitatif.....	45
Figure 3.21 Schéma de divergence.....	45
Figure 3.22 Exemple d'utilisation des schémas de couleur dynamique, par l'application CommonGIS	45
Figure 3.23 Les possessions d'automobiles en 1987 - 1.	51
Figure 3.24 Les possessions d'automobiles en 1987 - 2.	51
Figure 3.25 Les possessions d'automobiles en 1987 - 3.	52
Figure 3.26 Possession d'automobiles en 1987 en « <i>Stepped surface</i> ».....	53
Figure 3.27 Les glyphes réalisés par le programme de R.....	55
Figure 3.28 Les faces de Chernoff. (Chapleau 2003).....	56
Figure 3.29 Les figures colorées de Tufte.	56
Figure 3.30 Visualisation multivariée à l'aide de symbole multidimensionnel.	57
Figure 3.31 Visualisation multivariée par la taille et la couleur.....	59
Figure 3.32 L'exemple de la visualisation de données spatiales temporelles de Minard (1869)	60
Figure 3.33 Visualisation de données temporelles. Gauche: Sector Graph. Centre: Stacked Bar Chart. Droit: Circle Graph (Müller et al. 2003).....	60
Figure 3.34 Visualisation multi variable par spiral graphe- 1 (star glyphe) (Lipchak et Ward 1998).....	62

Figure 3.35 Visualisation multi variable par spiral graphe- 2 (barre) (Lipchak et Ward 1998).....	62
Figure 3.36 3D spiral graph en visualisant les données en grand volume. (Weber et al. 2001)	62
Figure 3.37 ThemeRiver, visualisation de changement climatique depuis 100 ans.....	62
Figure 3.38 Les nombres de déplacements effectués dans 24h, tous les motifs sauf retour à domicile.	63
Figure 4.1 Les objets de transport par méta classe (Trépanier 1999).....	71
Figure 5.1 Modèle-objet du réseau de transport collectif (cas montréalais), d'après Trépanier 1999.	74
Figure 5.2 Représentation d'une ligne d'autobus avec une ligne simple.	75
Figure 5.3 Représentation des horaires des arrêts.	77
Figure 5.4 Représentation des statistiques des arrêts avec la taille du symbole.....	77
Figure 5.5 Représentation des statistiques des arrêts avec la couleur du symbole.....	78
Figure 5.6 L'embarquement et débarquement aux arrêts (Rouge – débarquement, bleu - embarquement)	78
Figure 5.7 L'embarquement et débarquement aux arrêts (Rouge – débarquement, vert - embarquement)	79
Figure 5.8 Le diagramme du profil de charge d'une ligne d'autobus.	80
Figure 5.9 Représentation des multiples profils de charges.	80
Figure 5.10 Profil de charge 3D	82
Figure 5.11 Les capacités et le profil de charge d'une ligne d'autobus.	83

Figure 5.12 Visualisation des charges et capacités d'une ligne d'autobus en VRML. (La surface rouge est l'enveloppe de la capacité et la bleue est le profil de charge).....	84
Figure 5.13 Le réseau fictif de Machiaville.....	85
Figure 5.14 Un réseau de sept lignes visualisé par le logiciel VIPER.	85
Figure 5.15 Visualisation des statistiques des arrêts -1.....	87
Figure 5.16 Visualisation des statistiques des arrêts -2.....	87
Figure 5.17 Visualisation des statistiques des arrêts -3.....	88
Figure 5.18 Le profil de charge total sur la ligne 4.	89
Figure 5.19 Le profil de charge de la ligne numéro 4, aller et retour.....	89
Figure 5.20 Profil de charge 24 heures sur le réseau de métro montréalais (Chapleau 2003).	90
Figure 5.21 Le profil de charge 3D sur le réseau de métro montréalais. (Chapleau 2003)	90
Figure 5.22 Les profils de charge 3D d'aller et retour sur le réseau Machiaville.	91
Figure 5.23 L'interface interactive de visualisation du profil de charge sur le réseau... ..	92
Figure 5.24 Représentation de la tournée et voyage d'autobus.....	93
Figure 5.25 Diagramme espace-temps	94
Figure 5.26 Le diagramme espace-temps démontrant la ponctualité d'autobus	94
Figure 5.27 Les événements qui déclenchent l'enregistrement des positions dans la base des données de GPS présentés par les couleurs.	97
Figure 5.28 Les événements qui déclenchent l'enregistrement des positions dans la base de données de GPS différenciés par les formes des symboles.....	97
Figure 5.29 La vitesse du véhicule présentée par la largeur des lignes (sens retour).....	98

Figure 5.30 Les temps arrêtés aux arrêts (sens retour).	99
Figure 5.31 Les charges et la capacité d'autobus pour le sens retour. (Rouge – les charges, Vert – la capacité d'autobus).	99
Figure 5.32 Les passagers-km d'autobus.	100
Figure 5.33 Les statuts aux arrêts. (En avance/en retard).	100
Figure 5.34 L'exemple d'espace-temps en 3D extrait de données GPS d'un autobus.	102
Figure 5.35 La combinaison de la représentation des voyages d'autobus et du nombre de personnes montées/descendues à l'arrêt d'autobus.	102
Figure 5.36 La charge d'un autobus : les rayons du cylindre sont en proportion du volume.	103
Figure 5.37 La charge d'un autobus : les hauteurs des facettes sont en proportion du volume.	103
Figure 5.38 L'analyse de la ponctualité des autobus 3D.	104
Figure 5.39 L'écran capturé d'une animation d'espace-temps.	105
Figure 6.1 Intégration des composantes du système d'information totalement désagrégé. (Chapleau 2003)	107
Figure 6.2 La distribution du ménage présentée par le diagramme de barre, le diagramme circulaire et le diagramme de barres empilées en 100%.	112
Figure 6.3 Visualisation du tableau de contingence avec la taille.	114
Figure 6.4 Visualisation du tableau de contingence avec la couleur.	114
Figure 6.5 Tableau de contingence de trois variables autologi, langue et perslogi.	115
Figure 6.6 Visualisation du tableau de contingence avec l'arbre conventionnel.	116
Figure 6.7 Représentation du tableau de contingence avec la taille.	117

Figure 6.8 Représentation du diagramme TreeMap de la composition du ménage. (Sur l'ordre langue – personnes par ménage - auto par ménage).....	118
Figure 6.9 Les graphiques de nuage de point.	119
Figure 6.10 Diagramme de « Parallel coordinate » réalisé par logiciel ILOG.	120
Figure 6.11 La représentation de nuage de points des ménages.	122
Figure 6.12 La représentation du type nuage de points 3D.	123
Figure 6.13 La carte de densité de ménage calculée avec la méthode des noyaux.	125
Figure 6.14 L'utilisation de la transparence dans la carte densité ménage d'enquête..	126
Figure 6.15 Représentation de la densité par les contours de la densité.	126
Figure 6.16 Représentation de la densité par les contours polygones 3D.	127
Figure 6.17 Représentation de la densité avec les lignes de contour 3D.	127
Figure 6.18 Représentation de la densité avec les polygones 3D.	128
Figure 6.19 Représentation 3D de la densité avec le modèle de terrain virtuel.	128
Figure 6.20 Représentation des déplacements en 2D.	131
Figure 6.21 Représentation des déplacements vers le centre-ville.	131
Figure 6.22 Représentation des déplacements en 3D.	132
Figure 6.23 Définition d'un itinéraire de déplacement et composantes analytiques pertinentes. (D'après Chapleau 2003).....	133
Figure 6.24 Le diagramme espace-temps d'un déplacement.	134
Figure 6.25 La représentation d'un déplacement en 2D.	134
Figure 6.26 Représentation d'un déplacement en 3D.	135
Figure 6.27 Les images séquencées de l'animation.	136

Figure 6.28 L'image capturée d'une animation représentant les nombres de personnes se trouvant dans l'île de Montréal pendant 24H.	137
Figure 6.29 La représentation de la matrice de déplacements avec les lignes colorées.	138
Figure 6.30 La représentation de la matrice de déplacements avec la largeur de ligne.	139
Figure 6.31 Matrice Origine-Destination montréalaise de 8 grandes régions d'analyse représentée par les facettes -1.	141
Figure 6.32 Matrice Origine-Destination montréalaise représentée par les facettes - 2.	142
Figure 6.33 Matrice Origine-Destination montréalaise de 8 grandes régions d'analyse représentée par les cylindres colorées.	142

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 Décomposition d'une scène 3D	29
Tableau 3.2 Table de guide de choix de variables selon la nature de données.....	48
Tableau 6.1 Tableau de contingence des deux variables Autologi et Perslogi.....	113

Chapitre 1 : Introduction

Dans le contexte du transport urbain, surtout dans les cas du transport en commun, la complexité des données impliquées dans l'analyse et la planification grandit de façon exponentielle grâce à l'évolution des techniques de cueillette d'information (photo aérienne et satellite, GPS, carte à puce, comptage automatique, enquête et recensement informatisés) et le déploiement de nouvelles méthodes sur l'analyse et la planification des transports. En ce qui concerne l'utilisation des données disponibles de manière structurée et efficace, l'approche orientée-objet appliquée à la modélisation totalement désagrégée propose une vision novatrice du domaine de la modélisation en transport (Chapleau 1992, Trépanier 1999).

Cependant, l'analyste fait encore face à la complexité croissante des processus de représentation des données et des résultats d'analyse. Pour résoudre ce problème, les outils comme les images, les tableaux, les textes, les diagrammes et les cartes sont fréquemment utilisés. Par rapport aux autres moyens de représentation, la représentation visuelle est avantageuse du fait que moins de mémoire et de temps est nécessaire pour traiter les informations, et plus particulièrement quand il s'agit d'informations spatiales. Ne dit-on pas « Une image vaut mille mots » ? Au cours de ces dernières années, cet avantage est renforcé par les avancements sur la technologie informationnelle qui nous permettent de réaliser les fonctions graphiques puissantes (la cartographie numérique, les animations, les fonctions interactives, les constitution de scènes tridimensionnelles, etc.) sur les ordinateurs personnels de manière économique et efficace.

Les techniques de visualisation non seulement se rendent indispensables pour des motifs de rapidité et de facilité de représentation d'un phénomène, mais aussi représentent une nouvelle manière d'analyser et de manipuler les données de toutes natures.

Sur ce point, les instruments de visualisation conventionnellement utilisés dans notre domaine de transport ne peuvent pas satisfaire aux exigences posées par ces données de multiples caractères et multiples sources.

En plus, la visualisation profite des apports des multiples disciplines et sous-disciplines comme la visualisation informatique, la cartographie, le système d'information géographique et la visualisation cyberspace. Donc l'accumulation de ces nouvelles techniques de visualisation, hors de portée de plusieurs spécialistes en transport, n'est en fait pertinente que pour ceux qui ont pu suivre l'évolution (ou révolution) de ces techniques de visualisation. La mise en évidence de nouvelles technologies visuelles sur les diverses facettes de transport demande une étude sur les travaux effectués dans ces domaines de recherche.

Ce défi consiste alors en deux axes. Le premier est l'investigation des différentes manières de représenter visuellement les concepts et les données. Le second est l'application des techniques de visualisation dans le cadre de l'approche totalement désagrégée orientée-objet.

1.1 Objectifs

L'objectif de cette recherche est de montrer les méthodes potentiellement utiles pour fins de représentation visuelle des phénomènes de transport. Plus précisément, on veut :

- reconnaître les règles fondamentales du langage graphique élaboré pour le passage de données à la présentation visuelle;
- investiguer les techniques de représentation des propriétés des objets du transport urbain, y compris des données statistiques ainsi que des informations spatio-temporelles en utilisant un ensemble de technologies informationnelles (VRML, gestion de base de données, langage de programmation VBA et applications SIG).

1.2 Méthodologie

Dans ce mémoire, bien que les techniques de visualisation soient nombreuses et qu'il soit hors de question de toutes les examiner simultanément, quelques questions

importantes sont choisies afin d'illustrer les processus de réalisation et les potentialités des différents types de visualisation. À ce propos, nous sommes fortement intéressés par les nouvelles techniques de présentations multidimensionnelles.

Dans un premier temps, nous débutons avec une revue de littérature sur les concepts fondamentaux de visualisation (définition et sémiologie graphique) et les techniques de visualisation. Dans cette étape, le langage VRML est choisi comme format de présentation 3D, une exploitation de ce langage nous permet de mieux étudier cet outil puissant qu'est la modélisation de scène 3D. Ensuite, les concepts de système d'information géographique en transport et le système de modélisation de transport avec l'approche totalement désagrégée orientée-objets seront exposées dans le contexte de la grande région de Montréal afin de mieux comprendre les caractéristiques des objets de transport. Finalement, les expérimentations réalisées sur les objets de transports nous éclairerons sur les utilisations de la visualisation sous diverses formes (2D, 3D et animation en 3D).

1.3 Contenu

Suivant cette brève introduction, le deuxième chapitre amorcera quelques réflexions sur la notion de visualisation de façon générale ainsi qu'une synthèse des fonctions de visualisation se trouvant dans le domaine des transports. Le troisième chapitre est consacré à la discussion de concepts fondamentaux de la visualisation – la sémiologie graphique 3D. Nous examinerons par la suite l'approche totalement désagrégée orientée-objet de la modélisation de la demande de transport afin de nous dévoiler les caractéristiques des objets impliqués. Finalement, les expérimentations de la visualisation 2D et 3D des objets, réalisées avec les données agrégées et désagrégées, seront exposées.

Chapitre 2 : La définition et les fonctions de la visualisation

Parmi les cinq sens, la vision est le sens le plus développé chez l'être humain. Comme l'œil reçoit plus d'information que l'ensemble des autres sens, l'utilisation de la visualisation est plus efficace, surtout quand il s'agit d'informations spatiales ou d'un grand volume d'information. Bien que l'exploitation de cet avantage soit pourtant loin d'être une idée récente (les cartes, les diagrammes et les graphiques sont utilisés tout le long de l'histoire du développement scientifique (Dürsteler 2002)), après l'évolution informatique, la notion de visualisation a été beaucoup transformée. Dépendant du motif et des caractéristiques des données à visualiser, plusieurs axes de recherche ont été formés dans différents domaines de recherche scientifique. Parmi ces axes, quatre ont plus d'influence sur la visualisation des transports, soit la cartographie, la géovisualisation, la visualisation informationnelle et la visualisation scientifique.

Dans ce chapitre, afin de donner une vue globale des principaux contributeurs de la représentation de phénomènes de transport, des fonctions et des utilisations de la visualisation dans transport, nous débutons avec une réflexion sur la notion de visualisation en général. Nous présenterons par la suite une brève revue sur les quatre axes de visualisation mentionnés ci-dessus et nous finirons avec une synthèse sur les fonctions et le rôle de la visualisation dans le domaine des transports.

2.1 Notion de visualisation

La visualisation, en terme général, est le processus de mise en évidence, d'une façon matérielle, de l'action et des effets d'un phénomène. Plusieurs chercheurs ont élaboré diverses définitions sur la visualisation :

1. Un outil de communication.

Parce que l'être humain est unique quant à la capacité d'apprendre et de connaître le monde environnant, la communication entre l'homme et son environnement se fait en général de deux façons, soit par communication directe, c'est-à-dire par les

cinq sens (par le goût, l'odorat, la vision, l'ouïe et le toucher), soit par communication indirecte (par les langages, les graphiques, les symboles, les mathématiques, etc.). Si on considère la visualisation comme une façon de communiquer avec le monde extérieur, elle appartient à la deuxième catégorie. (Muehrcke et Muehrcke 1992) (Voir la Figure 2.1).

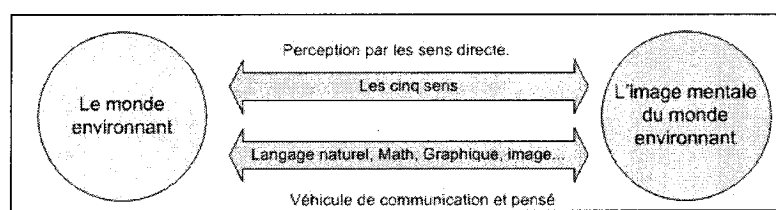


Figure 2.1 L'image mentale et le monde environnant (Muehrcke et Muehrcke 1992)

2. Une méthode de calcul.

Avec l'utilisation des ordinateurs dans la recherche, le processus de visualisation implique de plus en plus de traitements mathématiques. Sur ce point de vue, McCormick et DeFaint (1987) constate que :

« The visualization is ... a method of computing. It transforms the symbolic into the geometric, enabling researchers to observe their simulations and computations ».

Cette définition a provoqué un enthousiasme phénoménal sur la recherche en visualisation scientifique durant les années 1990. Ainsi, elle a entraîné une transformation majeure dans l'histoire de la visualisation, au cours de laquelle la visualisation a été reformulée comme un instrument permettant de présenter les résultats abstraits d'un monde virtuel par les divers dispositifs d'affichage.

3. Une action de cognition

Une deuxième définition, critiquée par plusieurs chercheurs, déclare :

« Visualization . . . is definitely not restricted to 'a method of computing' », « it is first and foremost an act of cognition, a human ability to develop

mental representations that allow us to identify patterns and create of impose order». (DiBiase 1990)

Cette définition se concentre sur le rôle d'un outillage scientifique avec lequel on peut découvrir des connaissances nouvelles.

À notre avis, dans le contexte du transport, il n'existe pas de définition intemporelle de la visualisation. La définition de la visualisation évolue et évoluera au rythme du développement technologique, des exigences posées par les intervenants et des perspectives développées autour de sa fonctionnalité. Telle que schématisé à la Figure 2.2, la visualisation est plutôt un ensemble d'instruments et de fonctionnalités qui interviennent entre les informations, les réalisateurs (ceux qui créent les visualisations) et les récepteurs (ceux qui reçoivent les informations à l'aide de visualisations).

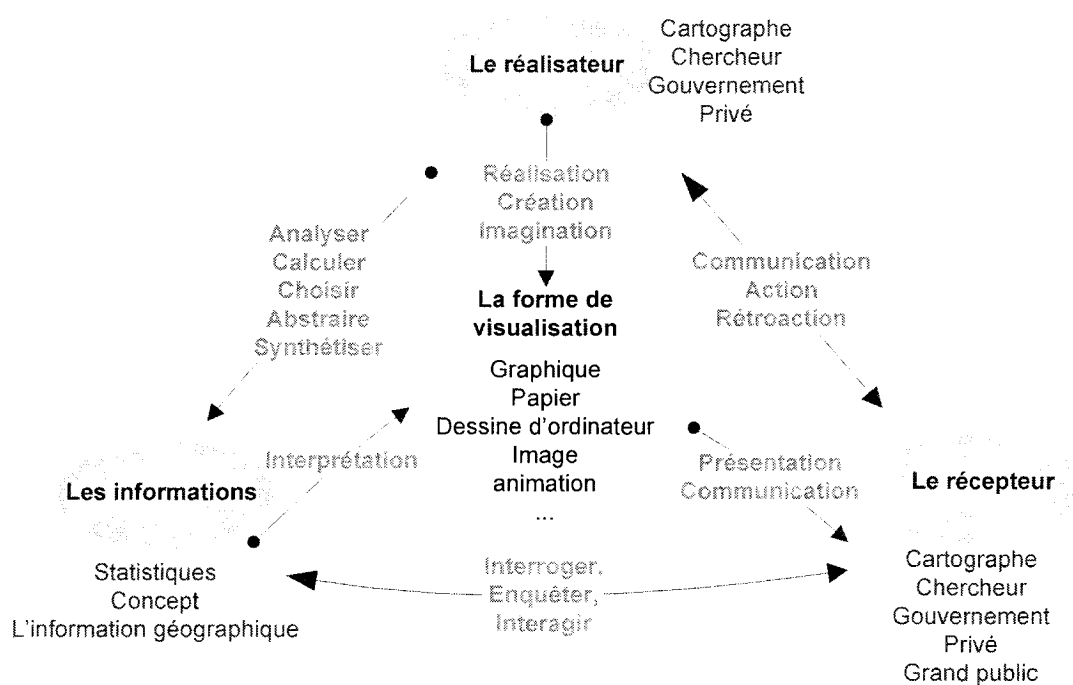


Figure 2.2 Les relations entre les intervenants de la visualisation.

2.2 Une revue de littérature sur les techniques de visualisation

Les techniques de visualisation sont développées dans de multiples disciplines et sous-disciplines, y compris la cartographie, la géovisualisation, la visualisation informationnelle et la visualisation scientifique.

2.2.1 La cartographie

La cartographie, pour donner une définition simple, traite de la production et de la recherche concernant la carte (Robinson 1984). De toutes les disciplines qu'on a mentionnées antérieurement, la cartographie paraît avoir la plus longue histoire. Nos ancêtres ont développé la capacité de produire la carte, qui représente des relations spatiales entre les différents objets. Bien entendu, l'élément essentiel pour une carte sera sa dimension spatiale et pour que la carte soit utile, ces relations spatiales doivent être une réduction ou une abstraction de la réalité.

Généralement, une carte appartient à une des deux classes : les cartes référentielles (*reference map*) et les cartes thématiques. La carte référentielle, portant aussi le nom de carte à usage général (*general purpose map / general reference map*), se préoccupe de la représentation des éléments du monde géographique réel par des éléments graphiques. Le but d'une carte thématique (aussi appelée *carte statistique* ou «*single topic map*»), par contre, vise à montrer non seulement des informations sur le monde géographique réel, mais aussi des données sur les phénomènes localisables (Dent 1990; Béguin et al. 2000).

2.2.1.1 La carte référentielle

Pour une carte référentielle, l'accent est plutôt sur la localisation (la position planimétrique et altimétrique), la forme (géométrie), les dimensions et l'identification. Deux exemples courants de ce type de carte sont les cartes topographiques et les atlas.

Selon Béguin et al (2000), Les cartes référentielles ont les caractéristiques suivantes :

- Premièrement, une carte référentielle est une vue objective de la réalité. Elle ne doit pas changer selon la perspective du cartographe, mais respecter les caractéristiques des objets réels ;
- Deuxièmement, une carte référentielle est toujours une abstraction de la réalité. Lorsqu'il est impossible de répliquer toutes les caractéristiques de l'objet concerné, la généralisation devient un passage obligé à la création d'une carte référentielle.

Donc normalement, un processus de généralisation d'une carte référentielle consiste en trois opérations, la sélection, la schématisation, et l'harmonisation (Béguin et al. 2000).

1. D'abord, l'opération de *sélection* nous permet de choisir les objets intéressants à représenter. Selon l'ordre appliqué, on peut distinguer deux types de sélection, la sélection qualitative et la sélection quantitative. Par exemple, pour un atlas de transport routier du Canada, la présentation des capitales de chaque province est une sélection qualitative; mais si l'on présente seulement les villes qui ont plus de 10 000 d'habitants, il s'agit d'une sélection quantitative.
2. En suite, l'opération de *schématisation* nous permet d'omettre les détails redondants. Cette opération est souvent liée à l'échelle de la carte, parce que naturellement certains détails importants pour une carte à grande échelle ne sont plus nécessaires pour une échelle plus petite. Pour une carte sous forme papier, une fois que la carte est produite, le niveau de détail est fixé, on ne peut plus le changer, mais pour une carte numérique, certains logiciels nous permettent de changer les niveaux de détails selon l'échelle de la carte et le niveau de résolution de l'appareil d'affichage. Ce changement se fait automatiquement selon de nombreux algorithmes prédéfinis, qui nous permettent d'effectuer une simplification à partir des contours ou d'un tracé initial en conservant la forme générale pour une plus petite échelle.

3. Finalement, l'opération *d'harmonisation* nous permet de synchroniser les deux premières opérations.

2.2.1.2 La carte thématique

La carte thématique est née de la convergence de la statistique et de la cartographie. Elle a été originalement introduite pour représenter les données statistiques qui portent aussi les caractéristiques spatiales. Habituellement, deux avantages peuvent être tirés d'une carte thématique ; d'une part, un arrière-plan qui aide à construire l'image mentale du monde réel au niveau de la différenciation spatiale, d'autre part, une couche thématique qui représente les données statistiques.

Étant donné que l'arrière-plan sert seulement comme référence spatiale, il n'est en fait qu'une carte référentielle avec un niveau de détail réduit qui dépendra du niveau de connaissance de l'utilisateur sur la forme spatiale de l'environnement concerné. Naturellement, plus l'utilisateur connaît la géométrie du territoire, moins l'information sur la carte est nécessaire afin de s'orienter.

La couche thématique est le cœur d'une carte thématique. Dans cette couche, on transpose des données abstraites à des éléments graphiques et on fait varier les aspects graphiques de ces symboles (couleur, taille, etc.) de telle sorte qu'ils reflètent la variation d'un attribut d'un phénomène localisé. Avant l'ère informatique, diverses théories et méthodologies de transposition furent élaborées par les cartographes afin de réglementer le processus de création de la couche thématique. L'emploi de l'ordinateur dans la cartographie a beaucoup augmenté l'efficacité de la production de la carte. Aujourd'hui, la cartographie touche une partie importante des fonctions des logiciels de systèmes d'information géographique. Donc la cartographie a subi une double influence, d'une part, les nouveaux types de présentation qui n'étaient pas réalisables à cause de la limite de capacité de calcul sont maintenant introduits à la cartographie. Ainsi, lorsque les processus de création peuvent être regroupés dans la boîte noire d'un logiciel, les néophytes en cartographie sont capables de produire des cartes en quelques clics de souris. D'autre part, ces logiciels, qui font souvent parti des systèmes

d'information géographique, sont généralement programmés dans le but de faciliter l'opération, mais ne tiennent pas compte des principes cartographiques.

À propos de la cartographie numérique, il faut mentionner Slocum (1999), qui a réalisé une étude systématique sur quatre types de cartes thématiques numériques courants, les cartes choroplèthes, les cartes en symbole proportionnelle, les cartes isoplèthes et les cartes de point (nuage de points). L'examen détaillé de ces types de cartes est exposé dans les sections suivantes.

2.2.2 La géovisualisation

Depuis des années, les développements sur l'exploitation de données géo-référencées ont formé une nouvelle sous-discipline, la géovisualisation. En effet, la géovisualisation est la convergence des approches de visualisation scientifique, de la cartographie, de l'analyse d'image, de l'analyse exploratoire de données, de la visualisation informationnelle, de la géostatistique et des SIG (Systèmes d'information géographique). Elle permet d'exploiter, d'analyser, de synthétiser et de présenter les données géospatiales. (MacEachren et Kraak 2001; Kraak 2002).

Les travaux de Jiang et al. (2002) ont regroupé les fonctions de géovisualisation en deux catégories.

- les fonctions *d'exploitation* des données géospatiales, étendent les fonctions d'exploitation de la carte conventionnelle. Grâce à l'avancement des outils graphiques informatiques disponibles, particulièrement dans l'environnement des SIG, les cartes ne sont plus considérées comme une source d'information géographique, mais comme une interface interactive (entre la base de données géographique et les usagers) ainsi qu'un outil d'analyse.
- les fonctions de *collaboration* qui aident à la communication entre différents groupes ou différents processus (le système de planification, système d'aide à la décision, système de service à la clientèle etc.).

Puisque les informations spatiales ont déjà besoin d'au moins deux dimensions pour les visualiser, les bases de données spatiales ainsi que les bases de données spatio-temporelles requièrent naturellement une présentation multidimensionnelle. Dans cette perspective, on observe une tendance forte à l'utilisation de la réalité virtuelle, ou encore l'environnement virtuelle géographique (GeoVE). Par exemple, Kwan (1999, 2002) a montré les approches multidimensionnelles dans les processus de l'analyse spatiale des déplacements avec l'outil SIG-3D. De l'autre côté, les travaux de, MacEachren, Kraak, Hardisty et al. (Hardisty et al. 2001; MacEachren et Kraak 2001; MacEachren et al. 2001; Kraak 1993; 1999; 2002; 2003) exposent les potentialités de GeoVE pour fins d'analyse des données spatio-temporelles.

2.2.3 La visualisation informationnelle/Data visualisation

Infovis – la visualisation informationnelle, vise à rechercher des outils afin d'aider les gens à exploiter et expliquer les données (Munzner 2002).

Deux types de questions sont examinées par les chercheurs : d'une part, la question de la mise en évidence d'un concept ou d'une structure (les informations hiérarchiques, les clusters, etc.), d'autre part, la question de la découverte des connaissances, à l'aide des représentations visuelles et de grands volumes de données.

Obtenir la géométrie et la localisation artificielle extraites des données est le caractère qui distingue essentiellement InfoVis/DataVis de la cartographie. Sur ce point, la méthodologie développée est premièrement de construire un objet graphique à partir de données abstraites et deuxièmement de placer cet objet dans un plan 2D ou une scène 3D afin que des connaissances puissent être représentées clairement. Concrètement, pour une base de données, la connaissance est déduite des relations entre les divers champs.

De manière brève, Grinstein et Ward (2002) ont résumé trois types d'objets graphiques amplement utilisés selon leurs niveaux de complexité :

- L'objet primitif du niveau de base : inclut les points, les lignes, les polygones.

- L'objet primitif du niveau intermédiaire. Comprend les images, diagrammes, structure filaire (*Wireframe*), isosurface, élastique (*rubber sheet*), ligne de courant (*streamline flow*), linge d'émission (*strikeline flow*), ruban et tubes, icônes/glyphes, coordonnées parallèles et affichage empilé en dimension (*dimensional stacking*).
- L'objet primitif de haut niveau. Par exemple, les combinaisons des objets du niveau intermédiaire, les multiples vues, les géométries de surface avec linge de courant (*streamline*) ainsi que les surface translucides avec les glyphes ou plans de coupe.

2.2.4 La visualisation scientifique et la géovisualisation

La visualisation scientifique apparaît à la suite de la naissance de l'ordinateur qui donne aux chercheurs une capacité de calcul sans précédent. Cependant, les chercheurs se sont trouvés dans une situation difficile lorsque la quantité de données issues des résultats a augmenté phénoménalement et qu'aucune technique à ce moment-là ne pouvait les traiter. Dans ce contexte, cette sous-discipline a explosé en l'espace de quelques années seulement, après le rapport de McCormick et al.(1987), qui annonce que

«Visualization is a method of computing. It transforms the symbolic into the geometric, enabling researchers to observe their simulations and computations. Visualization offers a method for seeing the unseen. It enriches the process of scientific discovery and fosters profound and unexpected insights. In many fields it is already revolutionizing the way scientists do science. »

Malgré l'influence incontestable de McCormick sur la création de cette nouvelle sous-discipline de la visualisation scientifique, beaucoup de chercheurs trouvent cette définition discutable. Aujourd'hui la visualisation scientifique est considérée non seulement comme une méthode de calcul, mais aussi comme une méthode d'analyse. Les chercheurs non seulement utilisent la fonction de communication de la visualisation pour présenter les données afin de mieux illustrer les résultats, mais aussi utilisent la

fonction analytique de la visualisation afin de chercher à mieux comprendre les résultats (Scientific Visualization Laboratory 2005).

2.3 Les fonctions de la visualisation de transport

Avant d'explorer plus profondément les questions posées, il convient de résumer les fonctions de visualisation ainsi que les types d'information impliqués. On peut ainsi distinguer trois grandes catégories de fonctions, soit les fonctions représentatives, les fonctions communicatives et les fonctions analytiques de visualisation en transport. Ces trois catégories de fonctions traitent des informations de différentes natures, résolvent les problèmes sous différentes perspectives et impliquent les différents groupes d'utilisateurs.

2.3.1 Fonction représentative de la visualisation de transport

Comme l'introduction de ce mémoire l'a montré, la carte est un outil qui représente la localisation des objets. Sa fonction est de présenter un certain phénomène à son utilisateur. Aujourd'hui, quand on fait référence au terme « représentation », on évoque non seulement l'information indicative localisée, mais aussi l'information topologique et statistique/descriptive.

- L'information *indicative localisée* permet de répondre à deux types de questions. D'une part, les questions sur la localisation d'objet: quelle est la position de tel édifice, etc. ? D'autre part, les questions sur la géométrie d'objet: quelle est la surface de tel champ, quelle est la longueur de tel tronçon d'autoroute, etc. ?
- L'information *topologique*, selon la définition mathématique, est un type d'information invariante par homéomorphisme, qui entre dans une analyse spatiale. Elle permet de répondre à des questions comme : quels sont les chemins possibles entre deux points d'un réseau, etc. ? En fait, c'est un type d'information sur la connectivité des objets. Dans un contexte de transport, elle sert principalement à la description du réseau. En la combinant avec

l'information sur la localisation et la géométrie des objets, on peut répondre aux questions tel quelle est le plus cours chemin entre deux points d'un réseau, etc. ?

- L'information *statistique/descriptive* possède des attributs sur un objet localisé ou non localisé. Elle permet de répondre à des questions comme : quelle est la capacité de telle autoroute, de tel autobus, etc. ?

L'information *indicative localisée* et *topologique* peut être visualisée de plusieurs façons :

- Les cartes topographiques bi-dimensionnelles ou tri-dimensionnelles, représentent précisément les observations concernant la position planimétrique (coordonnées géographiques), altimétrique, etc.
- Les cartes statiques indicatives sur des éléments géoréférencés. Les phénomènes représentés dans ce type de cartes sont relativement statiques. Ces cartes ne devraient pas être modifiées fréquemment. Ce sont par exemple des cartes concernant les éléments routiers, les autoroutes, les routes locales, les chemins de fer, les ménages, les stationnements, les aéroports, les points d'intérêts, etc.;
- Les cartes, les animations ou encore les simulations indicatives sur des éléments dynamiques. Ce sont par exemple des cartes de réseaux de transport collectif, d'arrêts d'autobus, de réseaux aériens, de déplacements, de lignes de désir, de localisation d'un véhicule, etc.
- Les diagrammes topologiques dans lesquels des éléments graphiques représentent les objets qui sont mis en relation par les connectivités entre les nœuds et lignes.

L'information *statistique/descriptive* peut être visualisée de différentes manières, selon la nature des données :

- Pour l'information qui présente des phénomènes non localisables ou dans les cas où l'information localisée est négligeable, le graphique ou diagramme statistique est bien développé. Par exemple, les diagrammes de barre, de point, de ligne, etc.
- Les cartes thématiques montrent des phénomènes localisables de toute nature, nominaux, qualitatifs ou quantitatifs (Béguin et al. 2000). Ce sont par exemple des cartes qui représentent les populations de différents secteurs, le profil de charge sur différents tronçons de lignes d'autobus, etc.

2.3.2 Fonction communicative de la visualisation en transport

En plus d'être utilisée comme outil de représentation, la visualisation sert aussi d'outil de communication. Dans le cas d'une société de transport en commun, les activités de planification, d'opération, d'acquisition et de dissémination des informations exigent des interfaces de transaction informationnelle entre les multiples agents impliqués (les experts, les opérateurs, le gouvernement, les usagers, etc.) (Chapleau et al. 2000). Cette transaction est réalisée à différents niveaux de communication, soit à un niveau de transaction totale (quand l'information est transmise de façon complète, sans aucune simplification), soit dans un niveau de transaction partielle et interactive (quand on transmet seulement une partie d'information à la fois, l'information est interrogée ou simplifiée avant d'être transmise). Depuis des années, les exemples concrets du groupe MADITUC développés autour de l'approche totalement désagrégée (MADPREP, SOGESTA, INFOMIT¹) ont montré certaines implantations de la visualisation sur le SIU (système d'information aux usagers).

¹ MADPREP : Module d'acquisition de données pour préparer la réponse émise par le préposé.

SOGESTA : Système ordonné de gestion des trajets d'autobus.

INFOMIT : Système d'informations intégré des services de transport collectif périurbain par autobus et train de banlieue.

2.3.3 Fonction analytique de la visualisation de transport

Normalement, on n'emploie qu'un des deux types de méthodes d'analyse de données, soit la méthode numérique ou la méthode visuelle. Depuis longtemps, on a observé une diversification entre ces deux méthodes. Pour les méthodes numériques, les statisticiens ont élaboré des théories et des concepts dans le but de comprendre les caractéristiques et la nature des données. Parmi les indices les plus connus, il y a les concepts de moment, de moyenne, de mode, de variance, de déviation etc.

En même temps, les outils traditionnels de la visualisation comme les graphes, tableaux et diagrammes se sont développés afin de mieux visualiser les données. Ces outils ont été depuis longtemps considérés comme les outils préliminaires et complémentaires des méthodes numériques. Néanmoins, durant l'ère d'informatique, la visualisation est devenue de plus en plus importante pour étudier les informations stockées dans d'imposantes bases de données.

Actuellement, l'utilisation des systèmes informatiques dans toutes les facettes des transports amène un chaos informationnel qui exige des processus d'identification, d'unification et de codification, et finalement d'exploitation. (Olsen 1999; Chapleau et al. 2000). La visualisation occupe un rôle capital dans ce processus d'exploitation.

Dans le contexte de la planification et de l'analyse du transport urbain, afin de répondre aux questions rencontrées par les intervenants (les opérateurs, les usagers, les agents gouvernementaux, etc.), une connaissance fine de l'offre et de la demande dans sa quotidienneté, sa variabilité et sa complexité est indispensable (Chapleau et al. 2002). Cette connaissance demande d'abord une collection d'information. Les recherches effectuées autour des enquêtes origine destination sur la mobilité, la relation entre les réseaux et les données donne un exemple de l'intégration et de l'exploitation de données provenant de divers sources (Chapleau 1997; Chapleau et al. 2000; Chapleau et Morency 2002; Chapleau 2002; Chapleau 2003). Cela inclut :

- les statistiques socio-démographies, par exemple, les statistiques de recensement ;
- les données numérisées de l'enquête téléphonique,
- et les données d'achalandage quotidien recueillies par l'opérateur.

Selon le type d'information impliqué, dans les fonctions analytiques, on peut encore identifier deux types de fonction d'analyse.

2.3.3.1 Visualisation reliée à l'exploitation de données non localisées

Le but de ce type de fonction est de trouver les structures, les modèles, les tendances, les irrégularités et les relations dissimulés dans les données. L'utilisation de la représentation visuelle avec l'interface interactive aide à résumer, identifier les problèmes ou les paramètres intéressants ou encore fournir une vue globale de l'ensemble de données (Fayyad et al. 2002). Les méthodes de visualisation utilisées incluent : graphe de ligne, diagramme de dispersion, iso-surface, glyphe, coordonnées parallèles, affichage empilé en dimension.

2.3.3.2 Visualisation reliée à l'analyse spatiale

Depuis des années, les SIG (systèmes d'information géographique), particulièrement les SIG-T (système d'information géographique de transport) sont considérés comme une approche efficace et fiable dans l'analyse des phénomènes de transport. (Wang 2004; Badard et Richard 2001). Beaucoup de travaux ont été réalisés pour exploiter la potentialité des SIG en utilisant les fonctions d'analyse spatiale interactive (l'analyse spatiale socio-démographique, l'analyse spatio-temporelle, etc.) et pour *aider à la décision* en représentant les résultats par divers modes (par les cartes, les tableaux, ou encore les simulations) (Gahegan et Lee 2000; Lowell et Annick 1999; Weber et Kwan 2002; Kwan 1999, 2002).

Dans le but de résoudre les problèmes spécifiquement liés à l'analyse de la mobilité d'un groupe particulier de personnes, Kwan et al. (Kwan 1995; Kwan 1999; Kwan et

Lee 2003; Weber et Kwan 2002) ont élaboré des représentations de type aquarium 3D. Dans ces représentations, les données d'un itinéraire personnel recueillies par un appareil GPS sont représentées par des lignes colorées dont l'élévation Z correspond au temps.

Kraak (2003), de son côté, a mis en pratique les applications de visualisation afin d'analyser les données spatio-temporelles sur l'individu, en plus d'employer le diagramme de *prisme d'espace-temps*², illustrant les espaces qui définissent les limites de chemins potentiels.

Dans ce chapitre, nous avons dénombré les multiples fonctions de la visualisation en transport. Dans le prochain chapitre, nous présenterons les concepts et vocabulaires fondamentaux en visualisation, la sémiologie graphique et le langage visuel exploité en 2D et en 3D.

² Une autre pratique sur le prisme d'espace-temps est introduite par Miller (1991). Son travail inclut aussi l'analyse des points de rencontre possibles entre deux individus par l'intersection de deux prismes.

Chapitre 3 : Sémiologie graphique

Dans son ouvrage *Sémiologie graphique*, Jacques Bertin et Barbut (1967) propose une décomposition de la perception visuelle en trois variables : les deux coordonnées (X, Y) et la variable visuelle (Voir Figure 3.1).

Pour Bertin, lorsque l'on observe une tache particulière dans un plan, la rétine est sensible à certaines variations d'énergie lumineuse autres que celles dues aux variations de sa position dans le plan (c'est-à-dire indépendamment de ses coordonnées X et Y).

Cette approche sémiologique est largement adoptée par la suite, puisqu'elle utilise un vocabulaire se référant à des variables visuelles, ce qui permet d'établir facilement une correspondance entre l'apparence du signe graphique et les informations numériques à transmettre.

Il faut constater que les travaux de Bertin portent particulièrement sur les graphiques 2D. Pour ce qui est des représentations 3D, une expansion phénoménale de l'utilisation de la visualisation 3D a été observée récemment dans le domaine de la cartographie (MacEachren et Taylor 1994; Hardisty et al. 2001), les SIG (MacEachren 1995; MacEachren et al. 2001; Kwan 1999; Kwan 2002; Weber et Kwan 2002 Kwan et Lee 2003) ainsi que la planification de transport (Chapleau 1993; Chapleau 2002; Chapleau 2003).

Le contenu de ce chapitre est organisé en deux parties. Dans un premier temps, une revue de littérature sur la sémiologie graphique et les diverses approches de l'utilisation des variables visuelles sera effectuée. Dans un second temps, une recherche exploratoire sur les variables visuelles sera effectuée dans le cadre de la sémiologie 3D.

3.1 Système graphique – sémiologie et langage de cartographie

Puisque la majorité des travaux sur la sémiologie graphique sont faits par les cartographes, dans cette section nous abordons certaines définitions essentielles de la sémiologie graphique ainsi que le langage utilisé en cartographie.

Dans le contexte cartographique, **la sémiologie graphique** regroupe l'ensemble des règles qui permettent l'utilisation d'un système graphique de signes pour la transmission d'information (Béguin et al. 2000). Elle regroupe :

- la TRANSCRIPTION, dans le système graphique de signes, d'un ensemble de données ;
- le TRAITEMENT de ces données afin de faire apparaître l'information d'ensemble recherchée ;
- et la CONSTRUCTION D'IMAGES le mieux adaptées à COMMUNIQUER cette information (Bertin et Barbut 1967).

Le langage de la cartographie par contre, regroupe l'ensemble des moyens graphiques qui permettent de différencier, de comparer, d'ordonner, de mémoriser les informations transcrites par la carte. Selon Béguin (Béguin et al. 2000), il comporte quatre composantes:

- les trois signes graphiques élémentaires : le point (position ponctuelle sans surface), le trait (position linéaire sans surface), la tache (surface) ;
- le figuré cartographique : construit par le cartographe à partir de signes graphiques élémentaires ;
- l'implantation graphique : la manière d'appliquer le figuré sur la carte ;
- les six variables visuelles (variables rétinienne) : la forme, la taille, la couleur, la valeur, l'orientation, et le grain.

Les trois signes graphiques élémentaires n'ont aucune signification en eux-mêmes, on ne les utilise que pour construire les figurés cartographiques. C'est dans cette construction qu'on peut différencier les figurés en utilisant les variables visuelles. Finalement, les figurés cartographiques peuvent être appliqués dans la carte. Ici, on trouve trois types d'implantation possible soit l'implantation *ponctuelle* qui attribue le

figuré à un point; l'implantation *linéaire* lorsque le figuré est appliqué à une ligne; et l'implantation *zonale*, par laquelle le figuré est déployé sur une surface.

LES VARIABLES DE L'IMAGE													
			POINTS			LIGNES			ZONES		12	14	
XY													
2 DIMENSIONS													
DU PLAN													
Z													
TAILLE													
VALEUR													
LES VARIABLES DE SÉPARATION DES IMAGES										13			
GRAIN													
COULEUR													
ORIENTATION													
FORME													

Figure 3.1 Les sept variables visuelles de Bertin (Bertin et Barbut 1967)

Par ailleurs, certains chercheurs trouvent que ces sept variables visuelles ne suffisent pas pour présenter tous les moyens de différencier les figurés graphiques. Parmi ces chercheurs, on trouve Robinson (1995), Vasconcellos (1992), MacEachren (1995) et Slocum (1999).

Robinson (1987) suggère une modification de typologie de sept variables visuelles de Bertin. Il propose une typologie de neuf variables visuelles, dans laquelle il ajoute la troisième dimension de la couleur (la *saturation*) et l'*arrangement*. L'approche de Robinson est aussi logique que celle de Bertin, vu que la typologie basée sur les trois variables de *couleur*, *valeur* et *saturation* est prédominante dans la pratique photographique.

Vasconcellos (1992) suggère certaines utilisations possibles sur sa carte tactique, « tactic map », où il utilise les sept variables de Bertin en ajoutant la variable *élévation*. Mais le point le plus remarquable dans l'approche de Vasconcellos est que les exemples donnés dans sa carte tactique sont conçus en 3D.

Cependant, même s'il a montré que, en 3D, les variables pourraient être perçues par les usagers de manière différente que l'environnement 2D, on trouve que les implantations ne sont ni complètes, ni indiscutables (voir Figure 3.2) :

- Vasconcellos (1992) a utilisé le changement de rayons de cylindre pour l'implantation ponctuelle et linéaire de la variable de taille, mais on peut aussi faire varier le volume et les autres dimensions du cylindre ;
- L'introduction de l'élévation comme nouvelle variable visuelle ne peut pas être logiquement justifiée, du fait que dans la sémiologie 2D, elle est déjà considérée comme la variation de taille (par exemple, la variation de la taille de la barre, de la colonne ou du bâton). En plus, cette implantation relève plutôt du dessin en perspective que de la représentation tridimensionnelle, puisque la surface de la base en est fixée et que la hauteur est le seul indice qui varie.

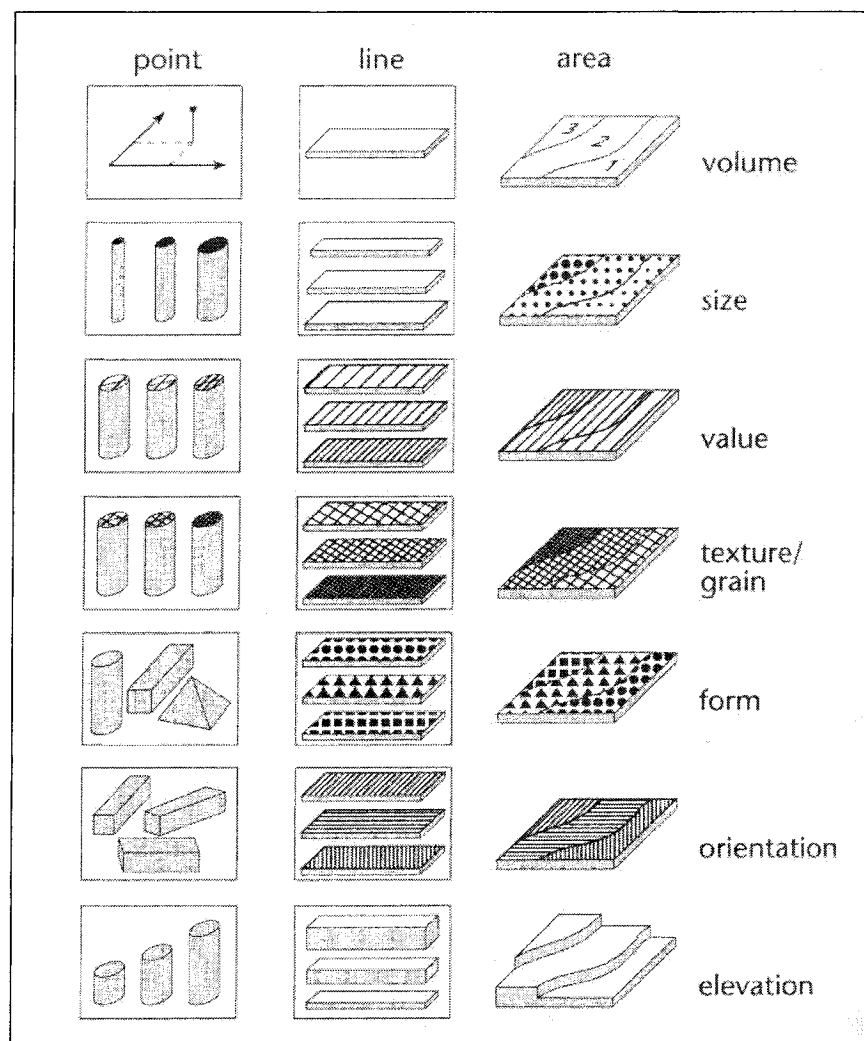


Figure 3.2 Carte tactique d'implantation de sept variables visuelles en 3D (Vasconcellos 1992)

MacEachren, DiBiase et al. (1995) ont proposé une approche en ajoutant une nouvelle catégorie de clarté (*clarity*) qui contient trois variables: la *netteté* (*crispness*), la *résolution* et, pour visualiser l'incertitude, la *transparence*. Ils ont aussi proposé le principe d'utilisation de ces nouvelles variables.

« ... the clarity variables of crispness, transparency, and resolution can be used for no more than two or three categories [the numerical, ordinal, nominal, visual isolation and visual levels]. These variables are untested, but assumed to be most useful for représentation of uncertainty. They may prove to be most practical in

an interactive setting in which an analyst is able to toggle them on and off when needed. »

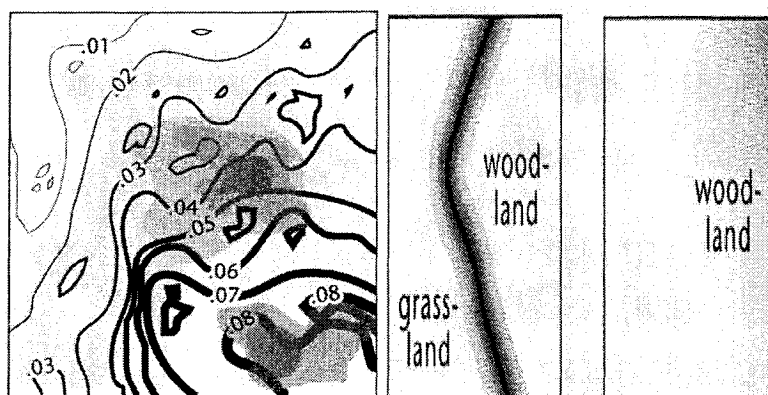


Figure 3.3 Les exemples de la transparence et de *Crispness*.

La variable *Netteté* représente la netteté de la silhouette. Elle est semblable à la fonction «*feather*» qui se trouve dans les applications graphiques. Elle sert comme une variable à ajuster le détail de la carte par le filtrage spatial de silhouette et de remplissage.

La variable *Résolution* représente le changement de la précision sur l'information spatiale. Bien évidemment, plus la résolution est précise, plus nombreuses sont les informations transmises à l'utilisateur. La méthode utilisée par MacEachren est de transformer d'abord les cartes vectorielles en cartes de pixels, et ensuite de modifier la résolution en changeant la taille des pixels.

La variable *transparence* a pour but de mesurer la variation du *nuage* ou *brouillard*. Une des utilisations proposées est de poser une couche de polygones sur la carte où la transparence des polygones est proportionnelle au niveau d'incertitude.

Une autre contribution de MacEachren sur la sémiologie est de compléter l'approche sémiologique en ajoutant les variables visuelles de la carte visuelle dynamique. Bien que ses prédécesseurs, comme Bertin, ont remarqué la potentialité d'exploiter le mouvement comme une variable, peu de travail systématique et complet était effectué avant MacEachren. Cette approche de MacEachren consiste en six variables

dynamiques : durée, date de l'exposition, ordre, ratio de changement, fréquence et synchronisation (*duration, display date, order, rate-of-change, frequency, synchronization*).

- *Date de l'exposition* : Le temps nécessaire au changement visuel. «*Display date is to chronological date as display coordinates are to geographic coordinates.*» (MacEachren 1995) Dans une carte dynamique, la date de l'exposition définit l'ordre temporel de phénomène ;
- *Durée* : la durée entre deux états identifiables ;
- *Ordre* : la séquence d'image ou scènes ;
- *Ratio de changement* : la mesure de changement par intervalle temporel entre les séquences d'images ou de scènes ;
- *Fréquence* : le nombre d'états identifiables par intervalle ;
- *Synchronisation* : La correspondance temporelle de deux ou plusieurs séries temporelles.

Basée sur l'approche de Bertin et ses successeurs, l'approche de Slocum (1999) adopte une nouvelle variable de *hauteur perspective* Cette dernière est définie par la perception de la perspective tridimensionnelle d'un objet. Dans son exemple (voir Figure 3.4), Slocum utilise une sucette pour représenter le volume de production d'un puits de pétrole

Par ailleurs, Slocum essaie d'exploiter l'utilisation des variables visuelles en 2½D et 3D. Son objectif est de considérer la représentation multidimensionnelle comme un type d'implantation qui ressemble à l'implantation ponctuelle, linéaire et zonale. Proprement dit, son approche montre plutôt l'implantation de la variable de texture sur les surfaces 3D que l'implantation des variables visuelles dans une scène 3D.

	Point	Linear	Areal	2½-D	3-D
Spacing					
Size					
Perspective height					None possible
Orientation				None recommended	
Shape				None recommended	
Arrangement				None recommended	
Lightness					

Figure 3.4 Carte d'implantation des variables visuelles (Slocum 1999)

3.2 Sémiologie 3D

3.2.1 La modélisation d'une scène 3D

Pour réaliser une représentation 3D, il faut une *scène 3D* qui sert à la définition de l'environnement à représenter et un processus de rendu 3D qui affiche la scène 3D à l'écran de l'ordinateur ou des autres équipements visuels.

Chaque scène complète de 3D construite par l'ordinateur contient trois composantes essentielles : une composition de la scène 3D, une ou plusieurs sources de lumière, une ou plusieurs caméras.

1. La *composition de la scène* décrit les objets visibles dans la scène. On peut catégoriser l'information de la composition de la scène en trois classes :
 - a. La description géométrique, qui définit la forme d'objet. Un objet peut être simple comme une boîte, une surface, ou bien complexe comme un terrain qui contient des milliers de surfaces.
 - b. La description du matériau, qui définit la couleur, la transparence, la texture etc.,
 - c. L'information spatiale, qui définit le placement d'objet par ses six degrés de liberté.
2. La *lumière*, pour sa part, est un type de composant pouvant être visible ou invisible dans la scène. On dit qu'elle est visible, lorsqu'elle peut être appréciable comme un objet matériel de la scène. On dit qu'elle est invisible, lorsque la lumière peut influencer les objets de la scène mais qu'elle est à l'extérieur de la vue. Une lumière peut porter deux types. Premièrement, il faut différencier le type de lumière selon la manière dont elle va influencer les objets dans la scène. Deuxièmement, certaines lumières comportent des informations spatiales, qui définissent la position de la lumière et pour certains types de lumière l'orientation de la lumière. Cette information spatiale est facultative parce que, pour les lumières de point, l'orientation n'a aucune influence, tandis que pour les lumières directionnelles ou omnidirectionnelles elle décide la limite d'espace dans lequel les objets peuvent être éclairé.
3. La *caméra*, qui s'appelle aussi *point de vue*, définit de quelle manière on voit la scène 3D. Généralement, l'information de la position de la caméra décide de quel point on regarde la scène, tandis que l'orientation décide la direction de la

vue. De plus, même si nos yeux capturent les image en projection perspective, c'est-à-dire que la taille perçue est inversement proportionnelle à la distance entre le point de vue et les objets, il est possible que l'image soit construite par une projection parallèle, dite orthographique ou oblique.

Le Tableau 3.1 résume les composants d'une scène 3D.

Il faut constater que, due à la limite de la technologie graphique récente des ordinateurs personnels³, la « représentation 3D » n'est pas une vraie scène tridimensionnelle qui peut être perçue comme un vrai environnement autour de nous, mais une structure virtuelle dans l'ordinateur, s'appelant « primitive », qui peut être rendu par une série d'images projetés dans un plan 2D et affiché par l'écran⁴.

Normalement, le rendu 3D consiste en quatre étapes⁵, voir Figure 3.5 :

1. Description des primitives : les primitives sont définies dans un certain repère.
2. Transformation des primitives selon le point de vue et la lumière : une transformation spatiale est appliquée aux primitives selon le point de vue et la relation spatiale entre les lumières et les primitives.
3. Projection, fenêtrage, rendu : les primitives sont projetées sur le plan image suivant la projection spécifiée (orthographique, perspective), les couleurs sont calculées selon les propriétés du matériau, de la lumière et des relations spatiales entre les lumières, les

³ Par exemples «DirectX » pour les plateformes Windows, « OpenGL » pour la plateforme Windows et Mac.

⁴ Il existe certaines technologies permettant de créer des images stéréophoniques en affichant deux images différentes à chaque œil, ce qui donne un vrai sens de 3D.

⁵ 3D graphisme : [http://en.wikipedia.org/wiki/Talk:3D_computer_graphics/Temp](http://en.wikipedia.org/wiki/Talk:3D_computer_graphics/Temp;);

Standard de OpenGL : <http://www.opengl.org/documentation/specs/version2.0/glspec20.pdf>

points de vue et les primitives. En suite, l'image obtenue est redimensionnée suivant les tailles de la fenêtre graphique.

4. Affichage d'image. L'image est affichée dans l'écran d'ordinateur.

Tableau 3.1 Décomposition d'une scène 3D

Scène	Composition de la scène	Géométrique	Forme	
		Description spatiale	Position	
			Orientation	
		Matériel	Couleur	
			Transparence	
			Grain/texture	
	Lumière	Description spatiale	Position	
			Orientation	
		Visuelle	Couleur	
			Caractéristique de lumière	Omnidirectionnelle, Directionnelle, etc.
	Caméra	Description spatiale	Position	
			Orientation	
		Visuelle	Caractéristique de projection	orthographique, perspective, etc.

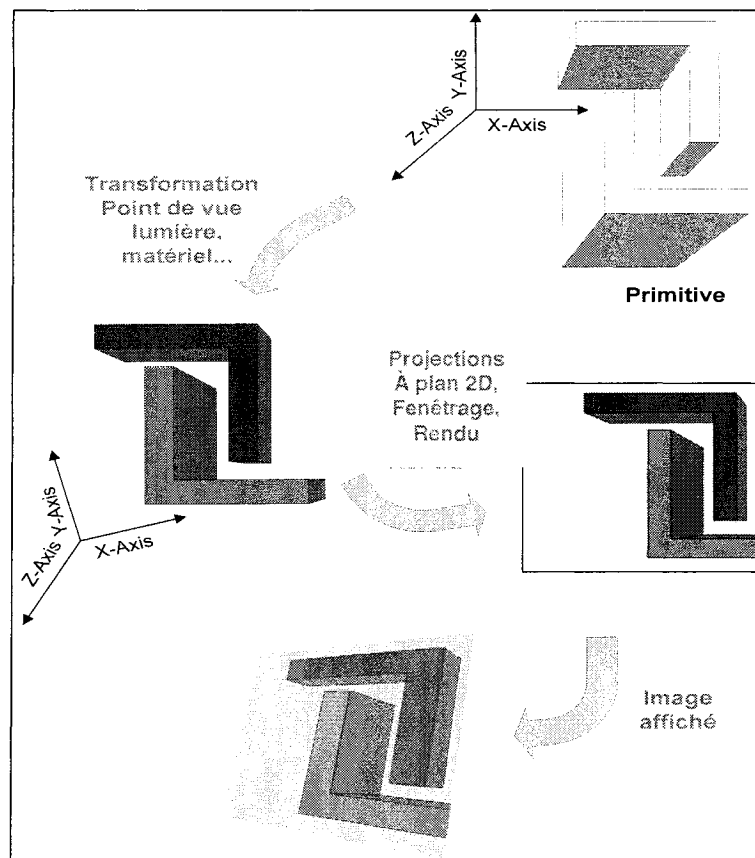


Figure 3.5 Le processus de Rendu 3D

3.2.2 La typologie de la sémiologie 3D

À la recherche d'une définition sémiologie 3D qui exploite la potentialité totale de la troisième dimension, on peut remarquer les différences suivantes entre une représentation 2D et une représentation 3D :

- Selon les décompositions de la scène 3D montrées ci-dessus, les séries de données peuvent être appliquées aux primitives, à la lumière et à la caméra, tandis que les séries de données sont appliquées aux tâches. En effet, une primitive 3D peut être un objet ayant une forme en 3D ou un graphique 2D.
- Dans une scène 3D, l'apparence purement visuelle de la couleur, de la transparence et de la graine/texteure, ne dépend pas seulement d'un élément

graphique mais c'est le résultat de l'influence combinée du point de vue, de la lumière, du type de matériau constituant l'objet ainsi que des interactions entre les objets (par exemple, la lumière réfléchie par un objet peut influencer l'objet voisin comme une source de la lumière). Il est donc difficile d'en maîtriser la perception.

3.2.3 Classification des données selon la nature de l'information

Bertin (1983) a introduit le terme *niveaux d'organisation*, où l'on a trois signifiés de données : ordinale, qualitative et quantitative.

Slocum (1999), de son côté, constate qu'au niveau de la recherche cartographique, les cartes thématiques quantitatives sont plus complexes, car elles touchent à la fois la localisation de données ordinales, d'intervalles et de ratios.

Les données ordinales sont des informations qualitatives. Et les données numériques ou quantitatives sont constituées soit de ratios, soit d'intervalles. Il n'est plus question de rang ou d'ordre entre les valeurs mais de distances exactes entre valeurs.

- Les données ordinales offrent à l'utilisateur des informations sur le rang et la hiérarchie (par exemple une carte indiquant que les lieux habités sont classés en tant que ville, village ou hameau). La possibilité de classer ce type de données nous conduit ici à les ranger parmi les variables quantitatives, par opposition aux variables nominales sur lesquelles aucune opération n'est possible.
- Les données d'intervalles (non proportionnelles) se réfèrent à un point zéro arbitraire, les données de ratio à un point zéro non arbitraire. Le fait que le zéro soit arbitraire signifie que le rapport entre deux valeurs ne peut être interprété correctement ;
- Les données de ratio (proportionnelles) sont les plus fréquentes car elles offrent des renseignements précis en ce sens qu'elles emploient une échelle de données

modifiées, habituellement décrites dans une légende. Par exemple : une cartographie du nombre de personnes montées aux stations de métro.

3.3 Les variables visuelles

Les variables applicables à un objet incluent la position, l'orientation, la taille, la forme, la texture/structure, la transparence et la couleur.

3.3.1 La position

La position est utilisée pour représenter une information quantitative. Cette variable s'applique aux phénomènes ponctuels, linéaires ou zonaux.

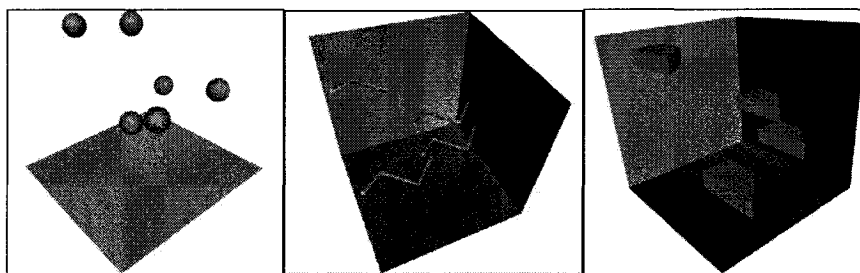


Figure 3.6 La variable de position appliquée aux objets ponctuels, linéaires et zonaux

Dans une scène 3D, l'estimation de la position absolue d'un objet est très difficile sinon impossible, et l'estimation la position relative entre les objets est beaucoup difficile que celle de 2D. Ceci est dû à deux raisons principales:

- D'abord, même dans la vie quotidienne, notre système visuel est loin d'être parfait ; il est parfois trompeur. Les travaux des arts d'illusion donnent les exemples concrets de ces fragilités. En théorie, l'être humain estime la distance de trois façons suivantes :
 - par les différences entre les deux images perçues par les deux yeux.
 - par la relation perspective : plus l'objet est loin, plus il est petit.

- par la relation spatiale entre les objets : Supposons qu'on on a déjà reconnu les objets impliqués (par exemple, par leur forme, leur couleur, etc.). Si un objet est caché partiellement en arrière d'un autre objet, on peut trouver la position relative des deux objets.

Ces trois moyens d'estimer les distances en 3D donnent toutefois des positions beaucoup moins précises qu'en 2D.

- Deuxièmement, la technologie d'affichage courante des ordinateurs personnels ne permet pas l'affichage les images de type stéréo, c'est-à-dire comportant une image différente pour chaque œil, sans utiliser les appareils spéciaux. Dans la majorité des cas, les scènes 3D sont seulement représentées par des images 2D en projection perspective pour donner la sensation de distance.

À cause de cette difficulté, certaines précautions doivent être prises pour faciliter la perception des usagers. On trouve donc que cette tâche est beaucoup facile avec l'aide:

1. des plans de référence fixés qui donnent aux spectateurs un repère de la position relative entre elle et l'objet concerné. (Voir Figure 3.7) ;
2. d'un plan de référence mobile qui peut se déplacer soit automatiquement, soit à la demande du spectateur. (Voir Figure 3.7) ;
3. des lignes qui lient l'objet avec le point de projection dans le plan de référence (Slocum 1999). Strictement dit, lorsque les longueurs de ligne varient proportionnellement à certaines valeurs, ce moyen utilise non seulement la variable de position, mais une combinaison des variables de taille et de position. Voir Figure 3.8.
4. des lumières. Avec une lumière, surtout une lumière de point, on peut éclairer une partie d'objet, qui révèle la relation spatiale relative entre l'objet et la lumière. En appliquant une même lumière sur de multiples objets, le spectateur peut établir les relations relatives entre les objets. Voir Figure 3.9.

La variable de position est utilisée dans les quatre types de nature de données et les trois types d'implantation graphique. Facile à utiliser, elle sert souvent à différencier les données quantitatives et ordinales des figures de point. Pour les données ordinales, il est facile de transposer l'ordre sur la hauteur des objets. Avec les données proportionnelles, il suffit de déplacer le plan de référence pour indiquer à quelle position correspond le niveau zéro.

3.3.2 L'orientation

Dans la représentation 2D, l'orientation s'applique à des figurés ponctuels allongés (la base doit être au plus égale au tiers de la hauteur) ainsi qu'à des figurés zonaux (trames, traits). La longueur de cette variable est limitée en général à quatre directions : verticale, horizontale et deux obliques à 45 degrés. Cette variable est donc uniquement différenciatrice et est utilisée pour représenter les modalités des caractéristiques qualitatives (Béguin et al. 2000).

Pour un objet 3D, l'orientation concerne les deux angles entre l'objet et les deux axes (vertical et horizontal), et un angle de rotation. Trois variables sont donc nécessaires pour définir l'orientation d'un objet 3D. Mais ce nombre dépend de la symétrie de l'objet. Dans le cas extrême d'une sphère, il n'y a aucun sens d'orientation. De plus, la

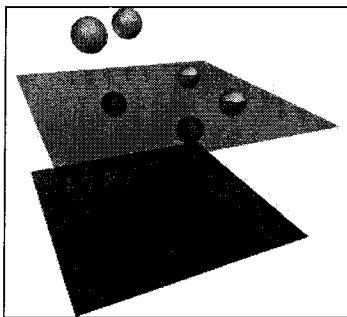


**Figure 3.7 Utilisation du plan
demi transparent**

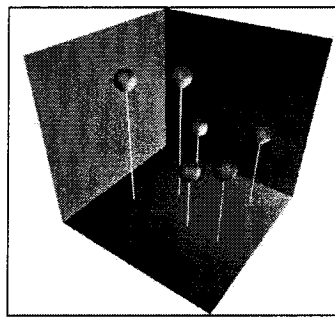


**Figure 3.8 Utilisation de ligne
de référence**

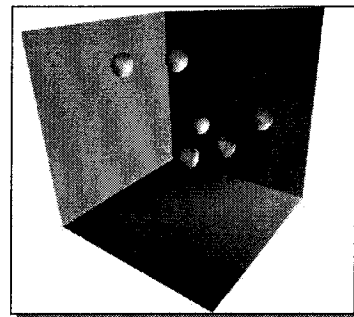


**Figure 3.9 Utilisation de la
lumière (une lumière est
placée dans le coin inférieur
couche de la scène)**

possibilité de changer le point de vue rend la perception de l'orientation plus difficile.

Malgré toutes possibilités données, l'expérience montre qu'il est difficile d'utiliser les trois variables séparément.

Théoriquement, l'orientation s'applique aux phénomènes ponctuels, linéaires et zonaux. Mais les implantations linéaire et zonale se sont révélées difficilement exploitables dans la pratique, surtout dans la géo-visualisation où les coordonnées de ligne ou de zone sont obtenues par la codification spatiale.

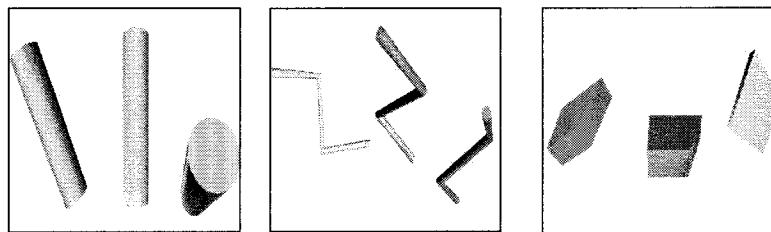


Figure 3.10 Variable d'orientation pour les phénomènes de point, de ligne et de zone

Puisqu'il est difficile de percevoir la valeur absolue de l'orientation d'un objet, il est possible de distinguer deux objets ayant des orientations différentes. Cependant, les valeurs de cette variable sont généralement limitées à 0°, 30°, 45°, 60°, 90°. Son utilisation est donc impossible pour les données quantitatives, du fait que son domaine n'est pas suffisant pour les données quantitatives.

3.3.3 La forme

Pour une représentation 2D, la forme d'un élément graphique est définie par les contours de cet élément (Béguin et al. 2000). On peut élargir cette définition

Cette caractéristique peut être perçue comme :

- une forme régulière – par exemple, les cercles, carrés, triangles, etc.,
- un contour d'une zone irrégulière fermée, par exemple, le contour d'un territoire municipal, etc.,

- un contour d'une ligne, par exemple, une rivière, une côte, etc. (Robinson 1984)

Bien qu'il soit possible d'utiliser la forme pour ces trois types d'implantation graphique, comme l'a montré Bertin et al. (1967), la forme sert principalement l'implantation ponctuelle. Dans ce cas, la forme devient «symbole» ou «icône».

Selon les fonctionnalités de symbole, on peut aussi catégoriser les symboles en trois groupes (MacEachren 1995 ; Béguin et al. 2000):

- Le symbole pictogramme, qui peut être évocateur par lui-même et qui, normalement, ressemble à une image capturée.
- Le symbole associatif, qui est une simplification d'image capturée.
- Le symbole géométrique qui prend des formes simples et ne représente aucun phénomène particulier.

Autour de cette classification, Robinson (1984) note que la distribution des symboles géométriques est purement arbitraire et nécessite des légendes, tandis que les pictogrammes peuvent être utilisés sans intervention des légendes.

On trouve seulement trois types d'implantation symbolique de base : symboles ponctuels, symboles linéaires et symboles surfaciques. Par conséquent, il faut faire preuve de beaucoup d'imagination pour concevoir des symboles de cartes qui représentent simultanément plusieurs caractéristiques des données.

La difficulté en matière de production de symbole 2D découle du fait qu'il existe une confusion visuelle entre les différents symboles ou les différentes interprétations d'un même symbole.

Par rapport aux difficultés de la production de symbole 2D, la conception de symbole 3D est encore plus difficile à cause de la caractéristique de l'environnement virtuel et du mécanisme de perception de l'être humain. Plus précisément, on peut distinguer deux difficultés : d'une part, dans une représentation 3D, il est essentiel de permettre à l'utilisateur de changer de point de vue, ce qui, par conséquence, exige que les symboles

3D puissent être perçus et puissent transmettre le message de façon constante malgré le changement de point de vue de l'utilisateur. D'autre part, bien qu'il existe des méthodes de simplification d'objet 3D, il est difficile d'effectuer une abstraction de forme à partir d'un objet 3D en conservant les messages qu'il porte.

Pour contourner toutes les difficultés présentées ci-dessus, les symboles géométriques 3D sont fréquemment utilisés (par exemple, la sphère, le cube, le cône, le cylindre, etc.). Ils procèdent des caractéristiques communes, qui consistent en un certain niveau de symétrie qui leur assure de pouvoir être clairement distingués depuis différents points de vue.

Outre la fonctionnalité symbolique, la forme peut être utilisée pour la construction d'un environnement virtuel ou réalité virtuelle. Dans ce cas, les formes des objets 3D sont des reproductions de la forme réelle, par exemple, pour représenter un modèle de terrain, un édifice.

3.3.4 La taille

La taille d'un objet est définie par sa longueur ou sa hauteur, sa surface ou son volume. Normalement, la variation de taille est utilisée pour représenter des données quantitatives.

Faire varier la longueur, la surface ou le volume du figuré, donne la possibilité d'établir des rapports de proportionnalité liés aux poids respectifs de ces différentes unités. En pratique, la taille est utilisée pour représenter les données quantitatives, par exemple dans les cartes qui utilisent le cercle, la barre et le carré (Béguin et al. 2000).

En théorie, la variable visuelle de la *taille* offre des possibilités infinies de variation, mais la capacité de mesurer la taille d'un objet est très limitée pour des personnes qui n'ont pas subi un long entraînement (Fayyad et al. 2002). Le travail de Cleveland (Cleveland 1985) montre que nos yeux sont beaucoup plus compétents quand il s'agit de détection de petits changements. Mais cette capacité peut être facilement diminuée par d'autres facteurs comme la *couleur*, *l'arrangement* etc. Deux exemples connus de

ce phénomène sont l'illusion *Müller-Lyer* et l'illusion *Ponzo* qui montrent comment deux lignes identiques pourraient être perçues différemment. Particulièrement intéressant pour les cartographes, l'illusion *Ebbinghaus* montre une des limites de la carte de cercles en indiquant que les usagers surestiment souvent la taille d'un cercle entouré par des cercles relativement plus petits, et sousestiment celle d'un cercle entouré par des cercles relativement plus grands.



Figure 3.11 Illusion Ebbinghaus

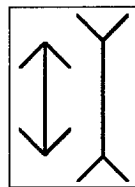


Figure 3.12 Illusion Müller-Lyer

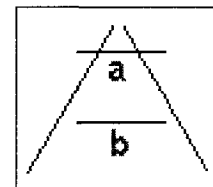


Figure 3.13 Illusion Ponzo

De la même façon, l'utilisation d'une représentation 3D nous donne non seulement la possibilité de faire varier le volume, mais aussi de changer séparément l'échelle des trois axes. Dans ce cas, la forme des objets doit être prise en considération. Puisqu'il n'existe présentement aucune théorie d'évaluation du potentiel d'utilisation de la variable de *taille* selon les caractéristiques de la forme d'objet, chaque cas doit être examiné individuellement. Par exemple, la figure suivante montre qu'il est préférable d'illustrer une série de données (1 2 3 4 5) par la variation de la hauteur des cylindres plutôt que par celles des cônes.

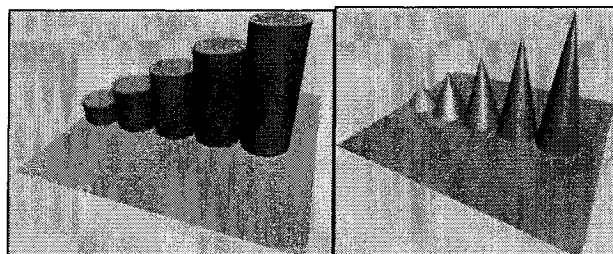


Figure 3.14 La variation de taille appliquée aux différents axes sur la forme de cylindre et cône

Une autre problématique liée à l'utilisation de la taille en 3D est qu'il est difficile d'établir la relation entre les quantités et les tailles d'objets qui les expriment.

En 2D, quand la quantité à représenter est traduite par la surface d'un figuré géométrique, par exemple un cercle ou carré, on pose la transformation selon une formule mathématique. Slocum (1999) a résumé deux types de formules de transformation, soit la transformation mathématique qui utilise simplement la formule donnant la surface d'un figuré, soit la transformation perceptuelle, qui tient compte du fait que la taille perçue ne correspond pas à sa taille mathématique, ce qui cause par conséquent une sous-estimation de la taille réelle, surtout pour les figurés de grande taille.

On peut facilement constater qu'il suffit d'extraire les racines cubiques des nombres de la série que l'on veut représenter pour obtenir le rayon de la sphère ou le côté d'un cube.

Pour la transformation perceptuelle, la formule courante est la formule connue sous le nom de fonction puissance exposant :

$$R = cS^n$$

où R est la taille perçue, c est une constante, S est la taille réelle et n est un exposant.

Flannery (1971) a suggéré les coefficients pour le S et n, tels que $R = 0.98365S^{0.8747}$ pour les figures de surface.

Ekman et Junge (1961) de leur côté, montrent que pour les cubes et les sphères, les exposants égalent 1.0, c'est-à-dire sans aucune compensation, ne sont pas nécessaires pour les objets 3D qui représentent les séries de données avec volume.

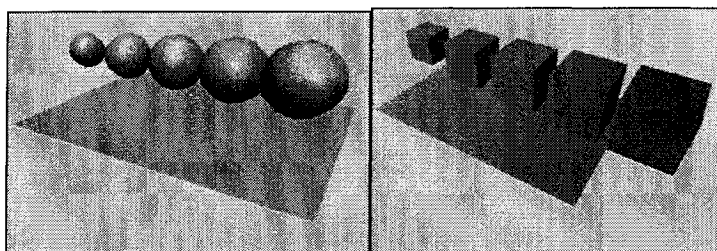


Figure 3.15 Utilisation du volume des sphères et des cubes.

Nous notons que cette valeur d'exposant de 1.0 n'est pas valable pour tous les objets 3D. Par exemple, pour la représentation multivariée, quand on associe la taille de chacun de ces trois axes à une série de données quantitatives, les trois axes ne sont pas perçus de la même façon. La Figure 3.16 représente quatre cas de représentation de séries de données (1, 2, 3, 4, 5). Dans le cas A, la variation est appliquée seulement sur l'axe Y ; dans les cas B et D, la variation est appliquée sur les axes X et Y ; dans le cas C, la variation est appliquée sur les axes X, Y et Z en même temps.

De ces expérimentations, on perçoit que la variation de hauteur du cylindre (sur l'axe Z) n'exige aucune compensation tandis que la variation de deux autres axes doit être considérée comme celle de la surface qui nécessite une compensation mathématique et visuelle.

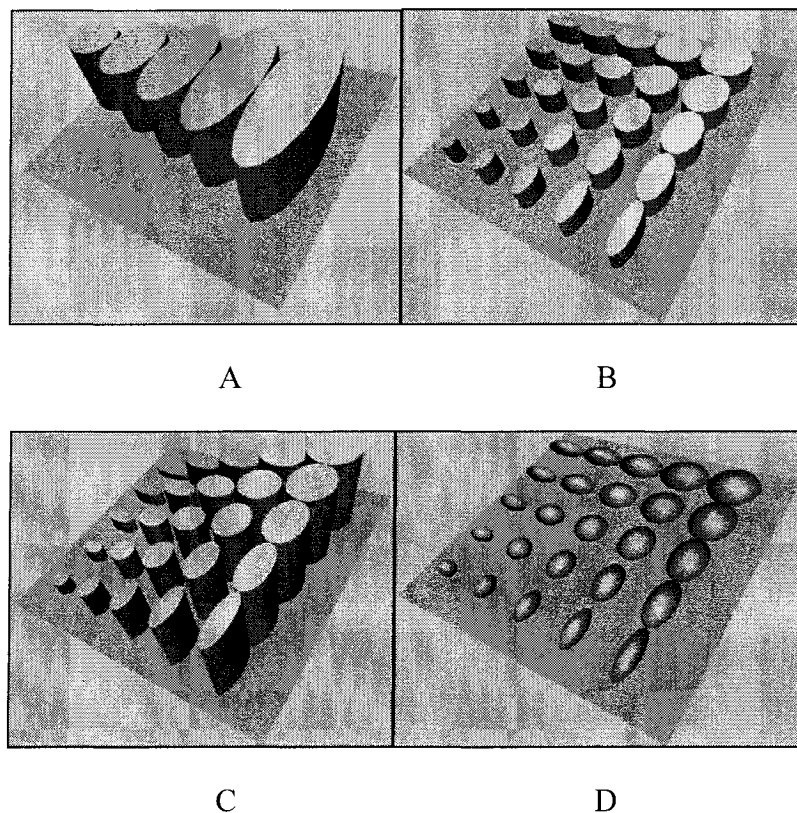


Figure 3.16 Représentation de données multidimensionnelles avec la variable de taille

La taille s'emploie dans les implantations ponctuelle et linéaire. En utilisant la taille, un des principes les plus importants est d'utiliser des figurés simples. Plus la figure est simple (barre ou bâton, cercle, carré) plus la variation de taille est facile à percevoir.

Selon Béguin et al. (2000), la taille peut être appliquée aux données ordinales, aux données organisées par intervalles et aux données calculées par ratio. Cependant, il est rare de représenter les informations nominales avec cette variable, parce que la taille donne toujours aux usagers une impression d'ordre.

3.3.5 La couleur

La couleur est une variable visuelle très puissante. Ces dernières années, le coût des matériels informatiques (moniteurs, projecteur et imprimant en couleurs) lié à la représentation colorée a beaucoup diminué. Presque toutes les représentations réalisées récemment sont en couleur.

3.3.5.1 La définition de la couleur

Béguin et al. (2000) a résumé deux qualités majeures de la couleur : premièrement, la couleur a un fort pouvoir différentiel, qui tient aux capacités qu'a l'œil humain de reconnaître une très vaste diversité de teinte, deuxièmement, la couleur a une grande valeur esthétique.

Par ailleurs, la couleur a aussi une définition physique. Chaque couleur du spectre est définie par une longueur d'onde. Les modèles *colorimétriques* permettent de décrire les couleurs que nous voyons et manipulons. Chaque modèle colorimétrique représente une méthode différente de description et de classification des couleurs. Tous les modèles colorimétriques utilisent des valeurs numériques pour décrire le spectre des couleurs visibles.

Pour les couleurs obtenues à partir d'une source lumineuse (écran d'ordinateur, télévision etc.), les trois couleurs *fondamentales* de RVB, bleu-violet, vert et rouge sont fréquemment utilisées. Les couleurs RVB appelées *couleurs additives* puisqu'elles sont

obtenues en mélangeant différentes combinaisons de lumière spectrale. Tandis qu'on peut obtenir la couleur blanche en combinant les trois couleurs *primaires CMJN*, Cyan, Magenta et Jaune par impression. Les couleurs CMJN s'appellent aussi des couleurs *soustractives*, puisqu'elles reposent sur la qualité d'absorption de la lumière de l'encre imprimée sur du papier. Lorsque la lumière blanche traverse des encres translucides, une partie du spectre est absorbée (soustraite). À part RVB et CMJN, il existe aussi les autres modèles TSL, LAB, CEI etc.

Le modèle HSL (Hue, Saturation, Luminance, ou en français TSL), s'appuyant sur les travaux du peintre Albert H. Munsell (qui créa l'Atlas de Munsell), est un modèle de représentation dit "naturel", c'est-à-dire proche de la perception physiologique de la couleur par l'œil humain. L'utilisation du modèle TSL nous permet de décomposer la couleur en trois sous variables graphiques.

- la *teinte* (en anglais *Hue*), correspondant à la perception de la couleur (T-shirt mauve ou orange),
- la *saturation*, décrivant la pureté de la couleur, c'est-à-dire son caractère vif ou terne (T-shirt neuf ou délavé),
- la *luminance*, indiquant la quantité de lumière de la couleur, c'est-à-dire son aspect clair ou sombre (T-shirt au soleil ou à l'ombre).

Voici une représentation graphique du modèle HSL (Figure 3.17), dans lequel la teinte est représentée par un cercle chromatique et la luminance et la saturation par deux axes :

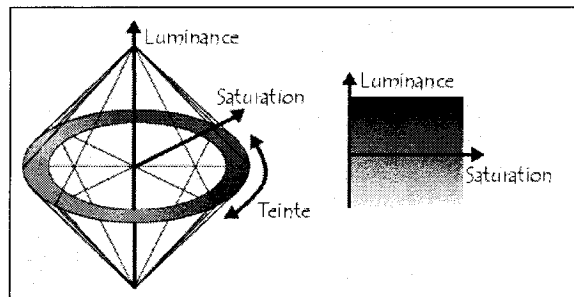


Figure 3.17 Représentation graphique du modèle HSL ⁶

L'obtention d'une couleur précise est loin d'être une tâche facile. Les spectres couverts par les différents modèles colorimétriques sont différents, et le résultat dépend du périphérique qui présente les couleurs (imprimante, écran, projecteur, scanner, presse). De plus, même si les périphériques utilisent le même modèle, chaque périphérique pourrait utiliser son propre espace colorimétrique. Ainsi, deux moniteurs de la même marque et du même modèle présentent fréquemment des différences de couleur notables. Compte tenu des limites inhérentes aux matériaux et aux techniques de fabrication, il est quasiment impossible d'obtenir deux périphériques affichant les couleurs de manière parfaitement identique.

En effet, le modèle RGB aussi adapté soit-il pour la représentation informatique de la couleur ou bien l'affichage sur les périphériques de sortie, ne permet pas de sélectionner facilement une couleur précise. Le réglage de la couleur en RGB dans les outils informatiques se fait généralement à l'aide de trois glisseurs ou bien de trois cases avec les valeurs relatives de chacune des composantes primaires, or l'éclaircissement d'une couleur demande d'augmenter proportionnellement les valeurs respectives de chacune des composantes. Ainsi le modèle HSL a-t-il été mis au point afin de pallier cette lacune du modèle RGB.

⁶ Source : <http://www.commentcamarche.net/video/couleur.php3> Dernière accès: 2005-5-10.

3.3.5.2 L'utilisation des couleurs - les schémas de couleurs et l'affichage dynamique

Pour faciliter l'utilisation de couleurs dans la cartographie, Brewer (1999) élabore des directives sur l'utilisation des couleurs selon la relation entre la fonction de la couleurs dans une carte et la nature des données. Dans son article, elle présente 3 types de schéma de couleurs (voir Figure 3.18)

- Schéma séquentiel pour les données ordonnées ;
- Schéma qualitatif et binaire pour les données quantitatives ou binaires ;
- Schéma de divergence pour faciliter la détection de différences dans la carte.

Elle suggère aussi que les schémas de couleurs de spectre, reconnu sous le nom d'*arc-en-ciel* et très populaires comme schéma séquentiel, est en fait un schéma de divergence.

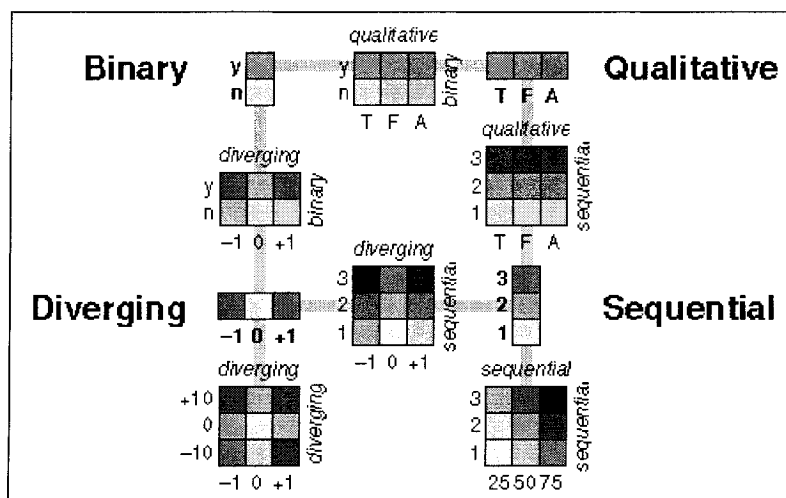


Figure 3.18 Les types de schéma de couleur et combinaison (Brewer 1999).

Les figures suivantes (Figure 3.19, Figure 3.20 et Figure 3.21) illustrent les implantations de trois types de schéma sur les données de recensement.

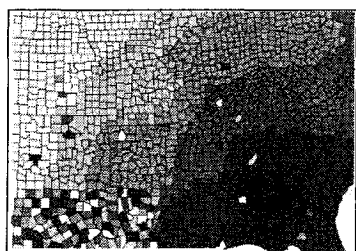


Figure 3.19 Schéma séquentiel⁷

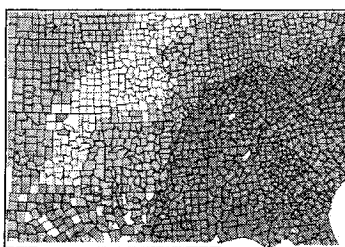


Figure 3.20 Schéma quantitatif



Figure 3.21 Schéma de divergence

Une autre approche proposée par le projet CommonGIS⁸ montre l'utilisation de brosse interactive qui permet l'affichage des couleurs des figures dynamiques. Tel qu'illustré dans la figure suivante, ce type de représentation est effectivement un type de schéma de divergence dynamique. Mais elle permet aux usagers de modifier le schéma selon leur besoin, notamment la valeur qui correspond à la couleur moyenne, ce qui donne à ce type de représentation un avantage par rapport au schéma de couleur statique.

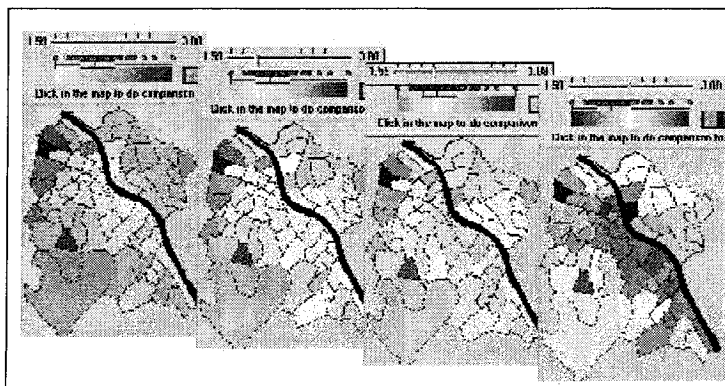


Figure 3.22 Exemple d'utilisation des schémas de couleur dynamique, par l'application CommonGIS .

⁷ <http://www.personal.psu.edu/faculty/c/a/cab38/ColorBrewerBeta2.html> Dernier accès : 2005-07-15

⁸ L'adresse du site web de CommonGIS se trouve sur

http://www.ais.fraunhofer.de/SPADE/demonstrators/index_eng.html Dernier accès : 2005-07-15

3.3.5.3 L'utilisation des couleurs en 3D

Pour les représentations 3D, le choix des couleurs s'effectue en tenant compte non seulement des contraintes présentées dans la section précédente, mais aussi des influences des autres composantes de la scène 3D (par exemple la lumière) et des autres variables visuelles (par exemple la transparence).

La lumière manifeste son influence sur les couleurs à travers deux aspects. D'une part, la lumière ne s'applique pas sur l'objet de manière uniforme, l'intensité qui finalement décide des couleurs perçues dépend de la position relative (la distance, l'angle) entre les objets, l'observateur et la source de la lumière ainsi que du type de la lumière (la lumière de point, directionnel, etc.). D'autre part, la lumière elle-même peut porter des couleurs, il est donc difficile de prévoir l'effet final.

L'effet de transparence, par contre, est plus prévisible par rapport à la lumière. Certains niveaux de transparence affectés à un objet nous permettent de voir les objets en arrière de lui, ce qui va influencer les deux objets impliqués.

En faisant des expérimentations dans les scènes 3D combinant les lumières et la transparence, nous relèverons quelques principes simples :

- Dans les situations où les couleurs représentent une série de données quantitatives, la lumière directionnelle est préférable ;
- Quand la variation des couleurs représente une série de données quantitatives, elle donne la priorité à la lumière directionnelle, parce que par rapport aux autres types de lumière (omnidirective, spot), la lumière directionnelle minimise l'effet de non-uniformité des objets, c'est-à-dire que les objets qui sont éloignés de la lumière sont aussi éclairés que ceux qui en sont proche.

Par contre, la lumière directionnelle n'est pas toujours une réponse judicieuse surtout quand l'angle entre la direction d'observation et la direction de la lumière vaut environ 45 degrés. Si c'est le cas, la réflexion de la lumière par la surface risque d'être trop forte

et l'intensité de la couleur apportée par la réflexion dépasse l'intensité de la couleur originale de l'objet, ce qui amène par conséquent un effet de brillance.

3.3.6 La *texture-structure*

La variable *texture-structure*, qui porte aussi les noms de grain, trame, motif, est une combinaison graphique qui repose essentiellement sur le choix d'une forme, que l'on répète de façon à couvrir une surface. Cette variable est fréquemment utilisée pour différencier les modalités de caractères qualitatifs. Dans une cartographie en noir et blanc, c'est la seule variable visuelle qui permet de transcrire une information qualitative en implantation zonale (Béguin et al. 2000).

On applique la *texture-structure* sur l'objet 3D pour deux fonctions principales :

- Augmenter le réalisme de la scène dans une scène de l'environnement virtuel ;
- Aider à la lecture géographique du territoire. Les cartes topographiques ou les photographies aériennes sont des sources d'informations riches à la construction d'un arrière-plan d'image pour la représentation thématique 2D. En 3D, bien que la modélisation de la scène 3D travaille de façon privilégiée en mode vectorielle, il est facile d'utiliser une photo du territoire comme fond. Par exemple, c'est une technique courante d'application d'une image comme texture d'une surface.

Les autres utilisations de *texture-structure* sont limitées, vu que l'application de textures sur les objets 3D va considérablement augmenter la complexité de la scène. En plus, la perception des textures varie avec le changement de point de vue (l'angle de perception).

3.3.7 La transparence

Il y a deux façons d'utiliser la transparence dans une scène 3D : soit en liant proportionnellement la variation de transparence avec des valeurs d'une série de

données, soit en l'utilisant comme un élément purement visuel qui aidera à la l'exploitation de scène 3D.

- Pour le premier cas, MacEachren (1995) a proposé d'utiliser la transparence pour représenter l'incertitude des phénomènes géographique. Évidemment, il existe d'autres types de données qui conviennent pour cette application. En effet, on peut la considérer comme une sous-variable de la couleur, sa fonction ressemblant beaucoup à l'intensité ou à la saturation de la couleur.
- Deuxièmement, la transparence peut être employée dans une scène 3D afin d'enrichir l'information portée sur une représentation. Combinée avec le concept de la couche d'information, la manipulation de la transparence nous donne la possibilité de visualiser plusieurs couches d'information en même temps. Par exemple, de combiner un modèle de terrain virtuel ou topologique avec une couche d'information thématique dans une seule scène en mettant le premier en demi-transparence.

3.3.8 Le choix des variables en fonction de la nature des informations

Nous présentons dans le tableau suivant le choix de variables visuelles dans l'environnement 3D en fonction de la nature des informations selon les expérimentations réalisés à l'aide de langage VRML. Évidemment, notre expérience est subjective et limitée par notre point de vue esthétique, la perception et les données choisies pour créer les représentations. (T - Très bien, B – Bien, A – Acceptable, N – Non acceptable)

Tableau 3.2 Table de guide de choix de variables selon la nature de données

Variables visuelles Nature		Position	Orientation	Couleur	Transparence	Forme	Taille
Qualitative	Nominal	A	A	T	N	T	N
	Ordinal	T	A	T	T	A	B
Quantitative	Intervalle	B	N	A	T	N	T

	Ratio	B	N	A	A	N	A
--	-------	---	---	---	---	---	---

(T - Très bien, B – Bien, A –Acceptable, N – Non acceptable)

3.4 Les présentations thématiques 3D

Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** résume la compatibilité entre les données et les variables visuelles, mais pour concevoir une représentation, il est maintenant question de choisir un type de représentation dans laquelle on implante les variables visuelles. Ce processus consiste à choisir, compte tenu des caractères des informations, du volume des données, du média de publication et de l'échelle de la carte, la manière de transposer les informations en éléments cartographiques.

Les cartes thématiques sont des cartes qui représentent des phénomènes localisables de différentes natures. Elles sont à la base de la représentation spatiale ou encore spatio-temporelle. Nous consacrons les sections suivantes de ce chapitre aux représentations thématiques 3D.

3.4.1 Représentation des informations qualitatives

Dans les cartes thématiques 2D, les données qualitatives sont souvent visualisées par les différents symboles (les données ponctuelles), les différents styles de trait ou styles de ligne (les données linéaires) et les textures (les données zonales). Ces cartes sont aussi connues sous le nom de carte d'inventaire. Les premières fonctions de ce type de carte sont de montrer les localisations des phénomènes et, par ailleurs, d'illustrer la distribution spatiale de chaque phénomène. De ce fait, l'utilisation de l'environnement 3D n'a aucun avantage visuel pour une seule série de données nominales excepté le fait que ses localisations sont enregistrées en 3D, par exemple, dans une carte topographique 3D.

Cependant, tel qu'on la retrouve dans les exemples des sections suivantes, la visualisation multivariée qui combine les variables qualitatives et quantitatives mérite bien l'effort de construire une scène 3D. On peut naturellement déployer les variables

visuelles de forme, couleur et orientation pour distinguer la modalité du phénomène défini dans une série qualitative et utiliser les autres variables visuelles afin de montrer leur caractère quantitatif.

3.4.2 Représentation d'une seule variable quantitative et ordonnée

La visualisation d'une seule variable est plutôt une représentation 2½D qu'une vraie représentation 3D. Les techniques populaires de la thématique qui traitent largement les données statistiques incluent les cartes 2D suivantes :

- celles de symbole proportionnel (Figure 5.15), qui fait varier la taille du symbole en proportion de la valeur ;
- celle de contour (Figure 6.15), qui est une carte dont les lignes représentent l'écart des valeurs ;
- celle de choroplèthe (Figure 3.19, Figure 3.20 et Figure 3.21), qui consiste en une représentation de quantités relatives à des espaces, ou aires géographiques, par le biais d'une échelle de tons ou texture gradués ;
- Le nuage de points (Figure 6.9).

En 3D, naturellement, le premier réflexe au sujet de la visualisation tridimensionnelle est de déplacer les symboles vers la troisième dimension, qui exploite la variable de la position. Telle que mentionnée précédemment, la variation de la position elle-même est difficilement perçue statiquement et les deux techniques proposées sont l'accompagnement d'un plan de référence ou l'utilisation de la variable de taille (voir Figure 3.23, et Figure 3.24).

Les figures suivantes, illustrent les possessions d'automobile en 1987 sur les 65 secteurs de la grande région Montréalaise. Ces données sont le résultat des traitements d'agrégation des données d'enquête Origine-Destination de Montréal.

Correspondant à la carte de symbole proportionnel 2D, la carte de symbole proportionnel 3D fait varier la taille ou le volume des symboles (voir Figure 3.25).

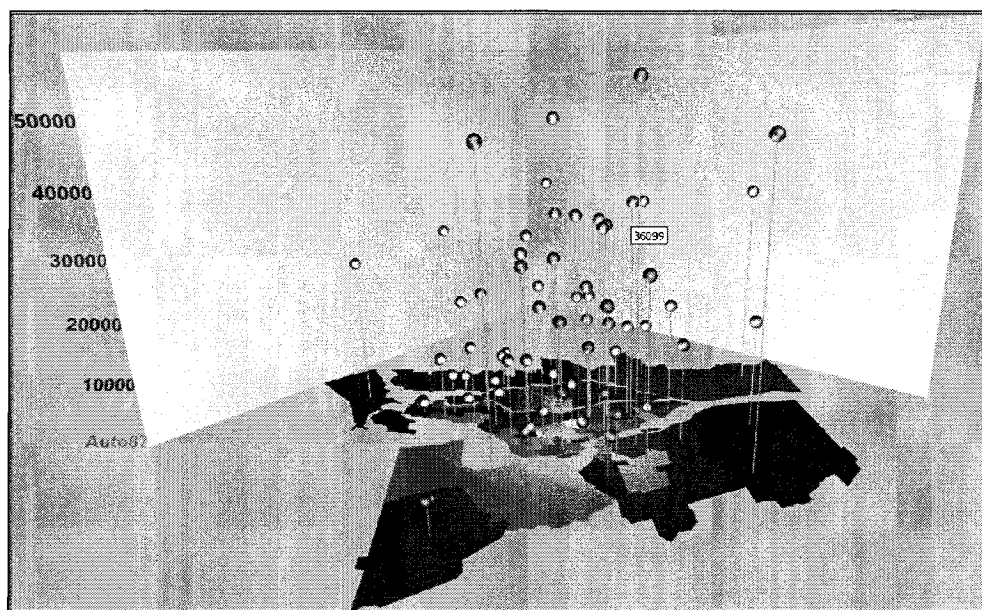


Figure 3.23 Les possessions d'automobiles en 1987 - 1.

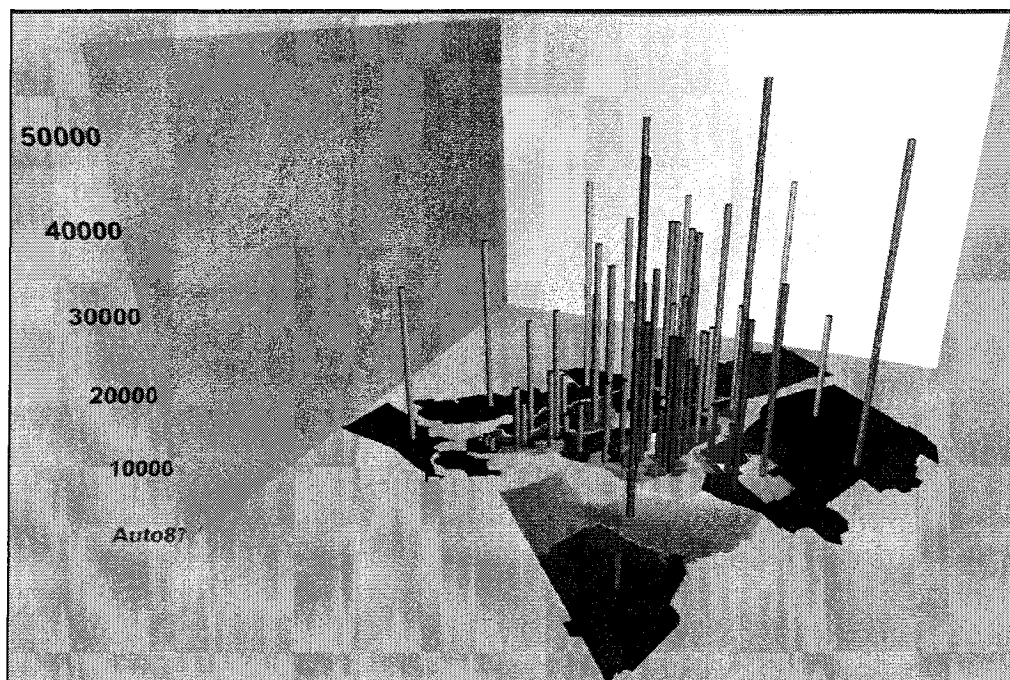


Figure 3.24 Les possessions d'automobiles en 1987 - 2.

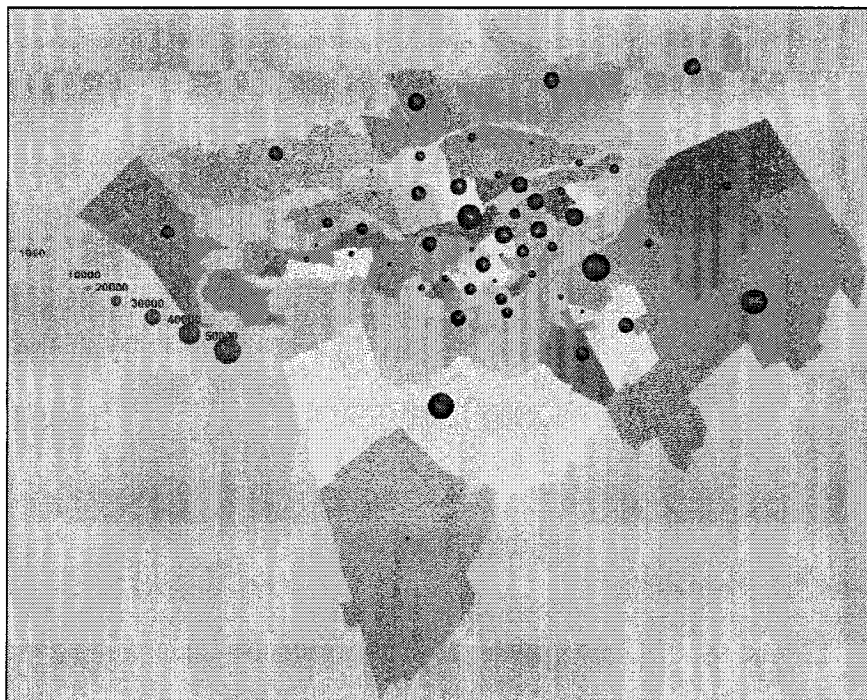


Figure 3.25 Les possessions d'automobiles en 1987 - 3.

Un des types de représentation 3D les plus utilisés par les cartographes est le type « *Stepped surface* » (voir Figure 3.26). Ce type de présentation est construit par l'extrusion des polygones 2D de telle manière que la hauteur d'extrusion corresponde à la valeur à présenter. Bien évidemment, ce type de visualisation n'est pas très efficace quand il est utilisé pour les représentations de phénomènes relativement fins, lorsqu'il est possible que la ligne de visée soit bloquée par les autres polygones. De plus, étant donné que la valeur est transposée à la hauteur, ce qui donne une perception du changement de volume, les polygones de grande surface peuvent par conséquent être surestimés par les usagers.

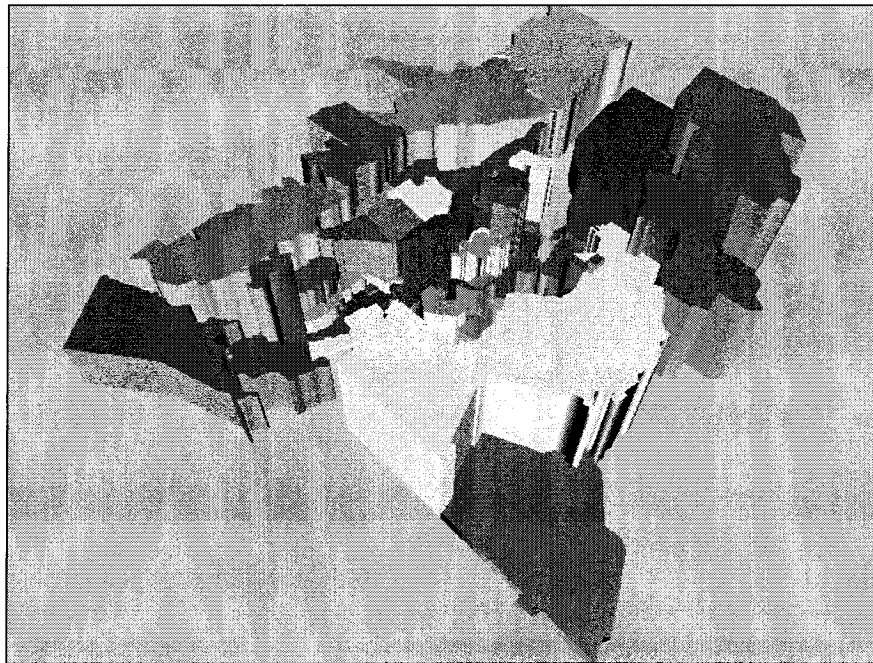


Figure 3.26 Possession d'automobiles en 1987 en « *Stepped surface* ».

Dans la pratique cartographique, les cartes choroplèthes colorées sont fortement utilisées. Elles représentent en effet le type de carte thématique le plus populaire à l'heure actuelle. Mais il est rare d'employer seulement la variable de couleur pour une présentation 3D. En général, la couleur est utilisée en accompagnement des autres variables visuelles. Dans ce cas, il s'agit d'une utilisation redondante de variables visuelles ou d'une utilisation de couleur pour distinguer les multiples séries de données.

3.4.3 Représentation multivariée

La présentation multivariée a pour but de visualiser plusieurs séries de données à la fois. Du point de vue scientifique, l'analyse des variables multiples liant l'une à l'autre par la nature des variables permet d'extraire des connaissances menant à une compréhension accrue du phénomène observé et d'exploiter les relations ou modèles potentiellement associées aux variables.

Globalement, on peut résumer deux approches courantes à propos de la visualisation multivariée:

- la représentation avec les icônes multivariées, qui exploite principalement la construction d'un symbole multiple pour représenter des variables multiples et l'implantation des variables à visualiser à chaque partie du symbole ;
- la représentation utilisant les multiples variables visuelles selon les définitions sémiologiques, c'est-à-dire par application de changements visuels à des symboles de manière globale en conservant la forme de symbole (par exemple, l'implantation d'une variable à la couleur du symbole, une autre à la taille du symbole).

3.4.3.1 Avec les icônes multivariées - *Glyphes*

La représentation basée sur la première approche est aussi connue sur le nom de *Glyphes* dans le domaine de la visualisation informationnelle. Il importe en réalité de choisir la forme selon deux critères. D'abord la forme doit pouvoir être décrite par les multiples valeurs quantitatives. Ensuite, les changements entre ces figures construits avec différentes valeurs doivent pouvoir être facilement perçus par les usagers.

Puisque le nombre de formes possibles est infini, le choix de forme est limité seulement par l'imagination et la créativité de l'être humain. On peut distinguer trois sources de formes adaptées à la visualisation thématique multivariée, soit les diagrammes, les symboles et les objets 3D.

3.4.3.1.1 *Glyphes avec les diagrammes*

La première source est l'utilisation des diagrammes, y compris ceux de barres, le graphique de secteurs (*pie*), le graphique de radar, etc.

La construction de ce type de représentation consiste dans les faits à placer les diagrammes aux places définies par les caractéristiques géoréférencées. Cette fonctionnalité est parfois supportée par les logiciels SIG (ArcGIS, CommonGIS, etc).

D'ailleurs, sous le nom de glyphes des étoiles (*star glyphs*) ou graphique des étoiles (*star plot*), nous trouvons aussi ce type de visualisation dans la représentation statistique

et le domaine de la visualisation informationnelle (XmdvTool⁹). Tel qu'illustré dans la figure suivante, le logiciel R¹⁰ est capable de produire deux types de glyphs, qui utilisent respectivement la forme d'étoile et le polygone. La forme étoile est beaucoup utilisée grâce à la simplicité et à la facilité de son interprétation par l'utilisateur.

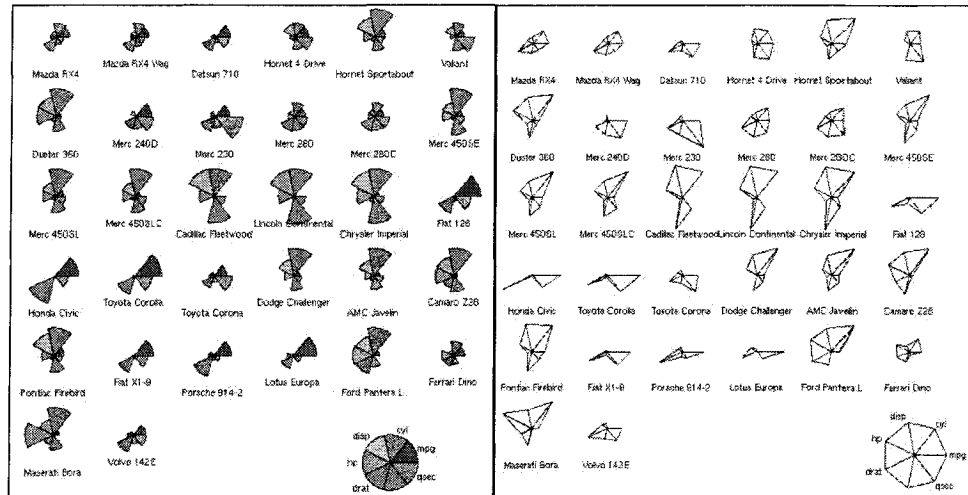


Figure 3.27 Les glyphs réalisés par le programme de R.

3.4.3.1.2 Glyphes avec les symboles

La deuxième source de formes adaptées à la visualisation thématique multivariée est l'utilisation des formes abstraites d'un objet réel, par exemple, la face, la personne, etc.

⁹ Xmdv est un logiciel de la visualisation informationnelle. L'adresse d'Internet : <http://davis.wpi.edu/~xmdv/> Dernier accès: 2005-10-05

¹⁰ R est un logiciel qui consiste en un ensemble de modules statistiques. Ce logiciel permet d'effectuer l'analyse statistique et l'affichage des résultats dans un environnement intégré de son propre langage R. L'adresse d'Internet: www.r-project.org/ Dernier accès: 2005-10-05.

La représentation la plus spectaculaire dans cette catégorie est le glyphe de Chernoff (Chernoff 1971) qui associe les valeurs à des caractéristiques d'une face d'humain (par exemple, angle et taille des yeux, longueur du visage, largeurs du nez, etc). Lorsque la face comporte des informations sentimentales, un des avantages d'utiliser la carte de Chernoff est qu'elle rend possible de convoyer les perspectives de son créateur. De plus, par rapport aux autres techniques, la face du Chernoff est capable de visualiser un grand nombre de variables à la fois, l'exemple de Chapleau (2003) illustre l'utilisation de la carte de Chernoff pour visualiser une vingtaine de variables de transport.

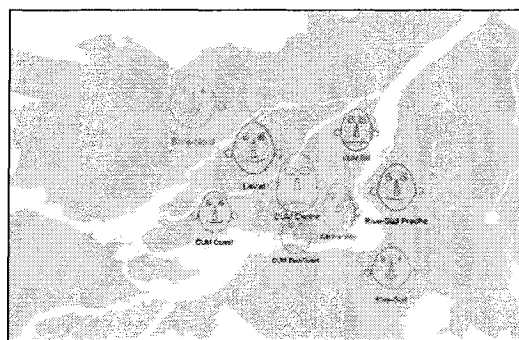


Figure 3.28 Les faces de Chernoff.
(Chapleau 2003)

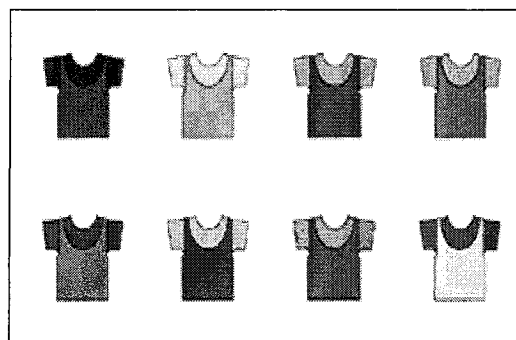


Figure 3.29 Les figures colorées de Tufte.¹¹

Un autre excellent exemple donné par le Tufte (1990) montre comment construire une figure coloré en faisant varier les couleurs des parties d'un symbole. (Voir Figure 3.29)

3.4.3.1.3 Glyphes en 3D

La troisième source de formes adaptées à la visualisation thématique multivariée est l'utilisation des icônes spécifiquement conçues pour les multiples variables où, à la longueur et à la rotation de chaque partie d'icône, est associée une variable.

¹¹ Source : <http://www.edwardtufte.com/tufte/>, Dernier accès : 2005-07-10.

A propos de l'utilisation de symboles pour la visualisation de données en n-dimensions, en réalité, les critiques qu'on entend le plus souvent concernent la manière d'implanter les données, mais non la représentation elle-même (Maceachren 1995). Cette dernière implique souvent plusieurs séries de données en même temps. En général, ces différentes variables sont représentées par une seule variable visuelle. Par exemple, dans la Figure 3.30, on utilise la variable de taille pour toutes les séries de données. Par conséquent, l'utilisation de ce type de représentation exige la similarité non seulement du type de données (relative/ absolu, proportionnelle/non proportionnelle, etc.) mais aussi des valeurs des données (cette contrainte n'est plus validée si, dans la représentation, les séries de données sont associées aux différentes variables visuelles). À partir de ce raisonnement pratique, beaucoup de cartographes choisissent d'exprimer les valeurs en pourcentage avant d'être appliquées dans ce type de visualisation. Par exemple le *Vineta virtual reality world* (KROHN 1995) utilise la forme de multi surface pour représenter les multiples variables dans un monde en réalité virtuelle.

Dans cette perspective, nous avons réalisé la Figure 3.30 qui montre l'utilisation d'un symbole 3D consistant en quatre cônes et un cylindre, ce qui permet de visualiser cinq variables à la fois.

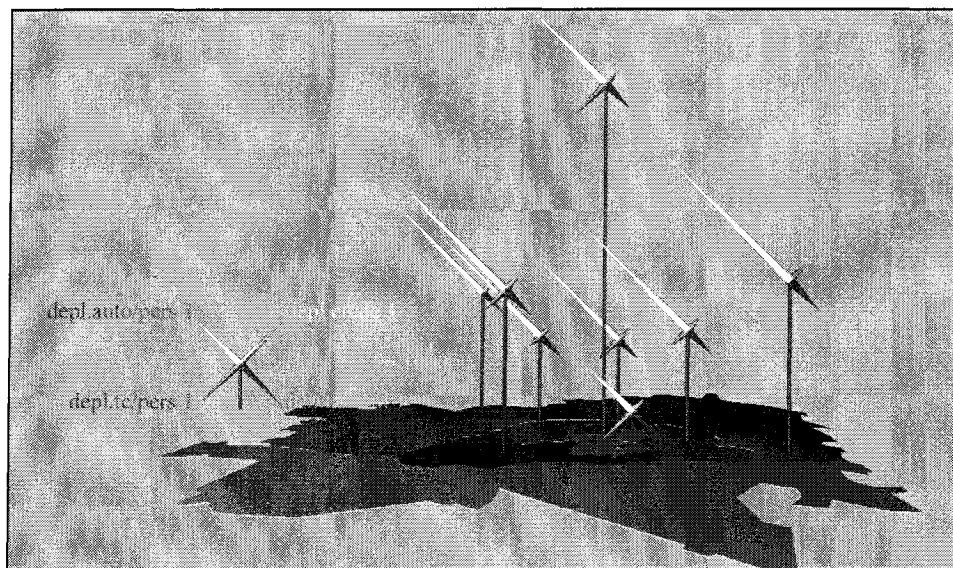


Figure 3.30 Visualisation multivariée à l'aide de symbole multidimensionnel.

Tel que montré dans la Figure 3.30, on peut utiliser la variable de taille pour certaines séries de données, celle de position pour une autre. De cette manière, on visualise cinq variables parmi lesquelles on retrouve quatre indicateurs de transport et une variable du type globale qui représente le nombre de ménage de la région. Les quatre indicateurs pour les huit grandes régions d'analyse extraits de l'enquête Origine-Destination montréalaise 1998 sont le nombre de déplacements effectués dans une journée moyenne de semaine : (1) par l'automobile personnelle (qui utilise son véhicule particulier) ; (2) par le transport en commun ; (3) pour le motif de travail ; (4) pour le motif d'étude. .

3.4.3.2 La représentation avec multiples variables visuelles

L'approche globale, par rapport à l'approche précédente, limite le nombre de séries de données pouvant être visualisées à la fois. En effet, on ne compte seulement que quelques variables visuelles disponibles et, si trop de variables sont représentées, il est possible qu'une variable altère la performance d'une autre. Néanmoins, ce type de visualisation a son avantage dans le cas où les données sont de différentes natures.

Pour tester ces limites, nous avons expérimenté la représentation 3D illustrée dans la Figure 3.31 qui combine trois variables visuelles : la taille, la couleur et la position. Ces variables sont associées respectivement à la taille du ménage, au nombre de personnes qui utilisent transport en commun et au nombre d'automobiles selon l'enquête OD de 1987.

Or, l'observation du résultat nous a montré que cette méthode illustre relativement bien la dispersion de données et la tendance de certains schémas ressortant des données. Cependant, effectuer une analyse quantitative reste un problème chronique de la représentation 3D.

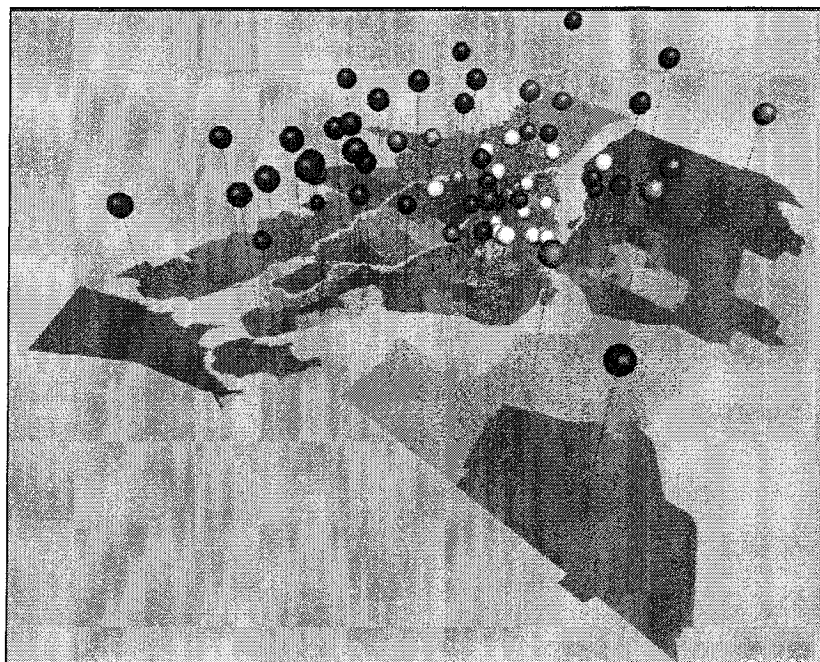


Figure 3.31 Visualisation multivariée par la taille et la couleur.

3.5 Représentation des données spatio-temporelles

Depuis longtemps, les chercheurs sont conscients du caractère particulier de la variable de temps. Le but de la visualisation temporelle est de découvrir le comportement temporel d'un phénomène, de retrouver le patron des données (c'est-à-dire la configuration spatiale des données) et de comparer les comportements des séries de données.

Selon Bertin (1983), la visualisation de données temporelles manifestait sa présence dans l'école monastique depuis les 10^e – 11^e siècles. En ce temps-là, elle était utilisée afin de démontrer les changements d'orbite planétaire. Après, elle fut redécouverte par Lambert, Müller et al. (Lambert 1779; Müller et al. 2003) qui appliqua le graphe linéaire pour représenter la variation périodique de la température du sol en fonction de la profondeur.

Présentement, on peut distinguer trois types de techniques de la visualisation des données temporelles : la représentation statique, la représentation dynamique et la

visualisation conduite par événement. Puisque cette dernière ne prend pas place dans notre discussion, nous nous concentrons sur les deux premières.

Un des bons exemples de la visualisation des données spatiales temporelles serait la carte visualisant la campagne de Napoléon contre la Russie réalisée par Minard (1869). Elle illustre à la fois trois variables liées à la troupe (le nombre de soldats dans la troupe, le nombre cumulé de soldats perdus et la température) et la trajectoire de celle-ci.

Aujourd'hui, dans le domaine de la Visualisation informationnelle, on observe l'usage extensif de la variation de la taille ou la forme de symboles pour les données quantitatives et l'emplacement de symboles pour l'information temporelle. Avec cette technique, connue sous le nom de *Sequence graph/Time Series Graph*, les diverses formes des symboles (les barres, la ligne, polygone, etc. voir Figure 3.33) sont disposées selon la nature du phénomène (ponctuelle, linéaire, zonale).

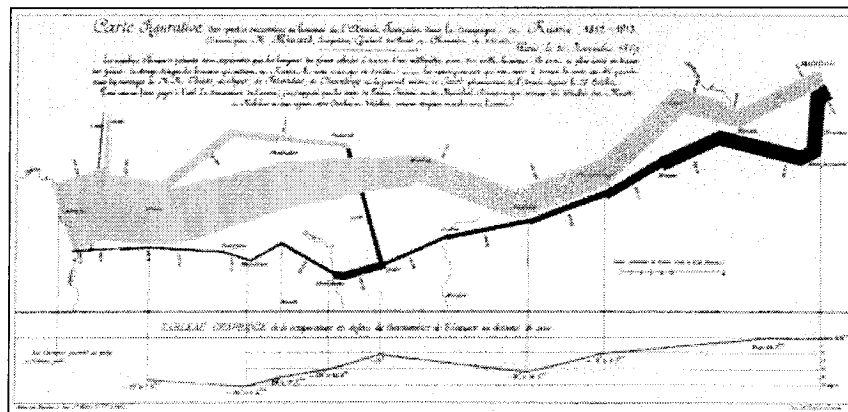


Figure 3.32 L'exemple de la visualisation de données spatiales temporelles de Minard (1869)

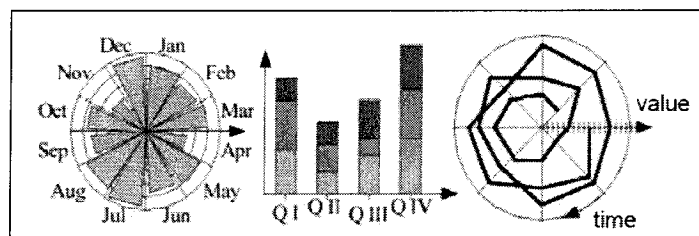


Figure 3.33 Visualisation de données temporelles. Gauche: Sector Graph. Centre: Stacked Bar Chart. Droit: Circle Graph (Müller et al. 2003)

Dans la Figure 3.33, une série de données est placée de manière circulaire. L'avantage de ce type d'emplacement est la facilité de réalisation et l'efficacité de la comparaison périodique (semaine, saison, année). Mais, puisque le cercle est une forme fermée, par conséquent, l'augmentation de la durée de temps à réaliser va causer soit la diminution d'espace alloué à chaque symbole d'observation soit le bris de la continuité de temps, c'est-à-dire, le découpage de la durée en période et après l'attribution d'un rayon pour chacune de ces périodes.

La configuration en spirale est considérée comme une forme provenant de la configuration circulaire. Tel qu'illustré dans la Figure 3.35, l'avantage d'une courbe spirale est qu'elle garde les caractères du cercle qu'on a mentionnés tantôt et qu'elle garantit la continuité de la ligne temporelle en même temps.

En plus de la configuration circulaire que nous avons vue dans la figure ci-dessus (Figure 3.33), la configuration linéaire est aussi largement utilisée.

La configuration linéaire 2D est originellement utilisée pour représenter les données biographiques. Dans ce type de configuration, le temps est simplement transposé sur un axe de l'espace. De ce fait, l'espace-temps qui applique le temps parcouru et la distance aux axes X et Y est déjà devenu une représentation standard puisqu'elle est introduite par les ingénieurs français au XIXe siècle. La Figure 3.37 démontre un autre excellent travail effectué par Havre et al. (2002), qui voit chaque thème de données comme le courant d'une rivière qui coule en suivant le temps. De cette manière, la largeur des courants représente l'influence relative du thème parmi tous les courants, la largeur de rivière représente l'influence globale de tous les thèmes, les courants qui ont les couleurs similaires sont des thèmes de même famille. Le point fort de *ThemeRiver* est qu'elle exploite intuitivement les changements de valeurs avec la variable de temps et qu'elle est capable de montrer à la fois les variations globales et individuelles. Le point faible, consiste en la contrainte d'uniformité des séries de données et à l'incapacité de révéler la variation périodique d'un phénomène.

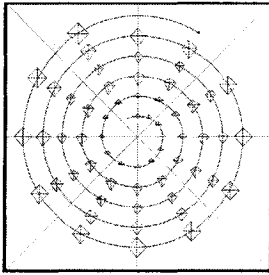


Figure 3.34 Visualisation multi variable par spiral graphe- 1 (star glyph) (Lipchak et Ward 1998)

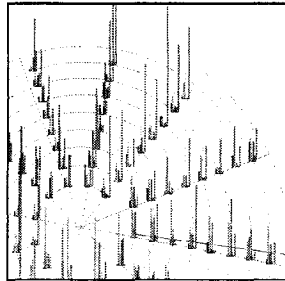


Figure 3.35 Visualisation multi variable par spiral graphe- 2 (barre) (Lipchak et Ward 1998)

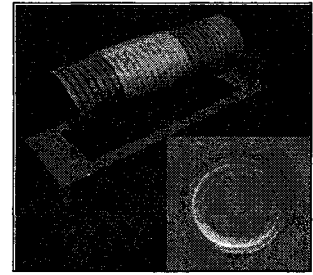


Figure 3.36 3D spiral graph en visualisant les données en grand volume. (Weber et al. 2001)

Dans la présentation 3D spatiale temporelle, il est aussi logique que dans la présentation 2D, d'attribuer le temps à l'axe Z, vu que les dimensions X et Y sont déjà attribuées aux coordonnées spatiales.

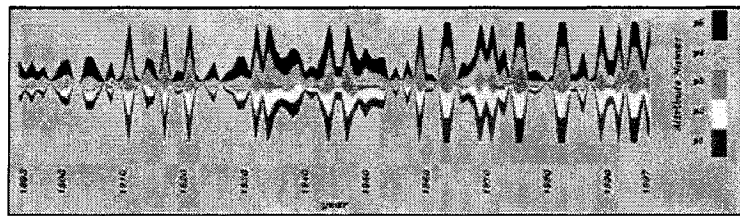


Figure 3.37 ThemeRiver, visualisation de changement climatique depuis 100 ans

Dans un premier temps, dans le cas où les données sont collectées de manière discrète, il convient de simplement associer les coordonnées Z des objets 3D au temps où les observations sont effectuées. La Figure 3.38 montre un exemple réalisé de cette manière, dans lequel sont représentées les observations sur le nombre de déplacements en 24 heures (tous les motifs sauf retour à domicile) obtenue lors de trois enquêtes OD réalisées en 1987, 1993 et 1998.

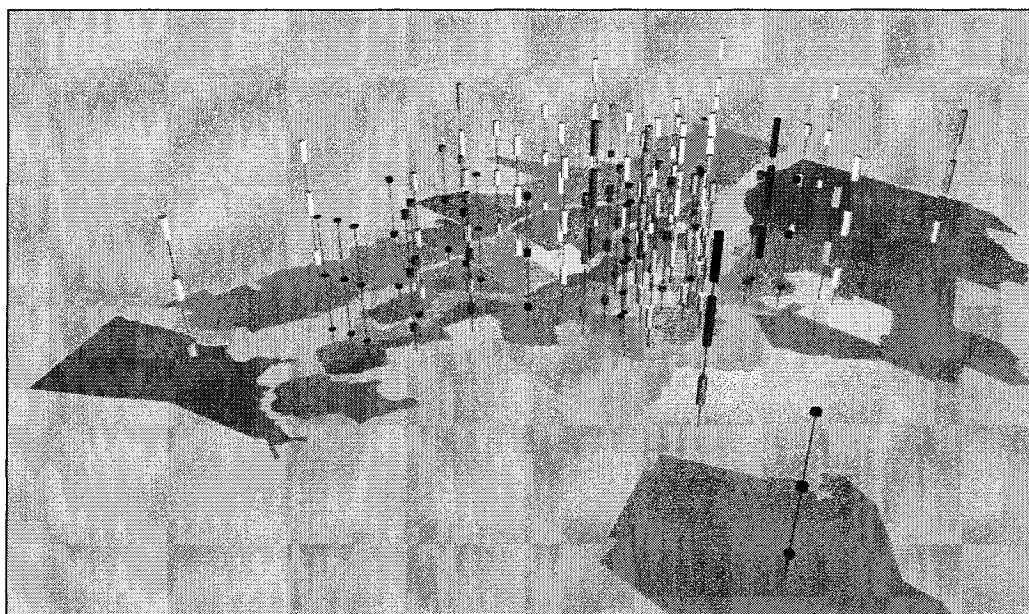


Figure 3.38 Les nombres de déplacements effectués dans 24h, tous les motifs sauf retour à domicile.

Chapitre 4 : La modélisation totalement désagrégée et Orientée- Objet

Au cours des dernières années, le domaine des transports a connu une évolution phénoménale grâce à l'introduction de nouvelles technologies informationnelles (systèmes d'information géographique, Internet, bases de données spatiales, etc.). Dans le cas particulier de la modélisation de la demande et de l'offre en transport, ces avancements offrent une perspective différente sur l'approche agrégée qui a dominé depuis les années soixante. En ce qui concerne l'approche totalement désagrégée (Chapleau 1992), celle-ci préconise l'analyse, la manipulation et le traitement discret des données de transport provenant principalement des enquêtes Origine-Destination. Elle permet aussi de stimuler de nouvelles méthodes de visualisation qui tirent parti des caractéristiques uniques des objets de transport. Pour faire l'examen plus approfondi de cette approche, nous débutons avec une brève introduction sur les systèmes d'information géographique appliqués au transport; ensuite, nous présentons l'approche totalement désagrégée orientée-objet de la modélisation de la demande de transport en commun; puis nous finissons avec une discussion sur les objets particuliers du transport collectif.

4.1 Les systèmes d'information géographique en transport

4.1.1 SIG et SIG-T

Dans les années soixante-dix, l'introduction de l'informatique dans le milieu cartographique a donné naissance à la cartographie numérique, domaine précurseur des systèmes d'information géographique (SIG). Dans les années quatre-vingt, l'apparition des outils informatiques marque le début des SIG par la création automatisée de cartes ainsi que la réunion de fonctions d'analyse et de manipulation de données, d'images et de textures géographiques.

Bordin (2002) distingue deux origines aux concepts des SIG : le besoin de flexibilité par rapport au dessin assisté par ordinateur (DAO) et le besoin de gestion d'information autre qu'alphanumérique¹².

Au sujet de cette première origine, Bordin mentionne que les outils de DAO sont consacrés principalement à la représentation graphique. Ils traitent uniquement les données graphiques, tandis que les SIG visent à réaliser une analyse géographique dont les fonctionnalités principales sont l'acquisition et l'analyse de données. Même si la majorité des SIG (Arc/INFO, MapInfo, etc) ont leurs propres modules de visualisation, les outils de DAO peuvent être utilisés comme interface graphique dans les SIG. À titre d'exemple, le groupe MADTUC utilise AutoCAD depuis 20 ans pour créer des représentations tridimensionnelles (MADCADD).

Concernant la deuxième origine, les SIG ont été développés parallèlement des modules spécifiquement adaptés à la gestion de bases de données, soit les Systèmes de Gestion des Bases de Données (SGBD).

Parallèlement, les systèmes d'information géographique transport (SIG-T) sont conçus spécifiquement pour l'acquisition, l'analyse, la manipulation et le stockage de données liées aux phénomènes de transport. Considérée comme l'une des branches les plus dynamiques des SIG, elle couvre une gamme de produits desservant les agences organisatrices de transport autant dans le secteur public que privé.

Les fonctions particulières des SIG-T permettent de résoudre certains problèmes comme le calcul de chemins (selon certains critères), l'affectation d'un flux sur un réseau ainsi que l'analyse de la demande.

¹² Alphanumérique : constitué de chiffres, de lettres et plus généralement de caractères, à l'exclusion des images, sons, films. (Bordin 2002)

Sept grandes catégories de fonctionnalités associées aux SIG/SIG-T sont identifiables (Trépanier 1999):

- « *La fabrication de cartes (Map Modelling). Utiliser les SIG pour fabriquer de toute pièce des cartes de type touristique, routière, etc.*
- *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 de caractéristiques spatiales dans l'analyse : corrélations spatiales, analyses de proximité, gravité, etc.*
- *La visualisation spatiale (Spatial Browsing). Afficher des éléments à référence spatiale précise : 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. »*

Dans ces fonctionnalités de SIG/SIG-T, la visualisation a un rôle pivot. En plus d'intervenir dans la fabrication de cartes et la visualisation spatiale, la visualisation agit comme interface entre l'utilisateur et le système pour l'entrée des données et la sortie des résultats.

4.2 La modélisation totalement désagrégée de la demande en transport

Le terme planification de transport couvre un grand spectre d'applications. On peut penser aux méthodes d'analyse de la circulation routière, à la planification routière impliquant l'utilisation du sol et à la planification des réseaux de transport en commun. Or, l'analyse de la demande est à la base de tous ces exercices de planification.

Principalement, on distingue deux grandes approches de modélisation de la demande : agrégée et désagrégée.

4.2.1 La modélisation agrégée

Le modèle agrégé a pris forme pour la planification de nouvelles infrastructures routières afin de répondre à l'augmentation phénoménale du parc automobile américain depuis la seconde guerre mondiale. Originellement conçu pour résoudre les problèmes liés à cette croissance de la demande, ce type de modèle simplifie la réalité par l'agrégation des données sous forme de variables « zonales », comme le taux de motorisation des ménages, le revenu moyen des ménages, la distance au centre-ville, la densité, le nombre d'emplois, le nombre de logements, la surface d'occupation du sol, etc.

Sur cette base, a été élaboré la méthode la plus utilisée: la procédure séquentielle classique (PSC). Cette méthode consiste en quatre étapes : la génération des déplacements, la distribution des déplacements, la répartition modale et l'affectation des déplacements. Sans entrer dans les détails de la méthodologie, notons que cette approche agrégée implique toujours une procédure sous-entendue, soit le découpage du territoire d'étude en zones analytiques de transport (*TAZ*, « *traffic analysis zones* »). Ces zones pourraient être déterminées en vue de maximiser le regroupement des caractéristiques sociodémographiques homogènes et minimiser le nombre de déplacements intra-zonaux. C'est à ce niveau que cette approche a reçu le plus de critiques (Bonnell et al. 2002).

Les résultats d'analyse étant très sensibles à ce découpage en zones, la difficulté vient de la détermination d'un critère universel de découpage. Dans une situation optimisée, ce découpage devrait refléter la similarité de la distribution spatiale de toutes les variables influentes en même temps, c'est-à-dire les variables de mobilité, géographiques, politiques et économiques.

De plus, la manière de représenter les zones avec des centroïdes peut causer problème, car en agrégeant toutes les unités de la zone en un seul point, la distance – une des variables les plus dépendantes dans l'analyse – est calculée selon ces centroïdes alors que les connections des centroïdes au réseau de transport sont plutôt arbitraires. De plus,

cette simplification ne permet pas l'analyse et la modélisation fine du caractère spatial des objets de transport. En effet, Chapleau et de CEA (1983) montre que même si on définit les zones de façon très fine, l'erreur commise lors de l'affectation de la demande de transport collectif peut être très grande (Bonnell et al. 2002).

4.2.2 La modélisation désagrégée

L'approche désagrégée, ou la modélisation désagrégée des choix discrets, permet de représenter les phénomènes de transport de manière discrète. Cette approche est basée sur l'hypothèse que les personnes qui ont besoin de se déplacer sont capables de choisir le mode de leurs déplacements selon un ensemble de critères. Ces derniers incluent des facteurs économiques comme la possession d'automobile ainsi que des caractéristiques du réseau tel l'accessibilité, l'origine et la destination du déplacement, le temps de déplacement, etc. (Bonnell et al. 2002).

Dans le contexte de la grande région de Montréal, l'approche totalement désagrégée (Chapleau 1992) préconise le traitement informationnel des enquêtes-ménage transport, dites origine-destination (O-D). Ces enquêtes visent à collecter de l'information sur la mobilité de la population par la cueillette téléphonique de données sur les ménages, les personnes et les déplacements (s'il y a lieu) des individus. L'information recueillie est géoréférencée à un niveau très fin, soit au code postal, à l'adresse civique, à l'intersection de rue ou au générateur de déplacements. Ainsi, cette approche permet de géolocaliser et caractériser tous les lieux spatiaux impliqués dans un déplacement (origine, destination, ménage, jonctions).

Chapleau (2002) expose les fonctionnalités de l'approche totalement désagrégée à partir d'enquêtes O-D comme étant :

- *«de traiter chaque déplacement individuel en maintenant un lien avec toute autre variable relative à la personne ou au ménage associé»;*

- *«d'associer à chaque localisation des coordonnées fines le reliant à un système d'information géographique, évacuant ainsi le recours préalable à un découpage spatial peu significatif»;*
- *«d'intégrer à l'analyse toute information pertinente sur l'offre de transport soit la géométrie des réseaux et leur interconnexion, le niveau de service en terme de fréquence et de vitesse ainsi que tout autre élément de perception par l'usager»;*
- *«d'autoriser l'intégration de toutes autres données périphériques pertinentes, à tout niveau d'agrégation, par le biais de la caractérisation spatiale : données de recensement, association géopolitique, etc.» ;*
- *«d'appliquer à tout traitement-fonctionnalité de données un mécanisme d'auto-enrichissement des données préalables, et de permettre la rétroaction analytique à tout moment; de fait, chaque calculateur ajoute de l'information aux données individuelles initiales. »*

4.2.3 L'approche orientée-objet de la modélisation totalement désagrégée

L'utilisation d'une approche orientée-objet en transport constitue une suite logique à l'évolution des modèles, des méthodes et des techniques d'analyse utilisées par les planificateurs de transport.

Les concepts et les pratiques évoquées dans cette section sont tirés des travaux de Trépanier (1999). Ici, seulement les concepts reliés au sujet de ce mémoire sont mentionnés.

Dans le cadre de l'approche orientée-objet de transport, un *«...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.»*. (Trépanier 1999).

«... 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» (Trépanier 1999).

Il est à noter que parmi les aspects reliés à la modalisation orientée-objet des transports, les méthodes propres à l'exercice du transport ainsi que les relations entre les objets ou les classes vont au-delà de notre discussion. Ce qui nous intéresse est plutôt l'identification des objets de transport et leurs propriétés intrinsèques.

Trépanier (1999) regroupe en quatre métaclasses les objets de transport :

- 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, un véhicule mouvant, une chose déplacée, telle un produit, un élément de marchandise. »*
- Les objets cinétiques *« sont les descripteurs et les "canalisateurs" du transport. Lorsque l'objet décrit un déplacement entre deux points importants, il est de type cinétique simple (lien routier, lien de transport collectif). »*
- 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'information géographique classiques »* : les objets de type point, les objets de type lien, les objets de type surface.
- Les objets systémiques *« sont des ensembles cohérents d'objets élémentaires et des relations qui les lient. Un objet systémique mixte regroupe des objets de métaclasses différentes qui sont liés entre eux dans l'optique d'une activité de transport (système urbain, système ferroviaire). »*

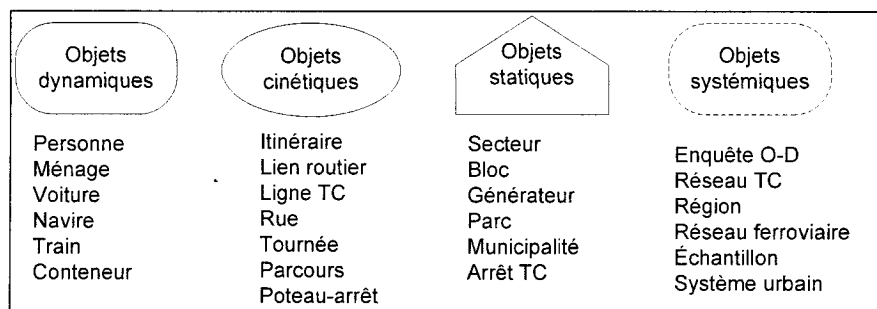


Figure 4.1 Les objets de transport par méta classe (Trépanier 1999)

Or, les propriétés des objets transport sont associées avec le type. On peut donc énumérer en bref dix types de propriétés (Trépanier 1999) :

- Les propriétés d'identification *«permettent de reconnaître l'objet de façon unique et différenciée dans le temps et dans l'espace»*.
- Les propriétés de dénomination *«offrent la possibilité de nommer les objets de façon explicite.»*
- Les propriétés géométriques décrivent des objets de transport faisant l'objet d'une spatialisation par l'attribution de caractéristiques physiques. Elles sont des propriétés géométriques référencées dans le système d'information géographique utilisé.
- Les propriétés pseudo-géométriques sont des caractères géométriques calculés comme les distances, longueurs ou largeurs.
- Les propriétés spatiales sont des références qui positionnent l'objet dans l'espace, *«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).»*
- Les propriétés temporelles *«décrivent l'état référencé dans le temps. Celles-ci décrivent non seulement des instants (à quel moment ?), mais également des durées (combien de temps ?).»*

- 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».*
- 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.»*
- 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.»*
- Les propriétés de classification sont souvent *«basées 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.»*

Voilà qui conclut le survol des objets transport et des propriétés associées, dans le contexte d'une approche totalement désagrégée orientée-objet. Le prochain chapitre présente les objets de l'offre de transport : les objets du réseau de transport collectif.

Chapitre 5 : Visualisation des objets du réseau de transport collectif

Dans le cadre de la modélisation orientée-objet, on peut distinguer deux types de réseaux, soient les réseaux de voirie et ceux de transports collectifs. La représentation et la visualisation de ces deux types de réseaux font partie essentielle de l'analyse et de la planification de transport.

Pour ce faire, ce chapitre présente les expérimentations de la visualisation des objets du réseau collectif à l'aide de divers logiciels et langages, dont les logiciels SIG, Excel et VBA, VRML, etc.

De ce fait, nous organiserons donc le contenu de la manière suivante. Tout d'abord, on classe les représentations en deux catégories selon le nombre de dimensions requises pour décrire les géométries des objets, soit la représentation en 1D et en 2D. Ensuite, pour chacune de ces deux représentations, les exemples de la visualisation sont réalisés avec les visualisations en 1D, 2D, 3D et 4D (Animation 3D).

5.1 Les composants d'un réseau de transport collectif

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 (Trépanier 1999).

Dans le cas montréalais, les réseaux collectifs impliquent les autobus, le métro et le train de banlieue. Bien que la modélisation de ces trois modes de transport soit différente, ces représentations procèdent des caractères similaires. Puisque le métro et le train utilisent les infrastructures relativement statiques et que le réseau d'autobus utilise le réseau routier, la représentation du réseau d'autobus est significative. C'est la raison pour laquelle nous nous intéressons particulièrement à la visualisation du réseau de transport par autobus.

La figure suivante présente le modèle-objet d'un réseau de transport collectif avec l'autobus.

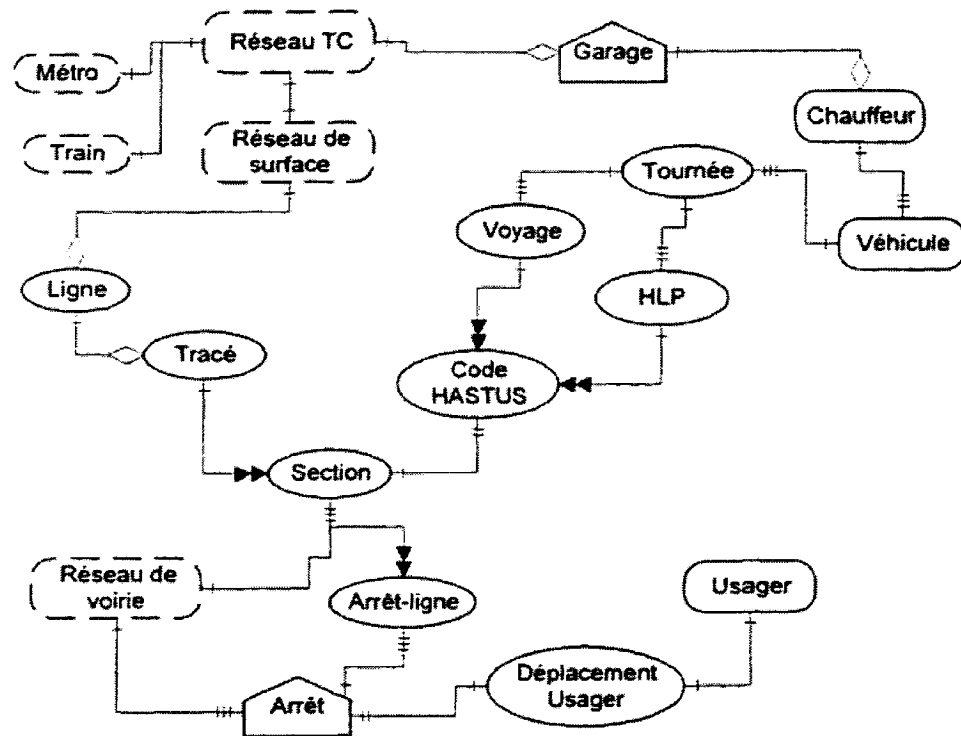


Figure 5.1 Modèle-objet du réseau de transport collectif (cas montréalais), d'après Trépanier 1999.

Parmi les objets présentés dans la Figure 5.1, on peut identifier deux branches d'objets particuliers, soit les objets *Ligne*, *Tracé*, *section*, *Arrêt-ligne* et *Arrêt*, qui sont perçus comme le service par les usagers, et les objets *Chauffeur*, *Véhicule*, *Tournée* et *Voyage*, qui sont considérés par l'opérateur comme étant les ressources (Trépanier 1999). Donc, dans les sections suivantes, on présentera successivement ces deux branches d'objets.

5.2 La représentation des objets *Ligne* et *Arrêt*

Selon l'article de M. Trépanier publié en 1999, un objet *Ligne* est une collection de tracés identifiés par une dénomination généralement unique et intéressée, telles un numéro ou un nom. Les tracés sont regroupés par direction (usuellement opposées). L'objet *Tracé* est, quant à lui, une collection orientée de plusieurs sections. Pour sa part,

l'objet *Section* est une séquence spatio-temporelle d'objets *Arrêt-Ligne* définissant la séquence d'objets *Arrêt* à desservir.

5.2.1 La représentation des objets *Ligne* et *Arrêt* 1D

Dans cette section, nous débutons avec une représentation simplifiée des objets *Ligne* et *Arrêt*. Viendront ensuite les exploitations des problèmes particuliers incluant les statistiques essentielles dans le processus d'analyse et de planification, telles que les embarquements/débarquements sur les lignes et arrêts, l'évolution temporelle des profils de charge, la relation entre les charges et la capacité des lignes.

5.2.1.1 La visualisation de l'objet *Ligne* et *Arrêt* 1D

La représentation la plus simple de l'objet *Ligne* est de le présenter avec une ligne droite (voir figure suivante).

Dans ce type de représentation, les symboles des arrêts sont souvent positionnés en fonction des caractères du tronçon. Par exemple, les distances entre les arrêts ou les temps nécessaires pour parcourir ces distances.

L'exemple utilisé ici comporte deux objets *Tracé*, soient les tracés en sens aller et retour ainsi que six objets *Arrêt*.

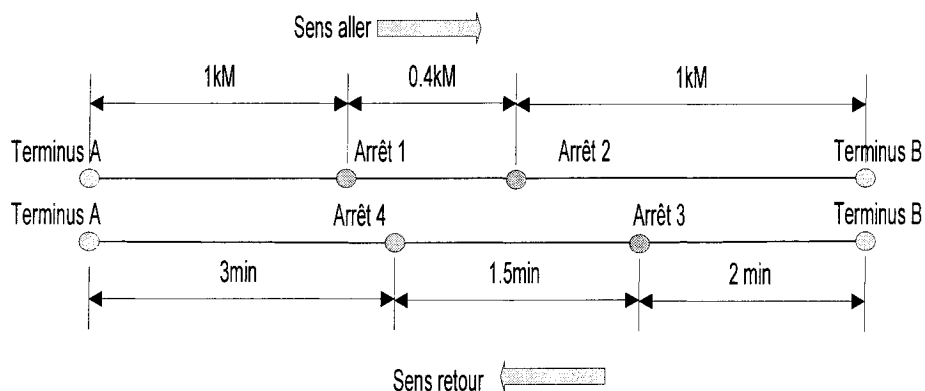


Figure 5.2 Représentation d'une ligne d'autobus avec une ligne simple.

5.2.1.2 La visualisation des statistiques de l'objet *Arrêt*

L'objet *Arrêt* est à la base de l'objet *Ligne*. Dans la représentation 1D, les arrêts sont représentés par les points sur une ligne droite. Donc, il est possible d'implanter des variables visuelles de manière ponctuelle pour les représenter.

Un objet *Arrêt* peut être constitué de nombreuses propriétés, comme :

- la nomination : le numéro d'arrêt;
- la géométrie : les coordonnées, les intersections, les numéros civiques;
- l'opération : les lignes d'autobus associées;
- la chronométrie : l'heure de passage, le temps d'attente à l'arrêt ;
- les statistiques : le nombre d'entrants et sortants, etc..

À l'aide du module graphique d'Excel, les représentations sont réalisées à propos des aspects suivants :

- Pour les propriétés nominales, on peut différencier le type de l'arrêt en utilisant simplement les couleurs et les symboles, comme dans la Figure 5.2.
- Pour les horaires d'autobus, si on affecte le temps à l'axe Y, on peut tracer une série de points pour chaque arrêt dans un plan 2D dont les coordonnées *x* représentent la distance cumulée, tandis que les coordonnées *y* représentent les heures d'arrivée ou de départ. Puisque pour chaque arrêt, deux temps peuvent être associés, les horaires sont présentés par des lignes reliant les points d'arrivée et de départ (voir Figure 5.3 réalisée avec la fonction graphique de type «nuage de points reliés par une courbe»).

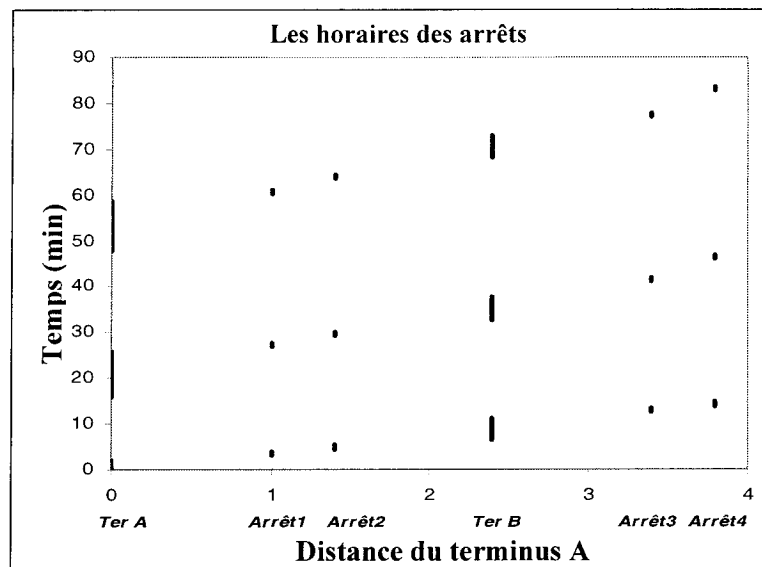


Figure 5.3 Représentation des horaires des arrêts.

- Pour représenter les embarquements et débarquements aux arrêts, on peut faire varier la taille ou la couleur du symbole (Voir Figure 5.4 et Figure 5.5 réalisées avec la fonction graphique de type «Bulle»).

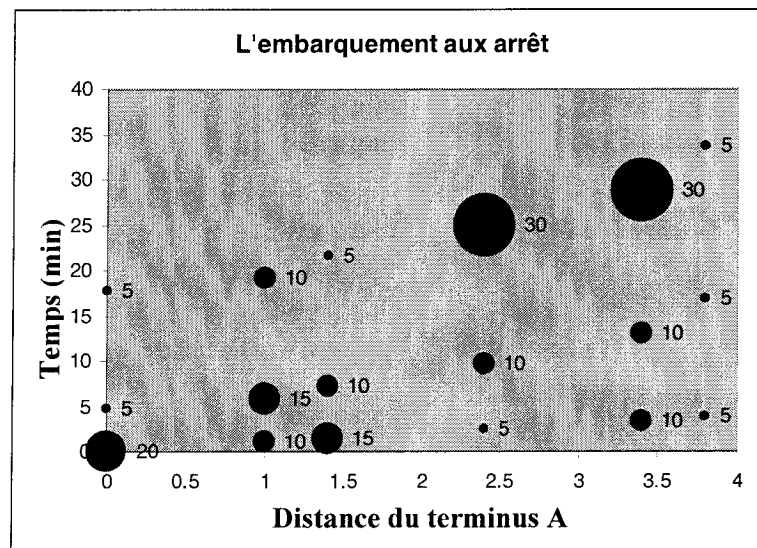


Figure 5.4 Représentation des statistiques des arrêts avec la taille du symbole.

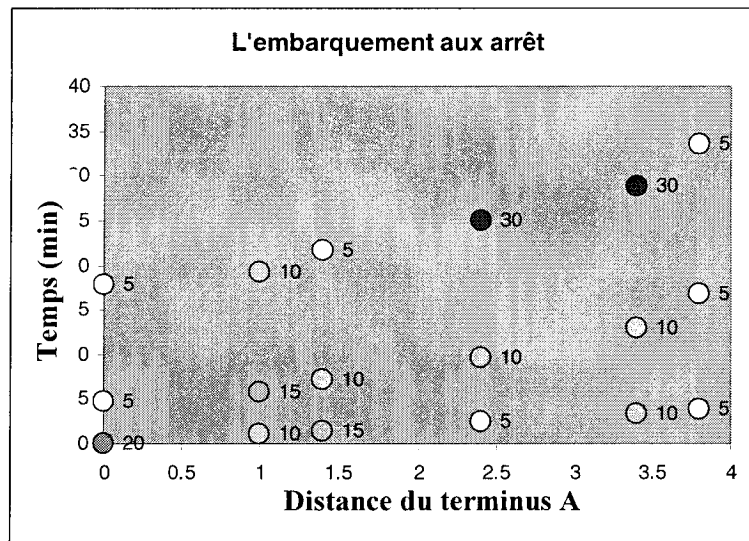


Figure 5.5 Représentation des statistiques des arrêts avec la couleur du symbole.

- Pour représenter à la fois les embarquements et débarquements aux arrêts, on peut créer soit un diagramme de secteur, soit un diagramme de barre pour chaque arrêt. Les résultats sont illustrés aux Figure 5.6 et Figure 5.7. La Figure 5.6 est réalisée par combinaison des graphiques de type «Bulle» et «Nuage de points reliés par une courbe».

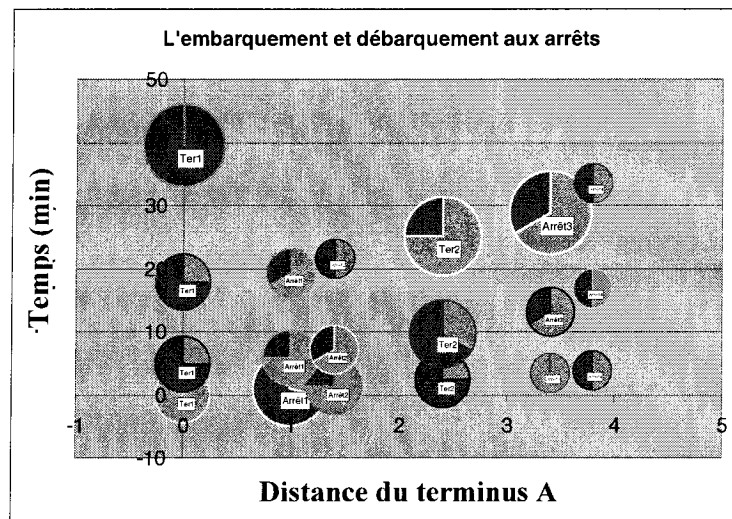


Figure 5.6 L'embarquement et débarquement aux arrêts (Rouge – débarquement, bleu - embarquement)

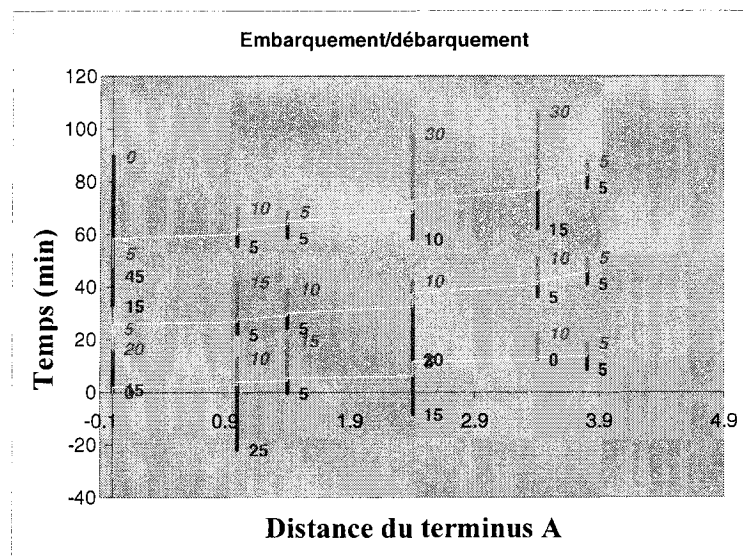


Figure 5.7 L'embarquement et débarquement aux arrêts (Rouge – débarquement, vert - embarquement)

5.2.1.3 La représentation des statistiques d'objet *Ligne 1D*

En utilisant le même exemple que celui des sections précédentes, on peut également présenter les statistiques associées à la ligne en ajoutant une deuxième dimension.

5.2.1.3.1 Profil de charge

Les statistiques importantes de la ligne pour chaque tronçon incluent la *charge* (le nombre de personnes à bord) et la *capacité* (le nombre maximum de personnes qui peuvent être transportées grâce à cette ligne d'autobus).

De façon simplifiée, le profil de charge d'une ligne et le nombre de personnes qui embarquent et débarquent aux arrêts peut être illustré par la Figure 5.8.

Cependant, les charges d'une ligne peuvent aussi avoir un caractère temporel. Dans la Figure 5.9, trois profils de charges, soient 1, 2 et 3, correspondant respectivement aux temps t_1 , t_2 et t_3 , sont différenciés par ces traits.

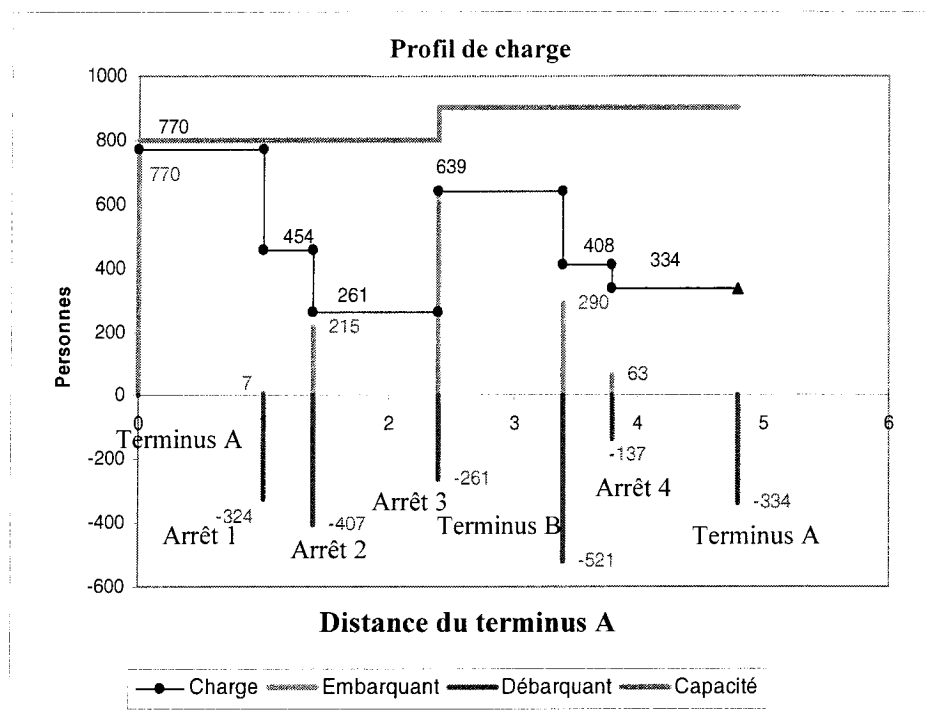


Figure 5.8 Le diagramme du profil de charge d'une ligne d'autobus.

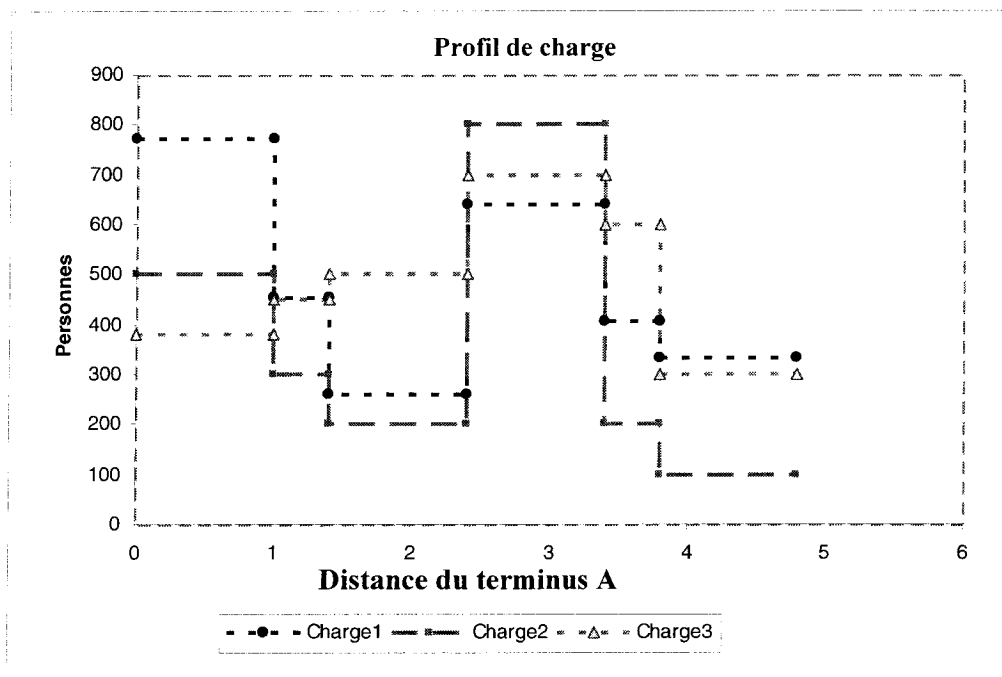


Figure 5.9 Représentation des multiples profils de charges.

5.2.1.3.2 Profil de charge temporel en 3D

Un des inconvénients des diagrammes ci-dessus est qu'il est difficile d'observer l'évolution temporelle de la charge.

Dans la représentation réalisée à l'aide de 3DField/3DFieldPro¹³, les axes x , y et z correspondent respectivement à la distance cumulée, aux profils de charges et aux temps. (Il est à noter que les valeurs entre deux charges sont interpolées de manière linéaire.)

De cette façon, une coupe perpendiculaire de l'axe X au point x_1 représente l'évolution temporelle de la charge à cet endroit précis. Dans un même ordre d'idée, une coupe perpendiculaire de l'axe Y au point y_1 représente les charges au moment y_1 .

Nous notons que les couleurs interpolées à partir des trois couleurs (bleu, vert et rouge) sont utilisées comme variables visuelles redondantes de la variable visuelle de la *position* afin de mieux différencier les variations des valeurs.

Puisque les surfaces créées avec le logiciel 3DField/3DField Pro sont calculées selon une des méthodes d'interpolation, les données brutes doivent être transformées de la manière suivante. Pour chaque point $p_o(x, y)$ des arrêts (sauf au début et à la fin de la série), on ajoute un point supplémentaire $p_s(x + \Delta, y)$. Cette valeur Δ dépend de la précision que l'on veut obtenir. Dans la figure ci-dessus, on choisit 0.0001 comme valeur. Par la suite, il suffit de charger ces données dans le logiciel et de choisir l'option «triangulation» comme méthode d'interpolation.

¹³ 3DField/3DFieldPro est un logiciel de création de surface 3D et de lignes de contours à partir de données ponctuelles. <http://field.hypermart.net/> Dernier accès : 2005-07-30

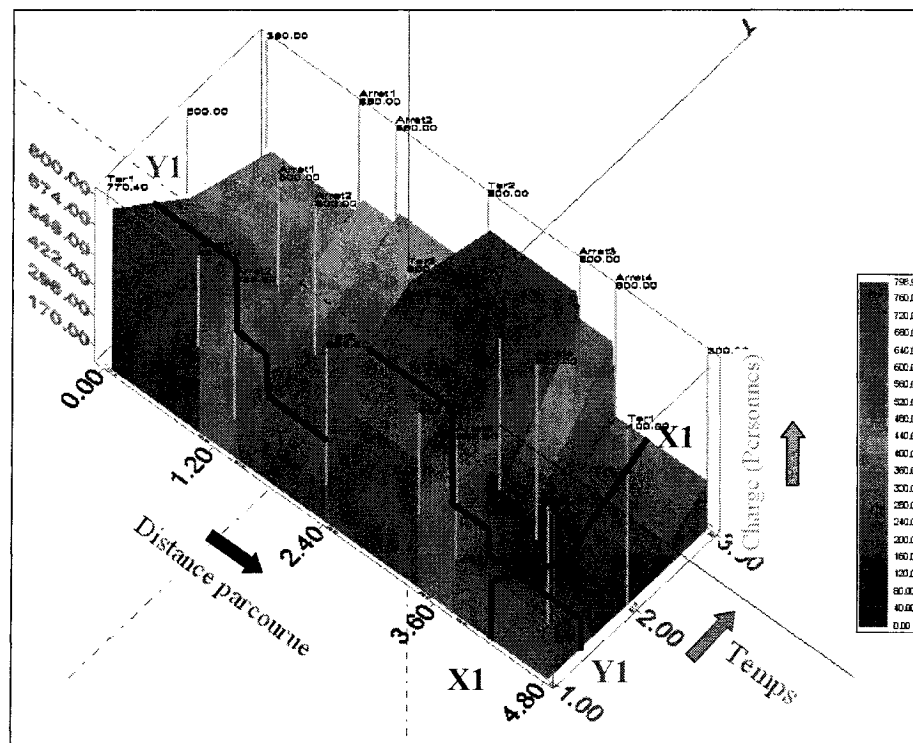


Figure 5.10 Profil de charge 3D

5.2.1.3.3 L'analyse du profil de charge et de la capacité 3D

Un autre indice important de la ligne d'autobus est sa capacité d'évolution au fil du temps. Malheureusement, il est difficile de représenter les relations entre les capacités et les charges à plusieurs instants dans un seul graphique (voir Figure 5.11).

Pour résoudre ce problème, ces capacités peuvent être transformées en une surface comme on l'a observé à la Figure 5.10. En plus, tel qu'illustré dans la Figure 5.12, la combinaison de ces deux surfaces de capacités et de charges dans une seule scène 3D nous permet d'examiner la relation entre ces deux indices.

Puisque 3DField ne permet pas de visualiser deux surfaces en même temps, les surfaces sont exportées en fichiers DXF et, par la suite, se convertissent en fichiers VRML grâce au logiciel Accutrans3D¹⁴.

Dans la figure 5.12, les capacités sont représentées par la surface de couleur rouge en demi-transparence, tandis que les charges sont représentées par la surface bleue. Rapidement, on peut observer qu'une partie de la surface bleue se situe au-dessus de la surface rouge, ce qui indique qu'à un instant donné et en un lieu donné, la charge dépasse la capacité théorique de la ligne.

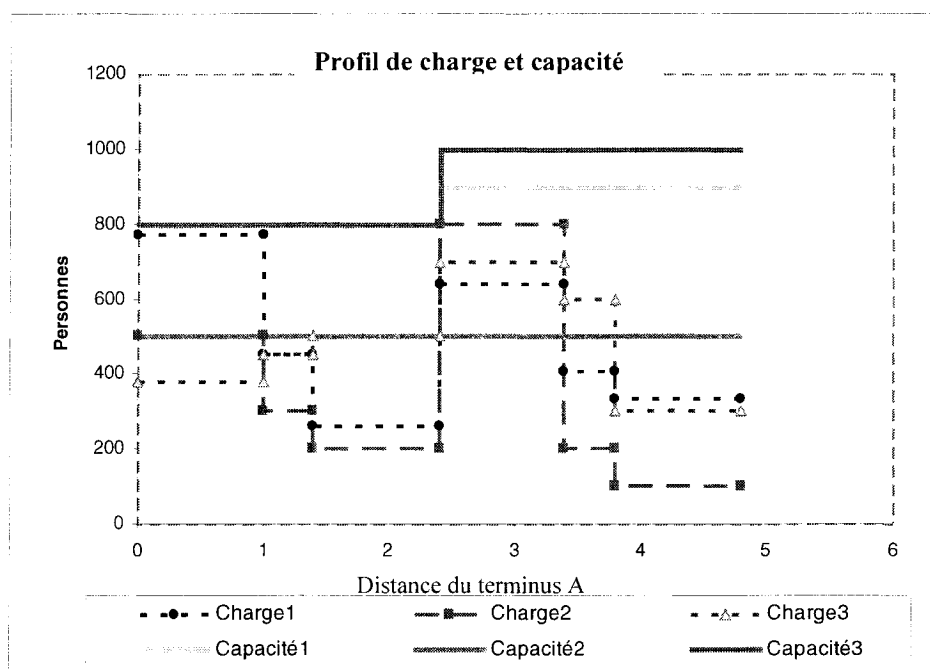


Figure 5.11 Les capacités et le profil de charge d'une ligne d'autobus.

¹⁴ Accutrans3D est un logiciel de conversion, modélisation et génération de fichiers 3D.

Adresse Internet: <http://www.micromouse.ca/> Dernier accès : 2005-07-30

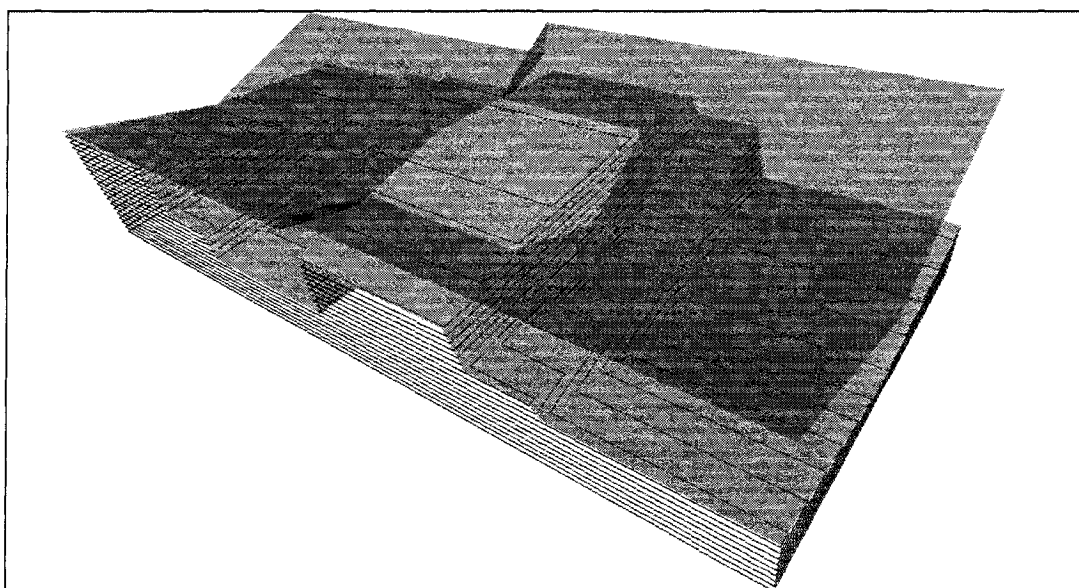


Figure 5.12 Visualisation des charges et capacités d'une ligne d'autobus en VRML. (La surface rouge est l'enveloppe de la capacité et la bleue est le profil de charge)

5.2.2 La représentation des objets *Ligne* et *Arrêt* en 2D

Si les géométries des lignes sont codées en X et Y dans un plan 2D, les *Arrêts* sont souvent représentés avec un symbole et les *Arrêt-lignes* sont présentées par des polygones. Dans un format typique du système SIG comme les fichiers SHAPE de ArcGIS, les fichiers de lignes détiennent seulement de l'information pour les tronçons mais non pour les nœuds de ligne en tant que tel. Par conséquent, pour représenter un objet *Ligne*, deux fichiers sont nécessaires, soient un pour les objets *Arrêts* et l'autre pour la séquence des *Arrêt-lignes*. De manière simplifiée, un réseau de sept lignes 2D est illustré dans la Figure 5.13. À l'intérieur de celle-ci, les lignes sont colorées selon un numéro et les directions sont indiquées par des flèches.

Aisément, on observe que ce type de représentation n'est pas le meilleur moyen de visualiser une ligne puisque les tracés aller et retour sont recouverts l'un par l'autre. Par exemple, pour la ligne 4 (représentée en bleu), qui est définie par la séquence des arrêts 1-19-18-12-11-10-12-18-19-1, les tronçons aller 1-19-18-12 sont recouverts par ceux du retour.

Une autre approche proposée par le logiciel VIPER¹⁵ est démontrée dans la Figure 5.14 à l'aide des lignes d'autobus représentées par les lignes colorées.

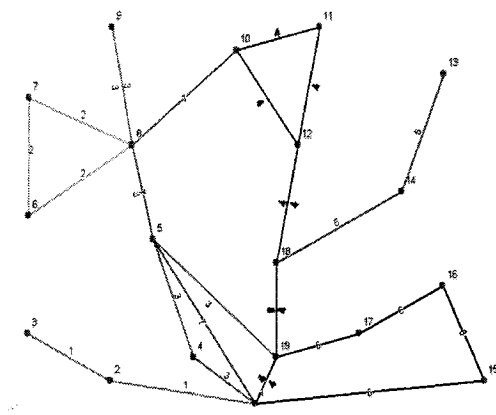


Figure 5.13 Le réseau fictif de Machiaville.

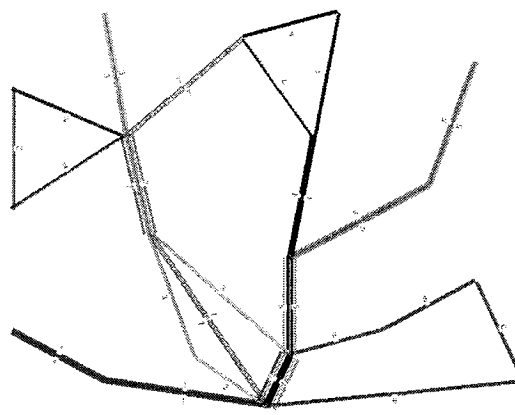


Figure 5.14 Un réseau de sept lignes visualisé par le logiciel VIPER.

5.2.2.1 La visualisation des statistiques de l'objet *Arrêt*

Les Figure 5.15, Figure 5.16 et Figure 5.17 illustrent les exemples à partir des données de montées et descentes aux arrêts en utilisant des variables visuelles différentes.

1. Figure 5.15 – les diamètres de cercle sont proportionnels aux valeurs.
2. Figure 5.16 – les tailles de barre sont proportionnelles aux valeurs.
3. Figure 5.17 - les diagrammes en secteurs représentent les valeurs. La taille du cercle correspond à l'addition des nombres de personnes montées et descendues.

Ces trois figures sont réalisées avec le logiciel SIG de ArcGIS. Elles sont réalisées grâce aux processus suivants :

¹⁵ VIPER est un module de codification et de visualisation d'un réseau de transport dans l'application CUBE. Adresse d'Internet : <http://www.citilabs.com/viper/> Dernier accès : 2005-07-31.

1. Transformer la base de données en format DBF . Celle-ci contient les coordonnées des arrêts, les montées et les descentes. Dans notre cas, la base de données est obtenue à partir de la base de données GPS enregistrées dans un fichier Excel. La transformation se fait facilement avec la fonction «Enregistrer sous ...» et ensuite choisir le type DBF.
2. Créer les fichiers SHP à partir de la base de données DBF. Cette étape est réalisée grâce à la fonction de «read x y table » du module ArcMap de ArcGIS. À l'aide de cette fonction, les données sont transformées en éléments de points dans une couche graphique de point ArcMap.
3. Exporter le fichier en type SHP (facultatif). Cette étape a pour but d'accélérer l'affichage dans le logiciel ArcMap puisque dans ce dernier, l'affichage d'une couche graphique de points ArcMap est beaucoup plus longue que l'affichage d'un fichier de SHP. Pour ce faire, on peut utiliser la fonction de «export data...» et choisir le type SHP.
4. Symboliser les données avec des fonctions de symbolisation d'ArcMap.
 - a. Pour la Figure 5.15, le fichier SHP est affiché deux fois dans ArcMap avec l'option de « symbole proportionnel ».
 - b. Les Figure 5.16 et Figure 5.17 sont réalisées à l'aide de la fonction de « symbole composé » en utilisant les diagrammes du type « barre » et « cercle en secteurs ».
5. Ajouter les fonds. Dans ces figures, le fond est un fichier DXF du territoire de la ville de Laval.

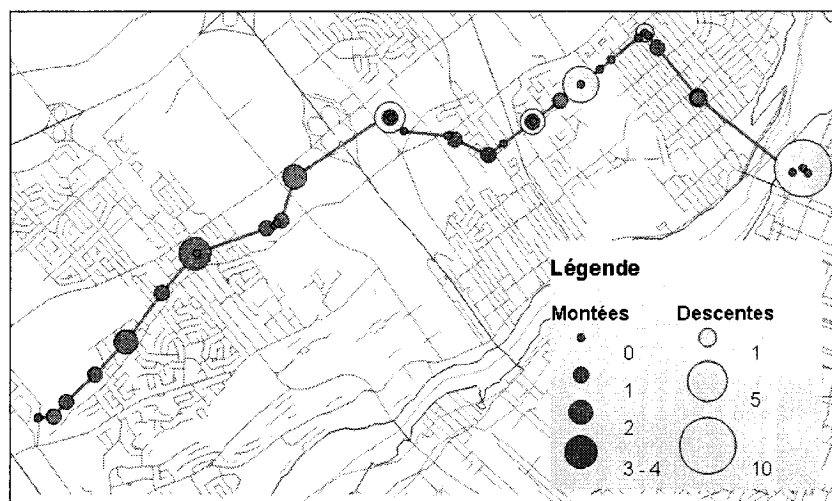


Figure 5.15 Visualisation des statistiques des arrêts -1.

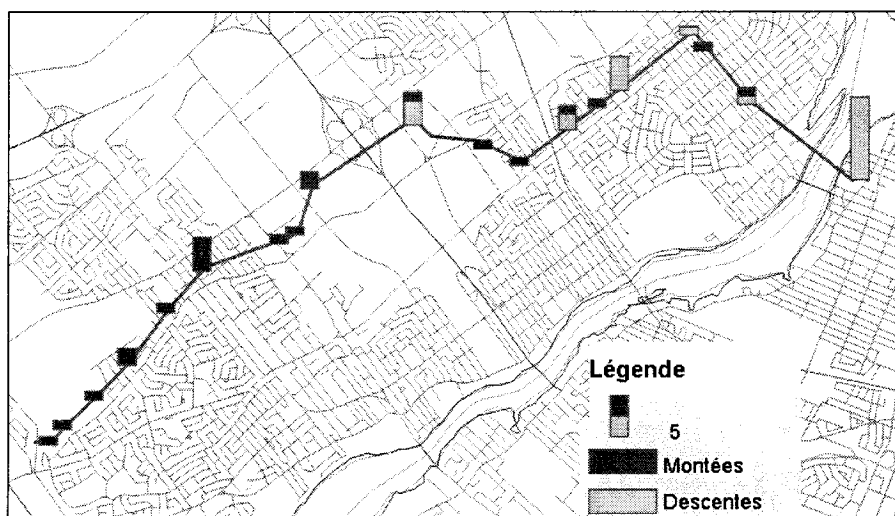


Figure 5.16 Visualisation des statistiques des arrêts -2

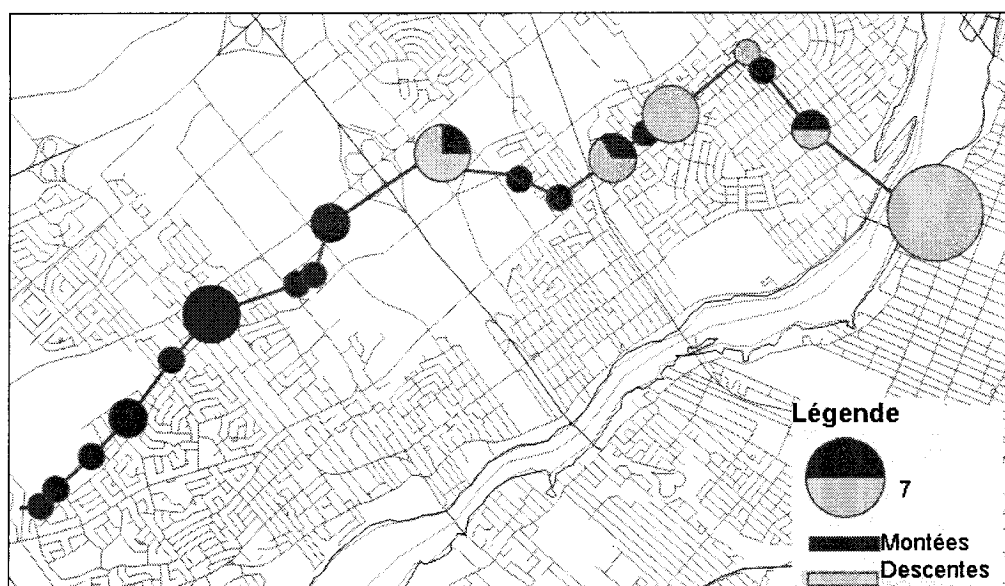


Figure 5.17 Visualisation des statistiques des arrêts -3.

5.2.2.2 La représentation des statistiques d'objet *Ligne* 2D

Comme pour la représentation en 1D, nous utiliserons les statistiques des charges afin de démontrer quelques exemples de la représentation des statistiques d'objets *Ligne*.

5.2.2.2.1 Profil de charge 2D

Fréquemment, la variable visuelle de la taille est utilisée pour représenter le profil de charge sur une ligne. La création du graphique est simple. Il suffit de faire varier la largeur des lignes en proportion de la charge. L'exemple de la Figure 5.18 montre la charge totale (aller + retour) sur la ligne 4.

Tel que démontré par la Figure 5.19 afin de visualiser les charges d'aller et de retour simultanément, on peut utiliser la variable visuelle des couleurs afin de différencier ces deux modalités.

L'exemple le plus complet se trouve à la Figure 5.20, qui présente un des travaux du groupe MADITUC, dans lequel les lignes sont colorées selon l'heure du déplacement (Chapleau 2003).

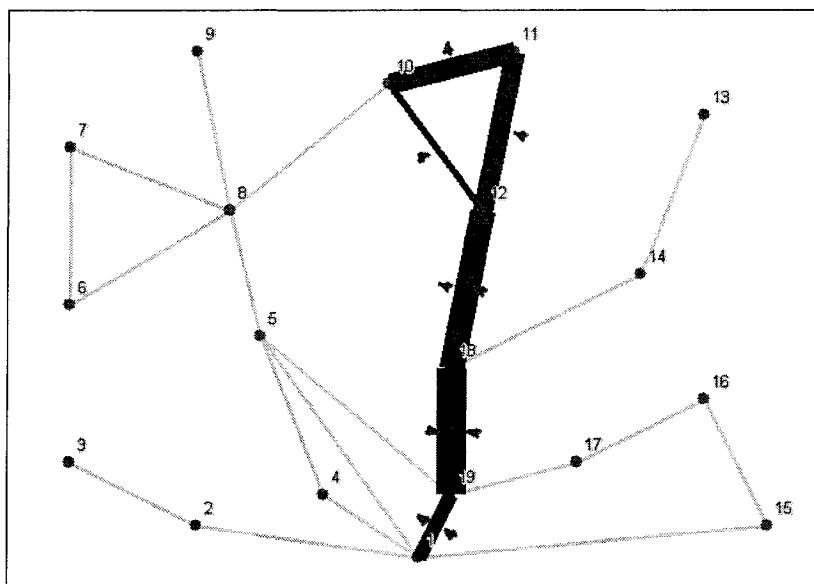


Figure 5.18 Le profil de charge total sur la ligne 4.

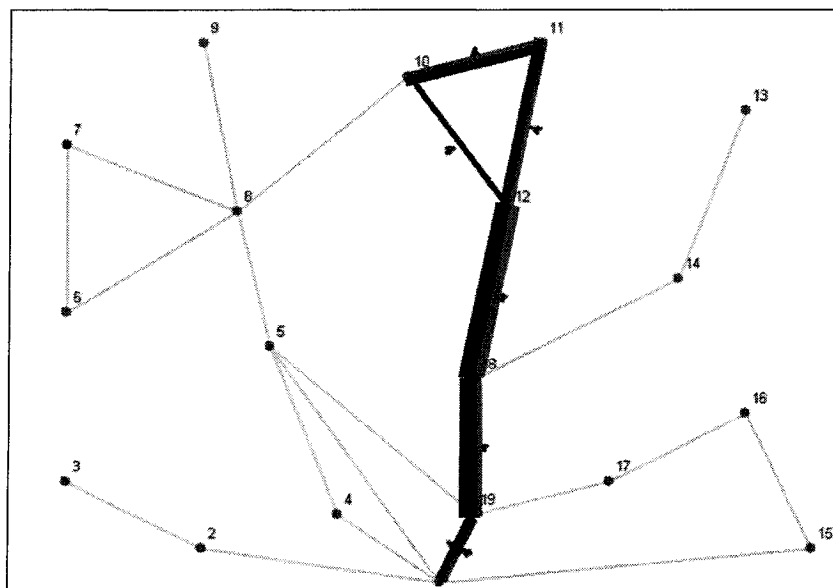


Figure 5.19 Le profil de charge de la ligne numéro 4, aller et retour.

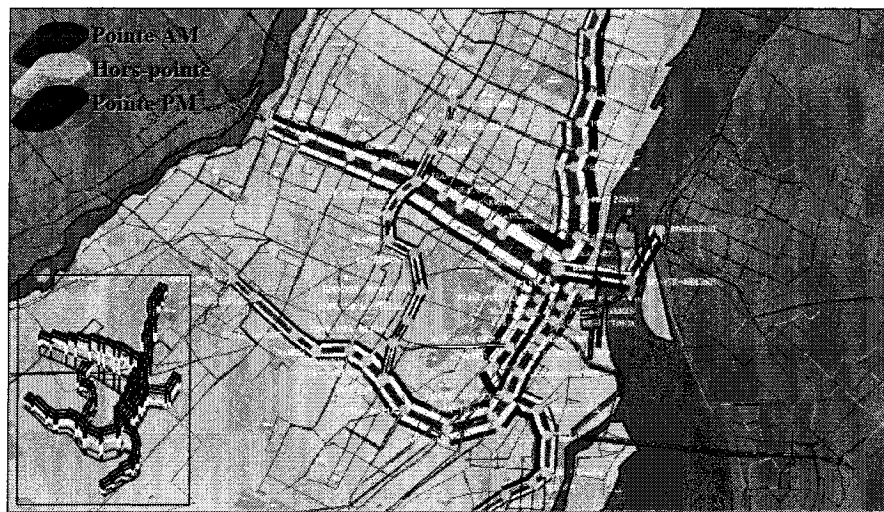


Figure 5.20 Profil de charge 24 heures sur le réseau de métro montréalais (Chapleau 2003).

5.2.2.2.2 Profil de charge 3D

Puisque le nombre de lignes pouvant être représentées en même temps est limité par la surface de la carte dans les représentations 2D, il est plus efficace de visualiser les profils de plusieurs lignes dans une scène 3D. L'utilisation de ce type de représentation est documentée dans les travaux de MADITUC (Chapleau 2003).



Figure 5.21 Le profil de charge 3D sur le réseau de métro montréalais. (Chapleau 2003)

Pour construire une représentation 3D des profils de charge, il est seulement nécessaire de traduire les charges en hauteurs par extrusion des lignes afin que leur projection dans le plan (X,Y) corresponde à la géométrie de ces lignes. La figure suivante est réalisée à l'aide du logiciel VRMLGen à partir du *Shapefile*.

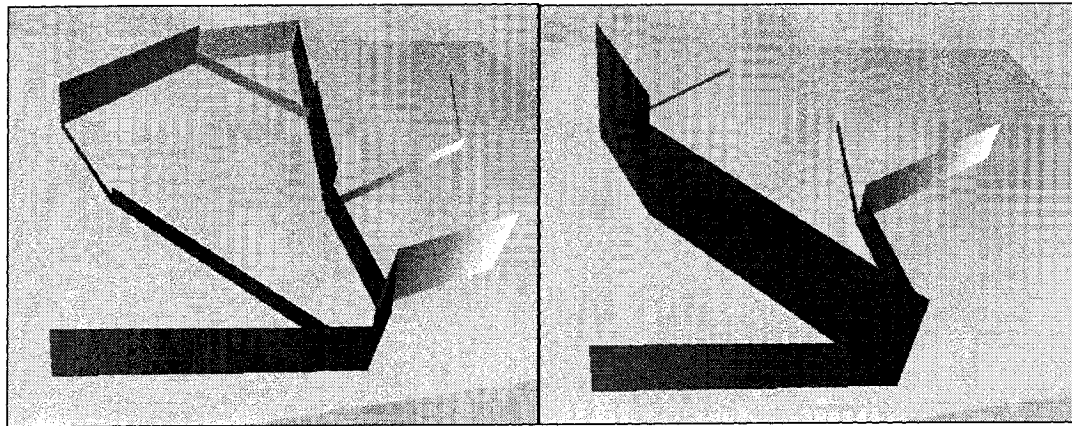


Figure 5.22 Les profils de charge 3D d'aller et retour sur le réseau Machiaville.

La Figure 5.23 est réalisée à l'aide des langages VRML et HTML/VBScript. Celle-ci illustre une des possibilités de visualisation des charges de manière interactive. Dans cette expérimentation, les usagers sont capables de choisir les éléments à visualiser (les numéros des lignes, le sens aller ou retour, le temps de parcours et les volumes sur la ligne). Si les sens aller et retour sont choisis en même temps, les extrusions représentant les valeurs pour le sens aller sont placées au-dessus du plan de référence tandis que celles de retour sont placées au-dessous.

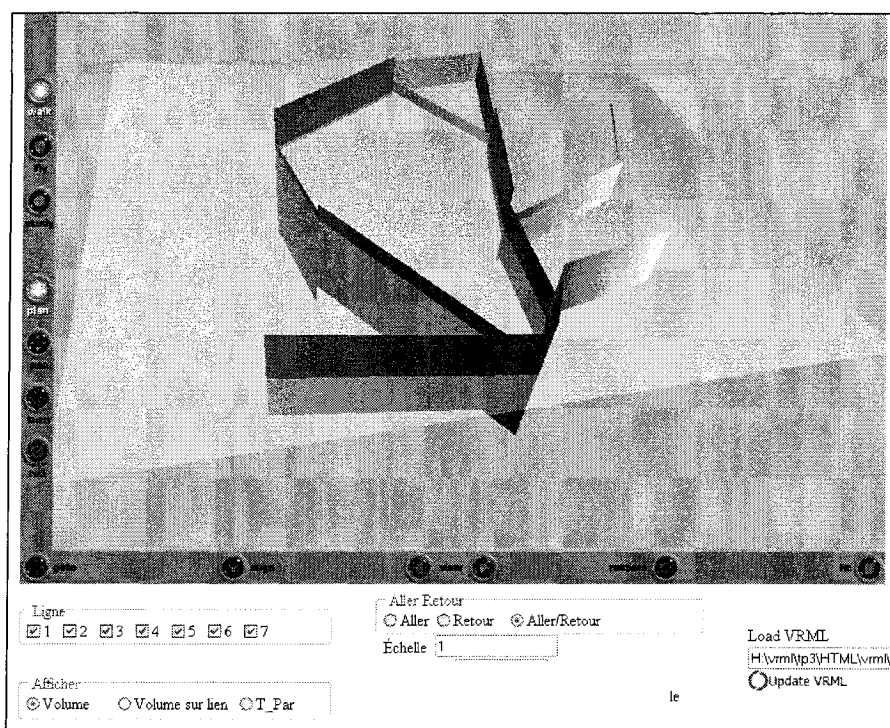


Figure 5.23 L'interface interactive de visualisation du profil de charge sur le réseau.

5.3 Les représentations des objets *Voyage*, *Tournée* et *Véhicule*

Selon la définition donnée par Trépanier en 1999, l'objet *Tournée* est une collection d'objets orientés *Voyage* que doit effectuer un chauffeur avec un (ou plusieurs) véhicule provenant d'un garage. L'objet *Voyage* est défini par une séquence d'objets *Code HASTUS*, qui sont des points de contrôle situés à l'intérieur et à l'extérieur du réseau. Les points de contrôle bornent les sections à parcourir (début/fin) et établissent les heures de passage prévues par l'opérateur.

Cependant, les *Codes HASTUS* ne permettent pas d'associer une localisation spatiale a priori. Par conséquent, le parcours d'autobus défini par ces codes ne permet pas une définition assez détaillée afin d'assurer une connectivité (par les noeuds de correspondance) et leur opérabilité. C'est pourquoi, dans les applications de MADITUC, les parcours sont définis par trois types d'objets, soient les points de contrôle, les noeuds et les arrêts (Trépanier 1999).

La figure suivante illustre une tournée d'autobus qui ne contient qu'un seul voyage.

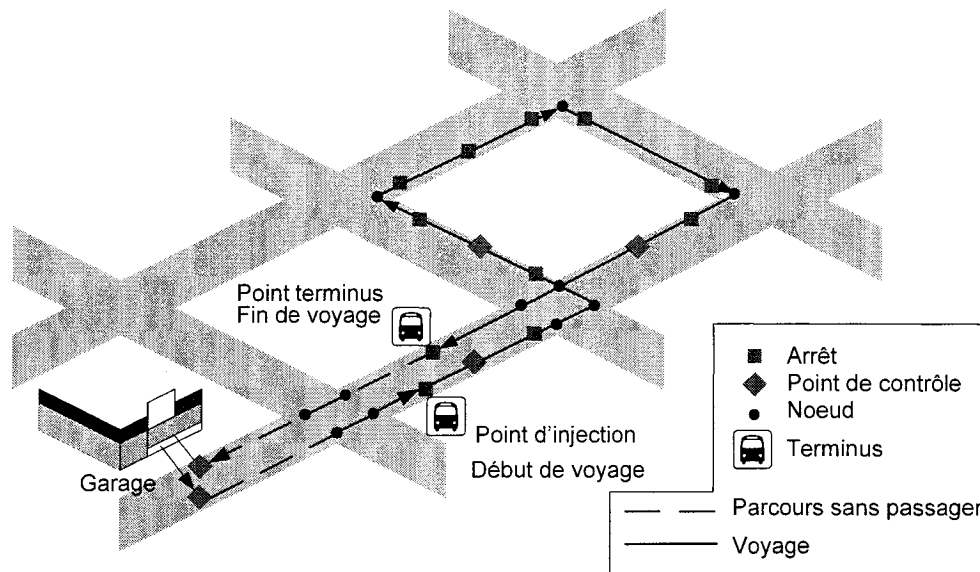


Figure 5.24 Représentation de la tournée et voyage d'autobus

5.3.1 La visualisation de l'objet *Voyage* 1D

Pour l'objet *Voyage*, nous avons examiné deux types de problème, soient le diagramme espace-temps et les représentations des objets à partir des données GPS.

5.3.1.1 Diagramme espace-temps et ponctualité

Le diagramme espace-temps nous permet de combiner les informations géométriques (la distance cumulée parcourue par l'autobus) et les informations temporelles dans un plan 2D (voir la Figure 5.25).

Rapidement, on peut calculer le nombre d'autobus nécessaires pour assurer le service pour une coupe horizontale du diagramme. Notons que le point de croisement des deux droites nous donne l'endroit où les autobus se trouvent à un moment donné.

Par contre, une coupe verticale nous permet de calculer la fréquence durant une période donnée et dans un endroit spécifique.

De plus, quand on superpose les traces qui représentent les voyages planifiés et celles des voyages réalisés réellement par les autobus, on obtient un diagramme qui permet d'analyser la ponctualité du service. Dans la figure suivante, les quatre lignes représentent respectivement les voyages planifiés, les retards de 5 minutes, l'avance de 5 minutes et le voyage réalisé. Par conséquent, le décalage entre la ligne du voyage planifié et celle du voyage réalisé représentera le retard ou l'avance de l'autobus.

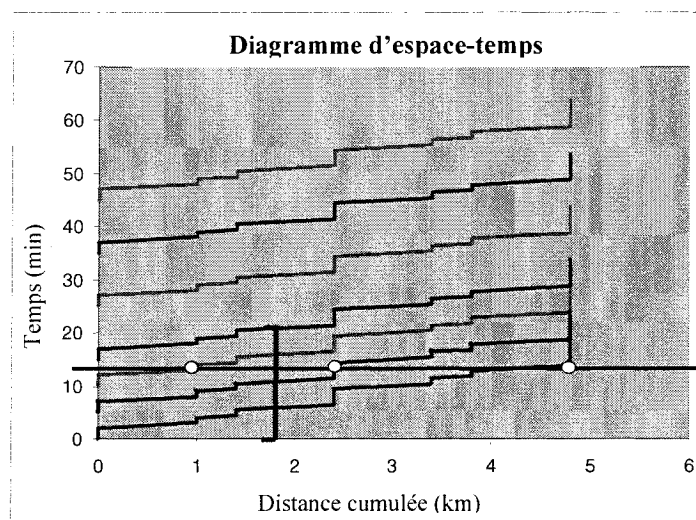


Figure 5.25 Diagramme espace-temps

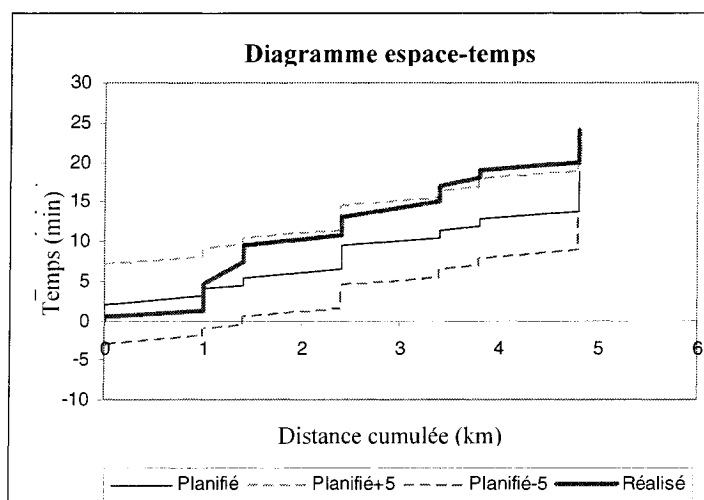


Figure 5.26 Le diagramme espace-temps démontrant la ponctualité d'autobus

5.3.2 La visualisation de l'objet *Voyage* 2D

Étant donné que la visualisation des traces de l'objet *Voyage* est similaire à celle de l'objet *Ligne*, nous accorderons, dans cette section, la priorité à la visualisation des statistiques associées.

Récemment, les appareils GPS (système de positionnement global) sont de plus en plus utilisés dans le secteur des transports. Notamment, pour le transport en commun, les données GPS sont souvent collectées en accompagnement de données de comptage. L'analyse de ces données spatiales temporelles aide à découvrir les situations actuelles sur l'utilisation des ressources de transport, sur l'état de service et sur les comportements des chauffeurs. C'est grâce aux données d'échantillonnage des autobus collectées par la STL que nous avons réalisé les représentations suivantes.

5.3.2.1 La structure des données GPS

La base de données GPS provenant des autobus rassemble généralement souvent en les informations suivantes :

- Les informations sur les positions du véhicule : l'enregistrement de la position du véhicule est souvent déclenché par de multiples événements. Par exemple, il peut être déclenché par les opérations d'autobus (l'ouverture et la fermeture des portes), par les balises virtuelles (quand l'autobus se trouve dans les environs d'un endroit prédéterminé tel que les arrêts, les stations ou les points de contrôle), par les mesures des vitesses (quand la vitesse, l'accélération ou la décélération est inférieure ou supérieure à une valeur donnée pendant une période donnée), etc.

- Les informations sur les passagers d'autobus : par exemple, les montées, descentes, etc. Ces informations sont déjà présentées dans la section 5.2.2.1.
- Les informations opérationnelles : le numéro du parcours, du véhicule, du chauffeur, etc.

5.3.2.2 Conversion de la base de données GPS en *Shapefile*

Pour les visualisations des données ponctuelles, il suffit d'utiliser les processus que nous avons montrés dans la section 5.2.2.1, parce que les données de GPS sont aussi basées sur des points.

Pour les visualisations des données linéaires, une transformation des données ponctuelles en données linéaires est nécessaire.

1. D'abord, on peut identifier le début et la fin de parcours par le champ du numéro de parcours dans la base de données GPS.
2. Ensuite, du premier point au dernier point du parcours, on peut créer une base de données dont chaque enregistrement représente un tronçon défini par les deux points successifs dans la base de données GPS. Les deux points sont localisables par deux paires de coordonnées (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , et en même temps les statistiques peuvent aussi être calculées, comme la vitesse, la charge, etc.
3. Finalement, on peut convertir cette base de données de la même manière que celle présentée dans la section 5.2.2.2.

5.3.2.3 La représentation des événements GPS

Les événements peuvent être représentés par des symboles, tandis que les parcours sont visualisés par des lignes.

Les deux figures suivantes (Figure 5.27 et Figure 5.28) montrent la localisation des événements par les symboles de différentes couleurs et formes.

Dans ces deux figures, on peut identifier les événements suivants :

- le début et la fin du voyage ;
- l'arrêt où l'autobus s'immobilise pour plus de 15 secondes ;
- les montées et descentes de passages ;
- les balises virtuelles prédéfinies.

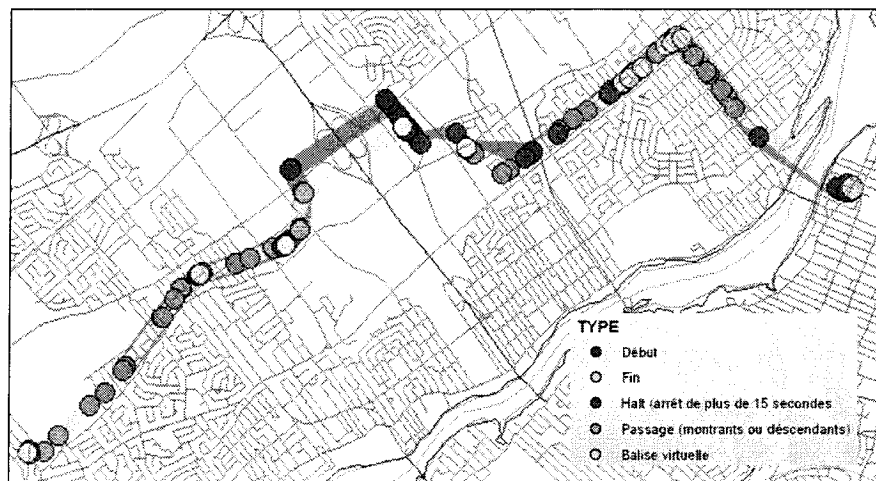


Figure 5.27 Les événements qui déclenchent l'enregistrement des positions dans la base des données de GPS présentés par les couleurs.

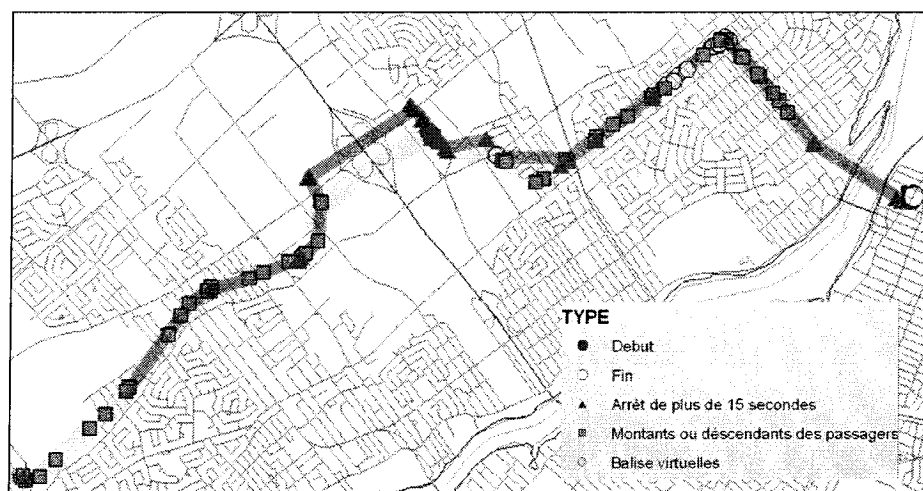


Figure 5.28 Les événements qui déclenchent l'enregistrement des positions dans la base de données de GPS différenciés par les formes des symboles.

5.3.2.4 La représentation des statistiques des voyages

De nombreuses statistiques peuvent être tirées de la base de données des GPS. À partir de ces données temporelles, on peut facilement calculer les indices sur les tronçons et les arrêts. Nous exposons ici quelques visualisations de ces indices.

- Pour les tronçons :
 - les vitesses (Figure 5.29) ;
 - les charges et les capacités (Figure 5.31) ;
 - les passages-km parcourus (Figure 5.32).
- Pour les arrêts :
 - le temps d'immobilisation aux arrêts (Figure 5.30) ;
 - les montées/descentes, (voir les Figure 5.15, Figure 5.16 et Figure 5.17) ;
 - les statuts aux arrêts (en retard/en avance) (voir la Figure 5.33).

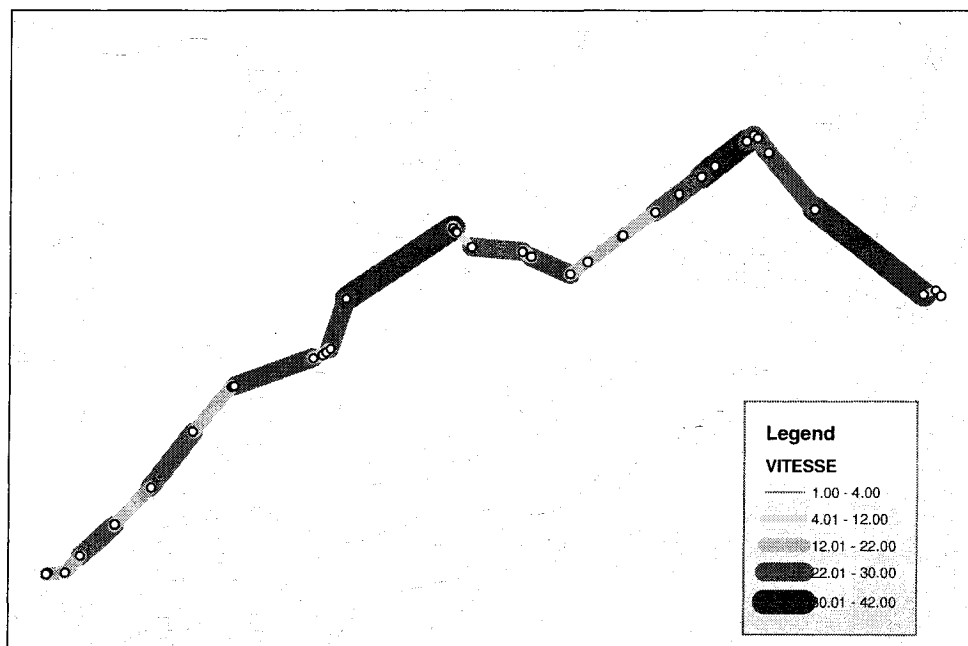


Figure 5.29 La vitesse du véhicule présentée par la largeur des lignes (sens retour).

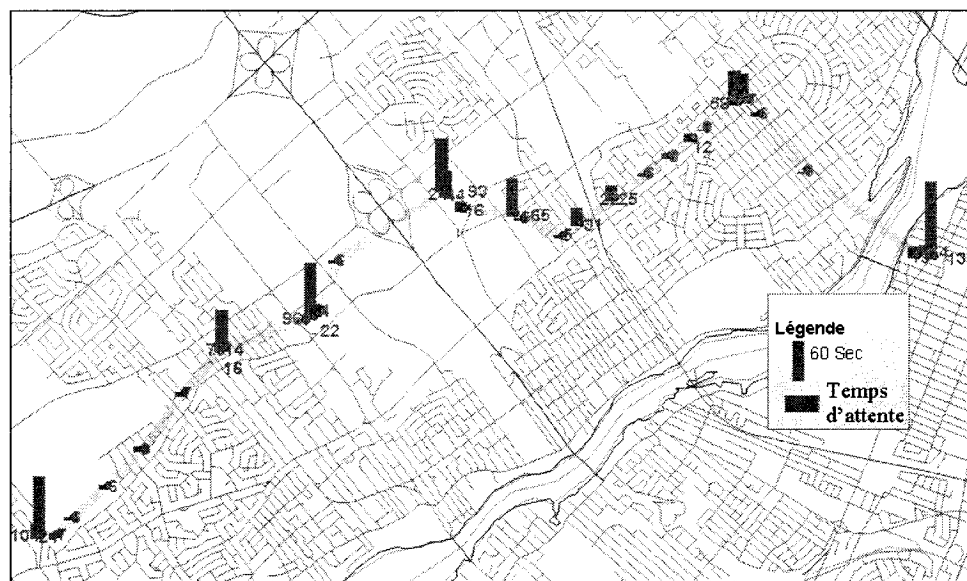


Figure 5.30 Les temps arrêtés aux arrêts (sens retour).

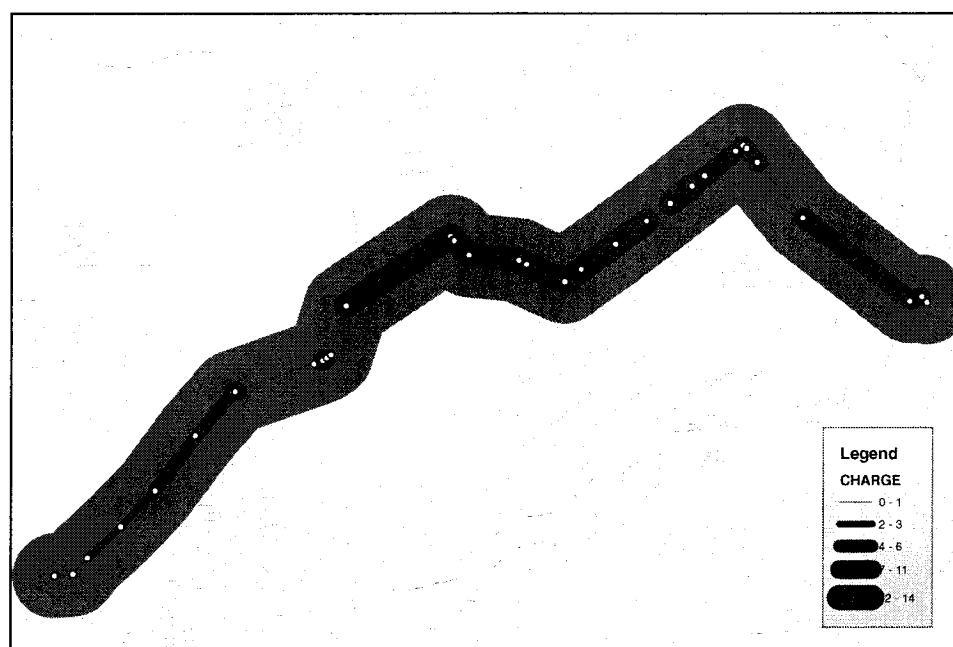


Figure 5.31 Les charges et la capacité d'autobus pour le sens retour. (Rouge – les charges, Vert – la capacité d'autobus).

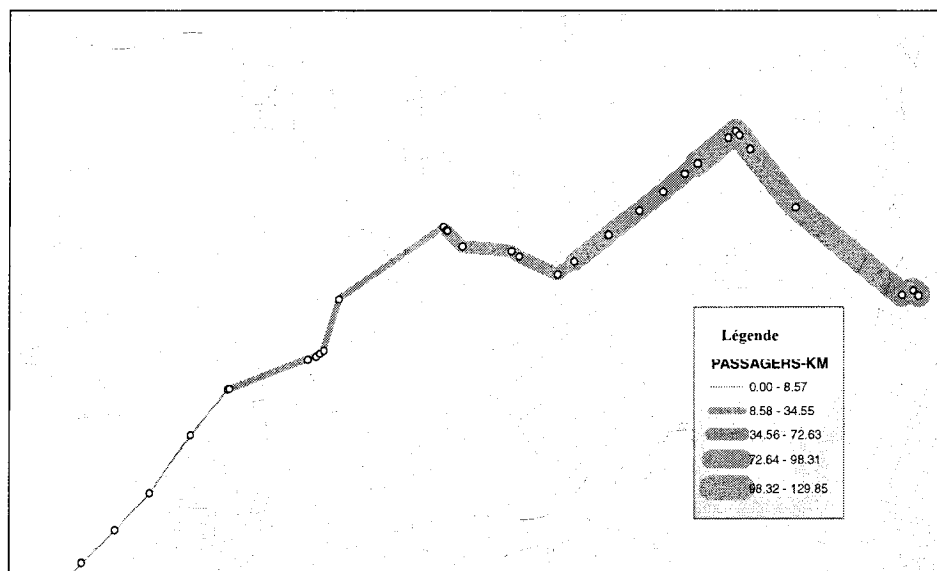


Figure 5.32 Les passagers-km d'autobus.

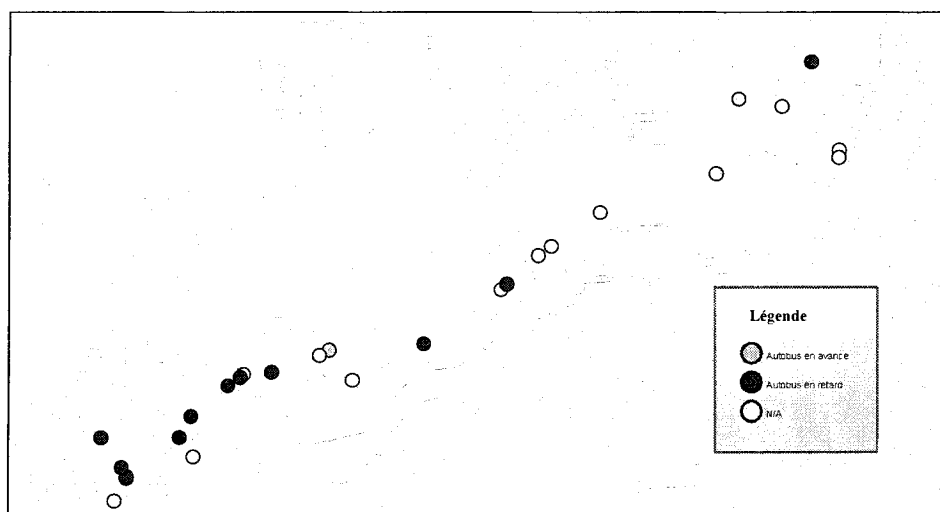


Figure 5.33 Les statuts aux arrêts. (En avance/en retard).

5.3.2.5 Diagramme d'espace-temps 3D et analyse de la ponctualité

Dans un premier temps, à partir de ces données GPS, nous pouvons facilement construire un diagramme espace-temps 3D en transposant la variable de temps à l'axe Z

en plus de réaliser une animation qui montre les mouvements de véhicules. (Voir la Figure 5.34)

Il faut noter que le processus de validation des données est nécessaire avant d'analyser les données brutes des GPS et des appareils de comptage. Puisque notre but est de démontrer quelques exemples de visualisation, nous utilisons les données GPS brutes. Par conséquent, quelques chiffres irréalistes, par exemple les valeurs négatives de charges causées par des erreurs des dispositifs de comptage sont simplement négligées dans la visualisation.

L'avantage de ces visualisations 3D, par rapport à celles en 2D, est qu'elles permettent de séparer les parcours suivant les mêmes chemins, par exemple, les allers et retours qui sont généralement recouverts l'un par l'autre.

Basé sur cette réalisation, nous pouvons également visualiser les autres indices de transport en implantant d'autres variables visuelles.

- La Figure 5.35 montre la trace des autobus et le nombre de personnes montées/descendues à chaque arrêt des autobus dans une seule scène 3D. Dans ce graphique, les montées/descentes sont représentées par les cylindres placés au-dessus et au-dessous de la trace ;
- La Figure 5.36 illustre le nombre de personnes se trouvant dans l'autobus sur chaque tronçon par les rayons des cylindres ;
- La Figure 5.37 illustre le nombre de personnes se trouvant dans l'autobus sur chaque tronçon par les hauteurs de la facette.

L'analyse de la ponctualité des autobus en 3D suit la même méthode que celle en 2D (voir la Figure 5.25).

Dans la Figure 5.38, les bandes vertes et rouges représentent l'intervalle de 10 minutes avant et après l'horaire planifié et les voyages sont présentés par les cylindres colorés.

Ces visualisations 3D sont réalisées avec le logiciel VRMLGen à partir de données de GPS brutes.

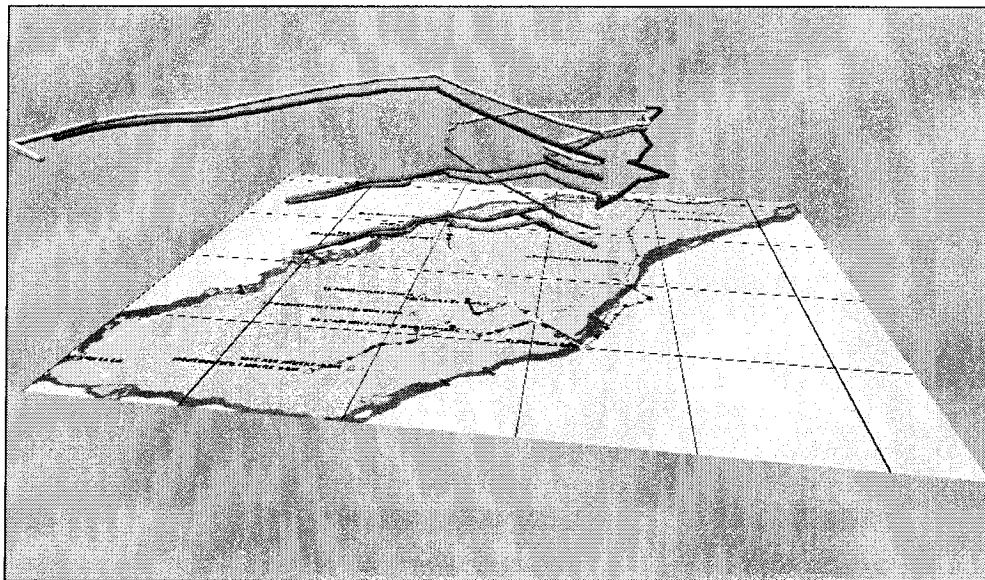


Figure 5.34 L'exemple d'espace-temps en 3D extrait de données GPS d'un autobus.

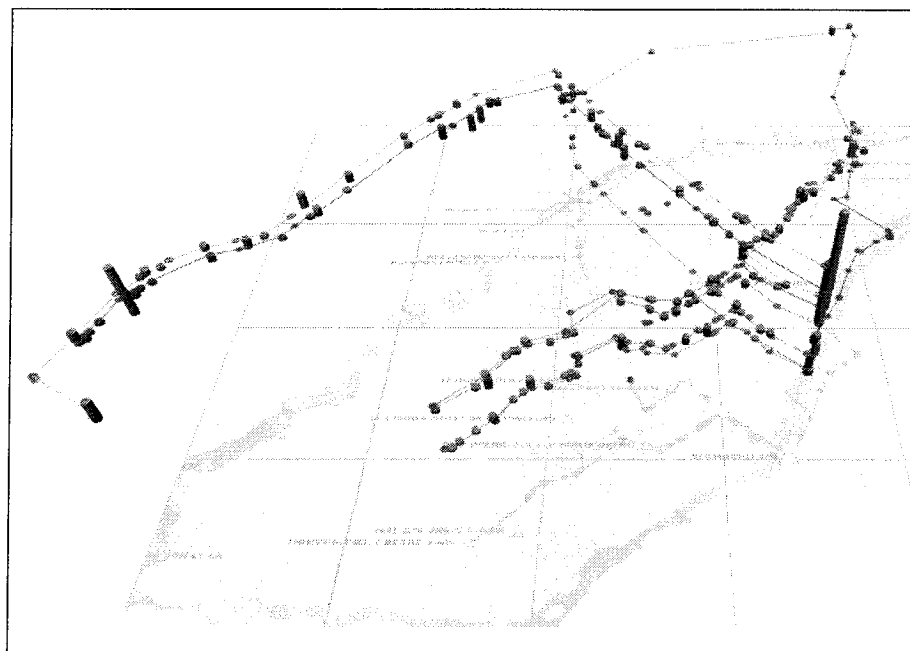


Figure 5.35 La combinaison de la représentation des voyages d'autobus et du nombre de personnes montées/descendues à l'arrêt d'autobus.

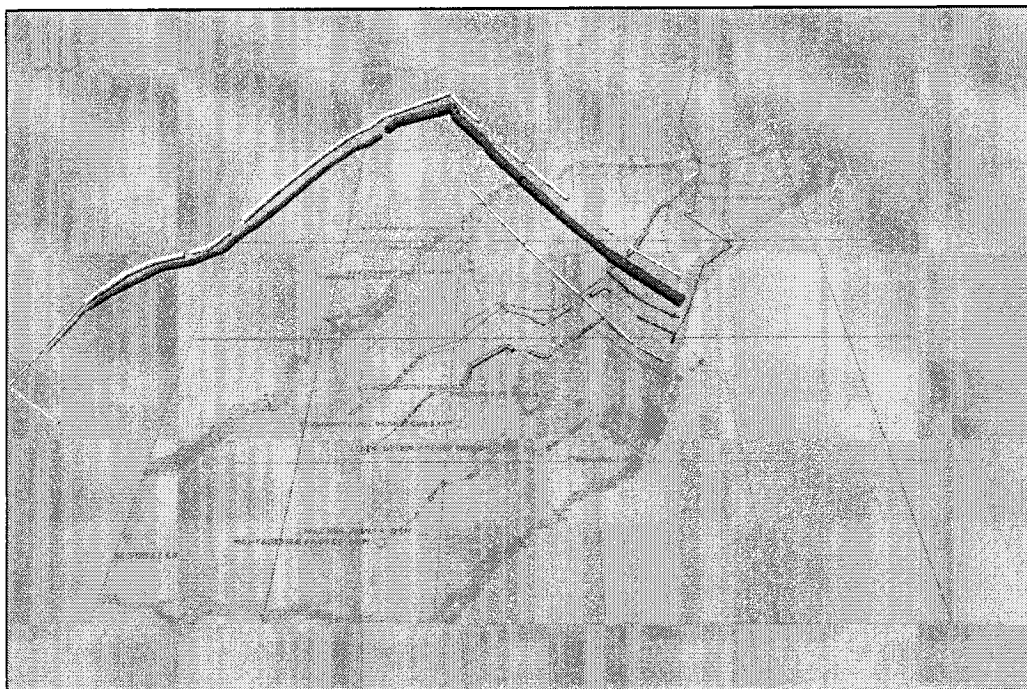


Figure 5.36 La charge d'un autobus : les rayons du cylindre sont en proportion du volume.

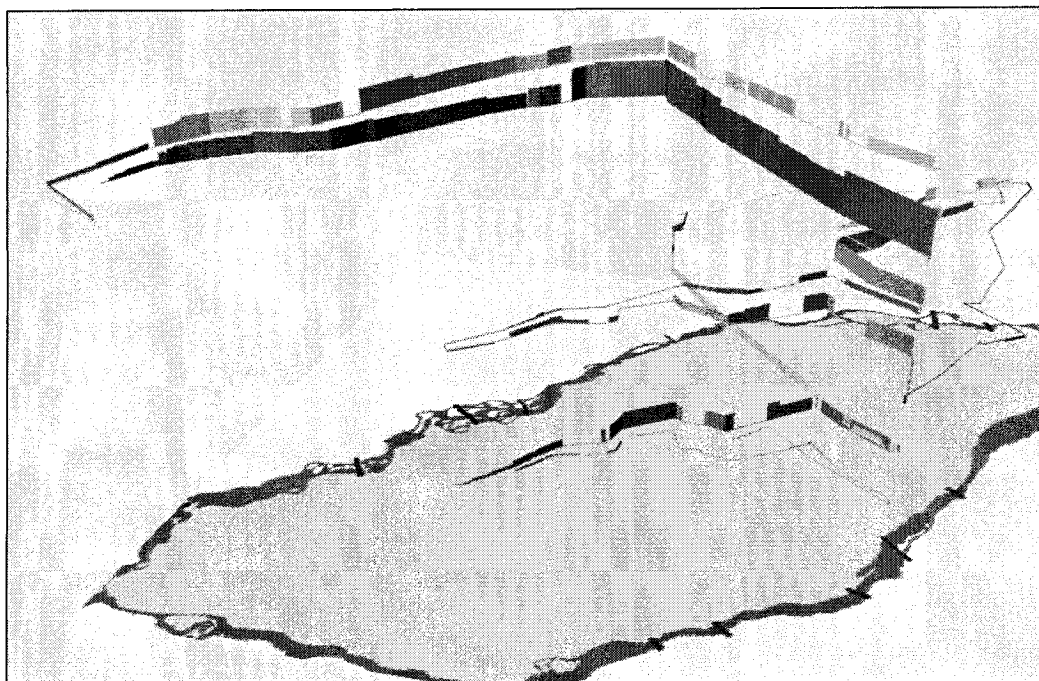


Figure 5.37 La charge d'un autobus : les hauteurs des facettes sont en proportion du volume.

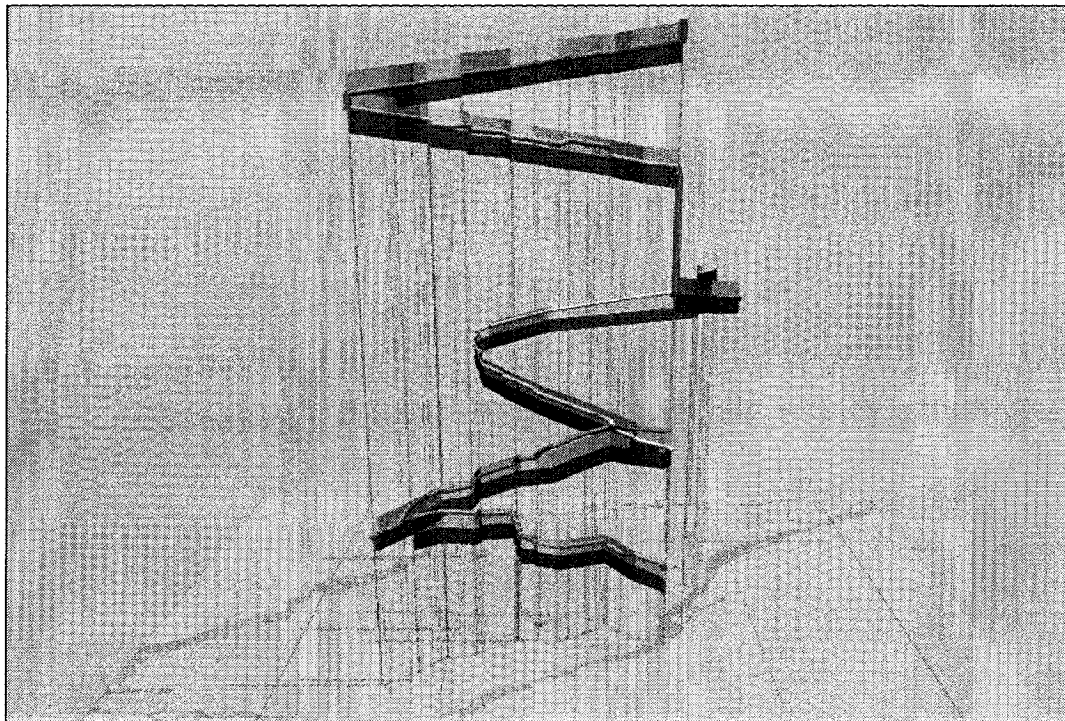


Figure 5.38 L'analyse de la ponctualité des autobus 3D.

5.3.3 La visualisation des véhicules par l'animation

En outre, l'animation est toujours une option intéressante pour présenter les mouvements des véhicules. La perception des mouvements des symboles animés démontre à la fois la position et la vitesse du véhicule.

La Figure 5.39, réalisée à l'aide de l'application VRMLGen, est capturée à partir d'une animation 3D. Neuf parcours sont présentés par des cylindres 3D colorés et les véhicules sont représentés par les sphères.

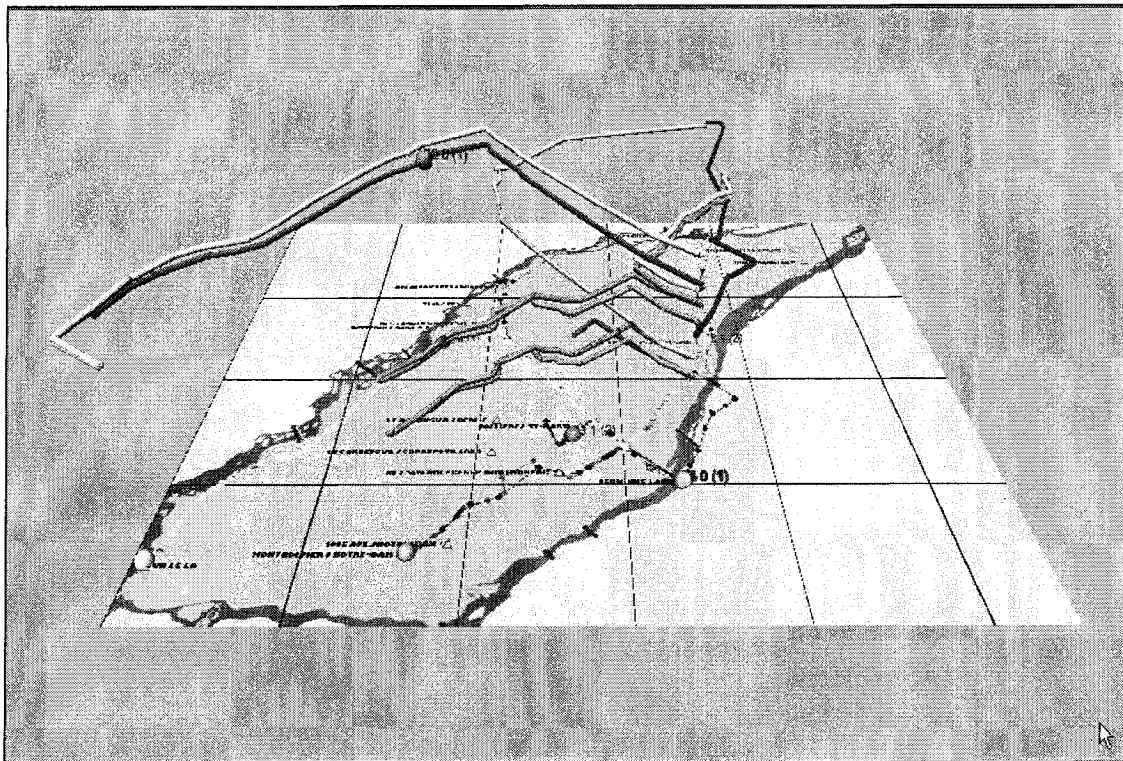


Figure 5.39 L'écran capturé d'une animation d'espace-temps.

Chapitre 6 : Représentation des objets des enquêtes

Origine-Destination

Au sein de l'approche totalement désagrégée orientée-objet, l'enquête Origine-Destination revêt une importance capitale. Cette importance est justifiée d'une part par le fait que l'enquête sert au recueil de données brutes et que les approches méthodologiques subséquentes sont basées sur le traitement, la manipulation et l'analyse de ces données; d'autre part, parce que l'enquête implique les objets les plus importants de la modélisation de la demande, soit la personne, le ménage et le déplacement.

Dans ce chapitre, nous débutons avec un survol des objets enquête Origine-Destination dans le contexte montréalais. Par la suite, nous présenterons des expérimentations par diverses techniques de visualisation.

6.1 Les objets de l'enquête Origine-Destination

6.1.1 Les enquêtes Origine-Destination Montréalaises

Le développement de l'approche totalement désagrégée est indissociable des enquêtes Origine-Destination montréalaises. Depuis 1970, à un intervalle d'environ cinq ans, une enquête téléphonique régionale, assistée en temps réel par des logiciels spécifiquement conçus pour ces enquêtes, regroupe les efforts de plusieurs agences organisatrices de transport de la grande région de Montréal. Ces enquêtes permettent de recueillir des données détaillées sur tous les déplacements effectués par les individus d'un ménage à l'aide d'un échantillon d'environ 5% des ménages. La région couverte par l'enquête de 2003 couvre une surface de 5500 km² comprenant 88 municipalités, représentant 1 580 000 logis, 4 230 000 personnes et 8 100 000 déplacements quotidiens. L'échantillon sondé contenu dans les bases de données brutes de l'enquête 2003 renferme 366 300 déplacements effectués par 169 900 personnes de 71 400 ménages de la grande région de Montréal (Chapleau 2002, Chapleau et al. 2002, CIMTU 2005).

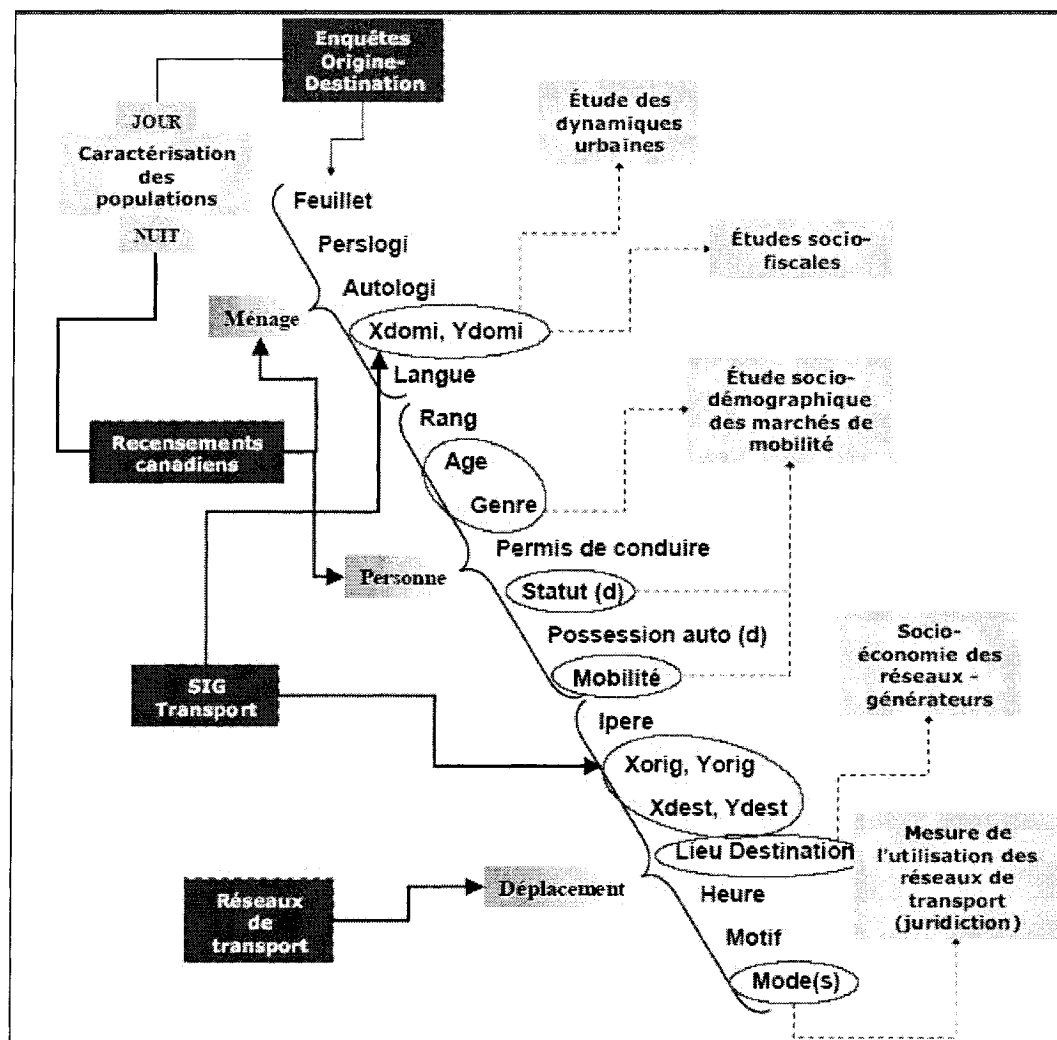


Figure 6.1 Intégration des composantes du système d'information totalement désagrégé. (Chapleau 2003)

Tel qu'illustré par le schéma ci-dessus (Figure 6.1), le spectre des données recueillies par l'enquête couvre les facteurs socio-économiques ainsi que l'utilisation des réseaux de transport. De plus, l'intégration des multiples composantes du système permet de traiter les données de multiples sources et à différents niveaux d'agrégation, y compris les données de recensements canadiens, les données sur les réseaux de transport, les données sur l'emploi, etc. Ce qui permet d'analyser les questions sous différentes

perspectives, comme les relations entre les facteurs socio-économiques, les réseaux de transport, la mobilité de personnes, etc.

6.1.2 Les objets de l'enquête Origine-Destination

Tel que mentionné et documenté par Trépanier (1999), l'enquête Origine-Destination est composée de trois objets essentiels provenant de l'approche totalement désagrégée : le ménage, la personne et le déplacement.

6.1.2.1 **L'objet *Ménage***

L'objet dynamique *Ménage* correspond à un regroupement de personnes ayant effectué ou non des déplacements.

Les propriétés individuelles du ménage sont (Trépanier 1999) :

- Les propriétés d'identification. *«Le numéro de feuillet est un identifiant unique du ménage dans l'enquête.»*
- Les propriétés socio-démographiques. *«La taille du ménage, le nombre de véhicules du ménage, le revenu annuel et toute autre variable de recensement liée à la famille ou au foyer.»*
- 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 tels que les secteurs d'énumération, les quartiers, les secteurs municipaux, les régions, etc. »*

6.1.2.2 L'objet *Personne*

L'objet *Personne* désigne un individu du ménage susceptible ou non d'effectuer des déplacements au cours d'une journée. Ses propriétés individuelles sont (Trépanier 1999):

- 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), soit 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. »*

6.1.2.3 L'objet *Déplacement*

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 de l'objet *Déplacement* sont (Trépanier 1999):

- 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 ou le passage par un pont sont des propriétés dites opérationnelles qui caractérisent la façon de se déplacer.»*

Voilà qui conclut le survol des objets rattachés à notre expérimentation.

6.1.3 Description des données

Tel que démontré dans la section précédente, les enquêtes Origine-Destination forment la partie la plus importante dans l'approche totalement désagrégée orientée-objet. Donc dans cette section, nous effectuerons les expérimentations avec les résultats de l'enquête de 1998.

Les représentations sont organisées en deux parties selon les caractères des informations. Dans un premier temps, une base de données de 18,543 enregistrements est tirée de la grande base de données obtenue directement de l'enquête 1998 et qui contient environ 60,000 ménages.

Dans un second temps, les représentations sont réalisées avec les résultats des traitements des données d'enquête, dans le cadre de l'approche totalement désagrégée. Ces traitements incluent l'agrégation des données à différents niveaux, l'intégration des données de recensement ainsi que les traitements-fonctionnalité de données. Parmi les résultats, nous sommes très intéressés par les matrices Origine-Destination (Chapleau 2002).

6.2 Présentation des propriétés non spatiales des objets

Les propriétés de la classification et les propriétés socio-démographiques sont des propriétés non spatiales. Un des points de départ pour analyser ces informations est de connaître la distribution statistique de la variable.

1. Pour les propriétés qualitatives comme les classifications, aucune opération mathématique n'est possible sur les modalités. On peut cependant raisonner

quantitativement sur l'importance de chacune de ces modalités dans l'ensemble observé.

Pour cette fin, le diagramme en bâtons (diagramme en barres, diagramme en tuyaux d'orgue) est le type de diagramme le plus fréquent. Il est conçu d'après le tableau de dénombrement, qui comporte dans sa première colonne la liste de modalités du caractère qualitatif et dans sa deuxième colonne les nombres d'éléments qui correspondent à chacune d'elles. Ce processus peut être facilement réalisé à l'aide de la fonction de tableau croisé dynamique d'Excel.

Une autre représentation très employée est le diagramme circulaire à secteurs (pie chart). Aussi connu sous le nom de « camembert », il affecte à chaque modalité un secteur de cercle dont la surface est proportionnelle aux nombres d'éléments correspondant à chacune d'elles (effectifs). Son avantage est qu'elle permet de mieux représenter les séries en pourcentage. Son principal inconvénient est que par rapport au diagramme en barres, elle perd de l'efficacité visuelle quand le nombre de modalités augmente. Cependant, le seuil dépend de la forme, de la distribution et de la taille du cercle.

2. Pour les propriétés quantitatives, on peut aussi employer le diagramme de barre ou l'histogramme avec les données quantitatives groupées en classes.

6.2.1 Présentation de la composition du ménage univariée

Tel que montré dans la Figure 6.1, les propriétés incluent Feuil – l'identificateur du ménage, perslogi – nombre des personnes associées au ménage, autologi – nombre d'auto, xdomi, ydomi- coordonnées du ménage et langue de l'entrevue téléphonique.

Après un traitement d'agrégation de la base de données, les figures suivantes montrent la forme de la distribution des ménages selon les trois séries, autologi, perslogi, et langage.

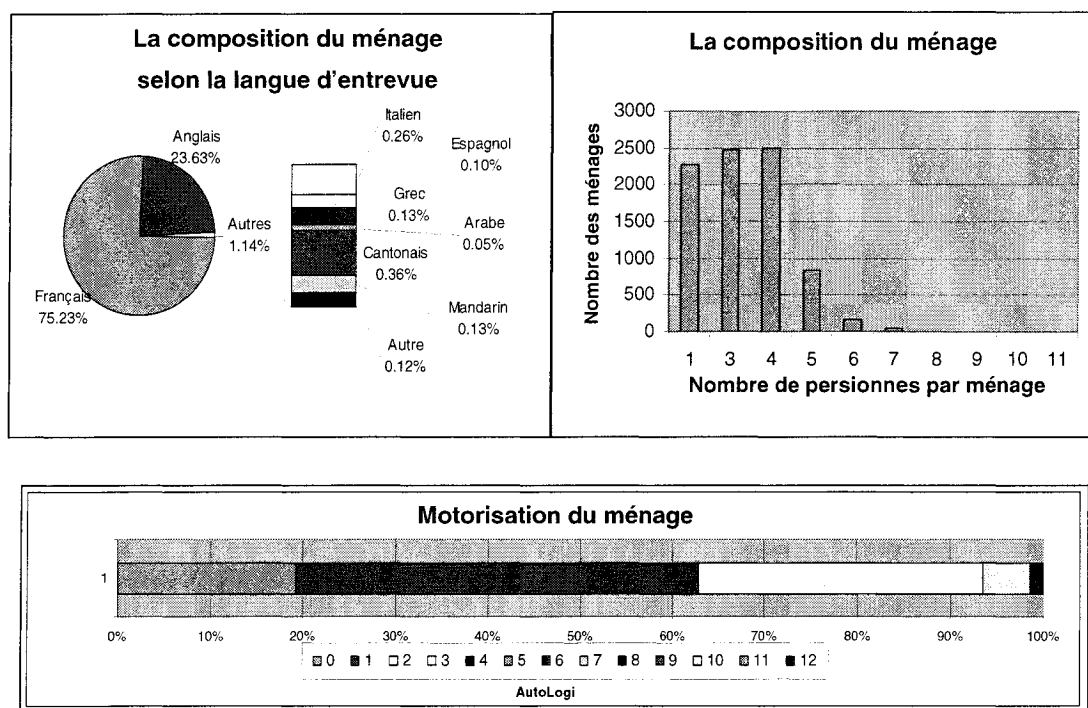


Figure 6.2 La distribution du ménage présentée par le diagramme de barre, le diagramme circulaire et le diagramme de barres empilées en 100%.

6.2.2 Présentation multivariée de la composition du ménage

Les visualisations multivariées de la composition du ménage nous permettent de révéler certaines relations entre les variables. Si les variables impliquées sont des variables nominales ou ordinales, il est possible d'analyser ces distributions par des tableaux de contingence. Ce type de tableau permet de montrer la distribution de chaque modalité de chaque variable par un processus de dénombrement. Pour les tableaux de deux variables, on peut simplement utiliser les diagrammes de barre pour les visualiser. Cependant, pour les tableaux impliquant plus que deux variables, le problème touche un des sujets de la visualisation d'information, soit la représentation des données hiérarchiques. De ce fait, dans cette section, nous présenterons les expérimentations sur ces deux types de questions avec les données de ménages.

6.2.2.1 Présentation bivariée du tableau de contingence

Pour représenter la distribution d'un phénomène selon deux variables, il faut d'abord construire un tableau de contingence. Dans ce type de tableau, tel qu'illustré dans le tableau suivant, les lignes et les colonnes sont des modalités d'un caractère qualitatif ou les classes d'un caractère quantitatif. Donc, toutes les valeurs sont des fréquences et les sommes en ligne comme les sommes en colonne ont une signification.

Lorsque les valeurs du tableau de contingence sont comparables, on peut transposer une variable visuelle à ces valeurs. Dans la Figure 6.3, chaque valeur est représentée par un cercle dont la surface est proportionnelle aux quantités.

Tableau 6.1 Tableau de contingence des deux variables Autologi et Perslogi.

	AUTOLOGI											
PERSLOGI	0	1	2	3	4	5	6	8	10	11	14	Total
1	1128	1089	52	4								2273
3	287	1044	920	208	11	3	1				2	2476
4	128	933	1098	248	70	6	1	1				2485
5	45	272	369	86	34	12	2		1	1		822
6	11	60	70	23	5	1						170
7	3	12	17	4	4							40
8	1		4		1							6
9	1	2	6	1								10
10		1										1
11					1							1
Total	1604	3413	2536	574	126	22	4	1	1	1	2	8284

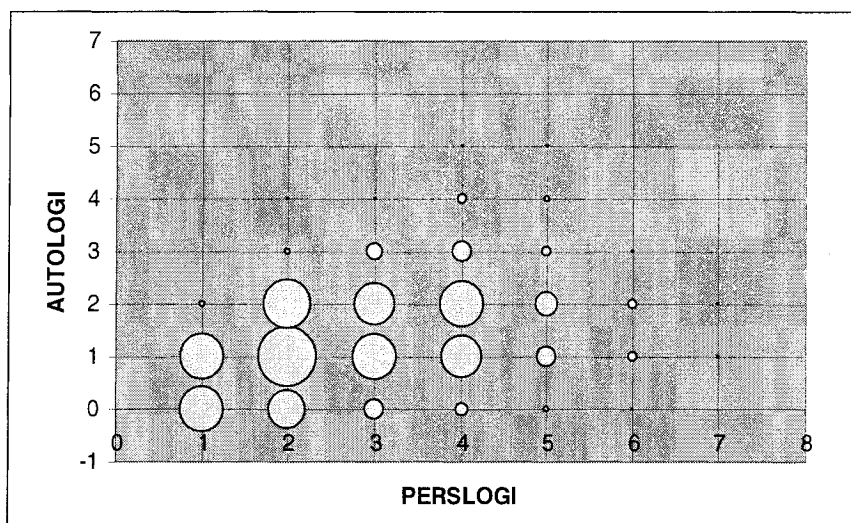


Figure 6.3 Visualisation du tableau de contingence avec la taille.

Évidemment, on peut également utiliser la variable couleur dans ce type de représentation. L'avantage d'utiliser la couleur est qu'elle permet de visualiser les petites valeurs qui, si on utilisait la taille, seraient difficilement perçues.

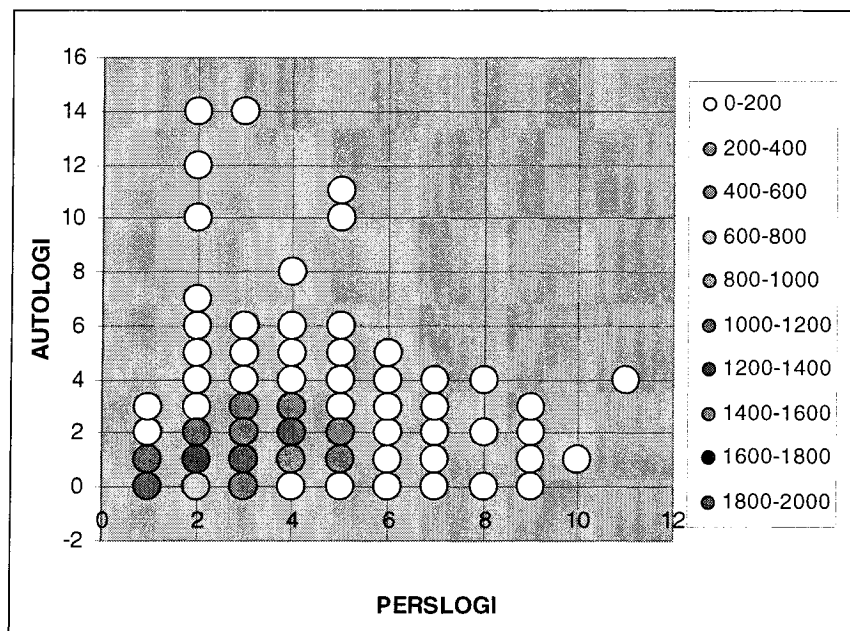


Figure 6.4 Visualisation du tableau de contingence avec la couleur.

Pour les représentations de la distribution statistique multivariée, on peut considérer les variables soit comme de nouvelles dimensions, soit comme des données structurées en forme hiérarchique.

6.2.2.2 Présentation hiérarchique du tableau de contingence

Pour les tableaux comportant plus de trois variables, la représentation hiérarchique est une alternative très intéressante. Il y a deux types de représentations des structures hiérarchiques soit les représentations par un arbre, ou les représentations par surfaces divisées selon les groupes.

6.2.2.2.1 Représentation des structures hiérarchiques par l'arbre

L'avantage d'un arbre est qu'il représente le plus intuitivement la hiérarchie et la structure.

	A	B	C	D	E	F
1						
2						
3	Nombre de FEUILLET		PERSLOGI			
4	AUTOLOGI	LANGUE	1	2	3	4
5		0	1	799	510	193
6			2	316	206	86
7			3		3	1
8			4	2	1	1
9			5	3	1	1
10			6		1	
11			7	2	5	1
12			8	1	3	2
13			9	2		2
14	Total 0			1126	730	287
15		1	1	854	1502	774
16			2	231	382	252
17			3	1	3	7
18			4		3	
19			5		1	
20			6	1	1	
21			7		3	
22			8		1	
23			9	2		
24	Total 1			1088		
25		2	1	32		
26			2			
			3			

Figure 6.5 Tableau de contingence de trois variables autologi, langue et perslogi.

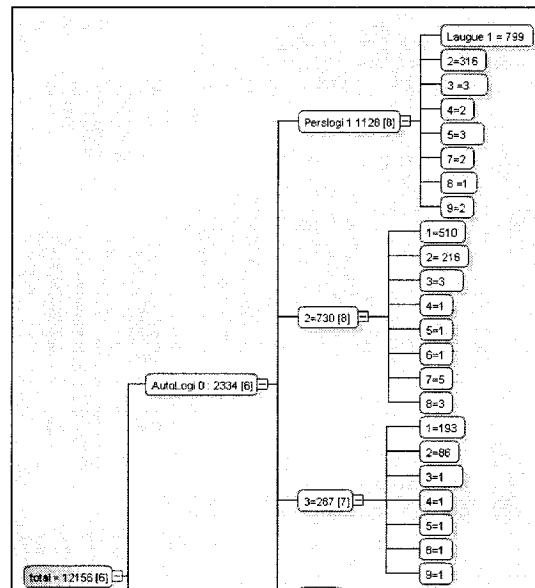


Figure 6.6 Visualisation du tableau de contingence avec l'arbre conventionnel.

Tel que montrée dans la Figure 6.7, on peut aussi faire varier la taille de chaque bloc en proportion de sa valeur.

Cependant, ce type de représentation de l'arbre avec la racine qui se subdivise pose le problème de perte d'espace. Cette perte est inacceptable dans le contexte de la visualisation de grands ensembles de données. Par conséquent, certaines variations d'arbre conventionnel sont élaborées pour contourner ce problème. À cet effet, deux approches coexistent:

- une approche est d'utiliser la visualisation multidimensionnelle. Les arbres 3D ou 4D sont adoptés ; par exemple, les « *cone tree* » et les « *dome tree* » (George et al. 1991) utilisent le 3D pour ajouter les espaces disponibles ;
- une autre cherche les méthodes d'optimisation de la configuration spatiale d'objets graphiques dans l'espace 2D. Par exemple, les dispositions « *hyperbolic tree* » utilisent les lignes hyperboliques à la place des lignes droites.

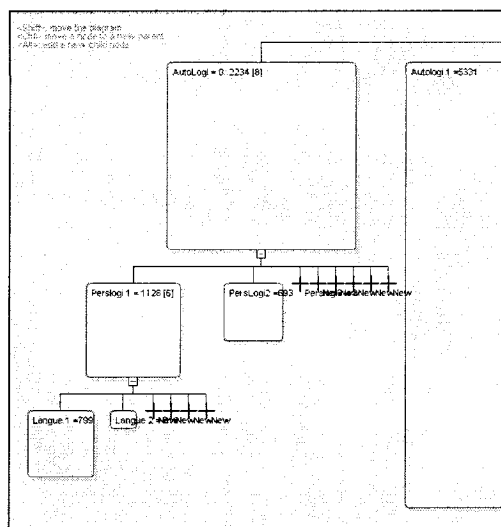


Figure 6.7 Représentation du tableau de contingence avec la taille.

6.2.2.2.2 Représentation des structures hiérarchiques par surface

La solution par surface est d'utiliser l'aire de la surface pour représenter les nombres de chaque modalité. La méthode a été suggérée par l'algorithme du *Treemap*. Cet algorithme a été conçu à l'origine pour représenter la structure des disques durs (hiérarchie de répertoires) (Johnson et Shneiderman.B 1991). L'idée principale du *Treemap* est de représenter la racine comme un grand rectangle utilisant tout l'écran et de le subdiviser verticalement en fonction de ses enfants.

Cette approche présente plusieurs avantages. Elle permet de visualiser en une seule fois l'arbre hiérarchique possédant un grand nombre de branches ainsi qu'un grand nombre de noeuds. De plus, Johnson et Shneiderman a établi que des utilisateurs novices sont capables de comprendre rapidement (10-15 minutes) la représentation.

La Figure 6.8 illustre une structure hiérarchique de trois variables, soient la langue, perslogi et autologi. Chaque pixel représente un ménage et sa couleur représente la distance entre le secteur auquel il appartient et le centre-ville. Plus il est vert, plus il est éloigné du centre-ville. En même temps, les pixels sont regroupés successivement selon les variables autologi, perslogi et la langue. Avec ce graphique, on peut observer rapidement certaines caractéristiques des variables. Par exemples, le rectangle indiqué

par la flèche jaune inclut des ménages qui parlent la langue française (langue = 1), où il y a 2 personnes dans le ménage (perslogi=2) et qui ne possèdent pas d'auto (autologi = 0). Parce que les pixels rouges occupent la majorité du rectangle, ceci indique que les ménages sont plutôt situés dans les secteurs proches du centre-ville.

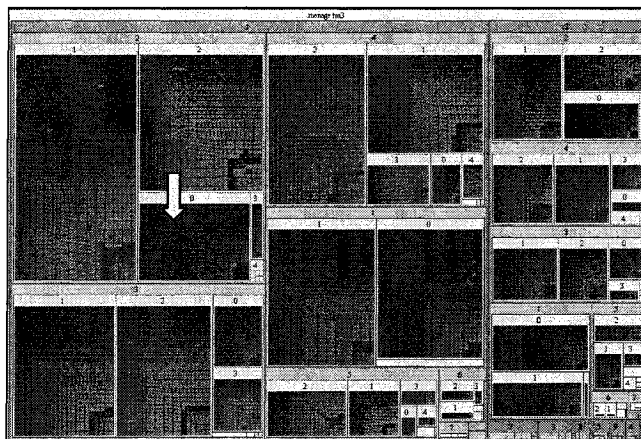


Figure 6.8 Représentation du diagramme TreeMap de la composition du ménage. (Sur l'ordre langue – personnes par ménage - auto par ménage)

6.2.3 Visualisation des relations entre les propriétés socio-démographiques

Dans cette section, les exemples sont réalisés avec les objets personnes d'enquête. Parmi les informations collectées pendant l'enquête, on choisit cinq variables les plus intéressantes, soit âge, genre, permis, statut et mobilité.

Tel que démontré précédemment, les visualisations avec l'histogramme et le tableau de contingence nous permettent d'avoir une idée globale de la distribution statistique des variables. Mais il existe des manières de visualiser directement tous les enregistrements dans un graphique afin de trouver les tendances, les sous-ensembles et les relations entre les variables (voir Figure 6.9).

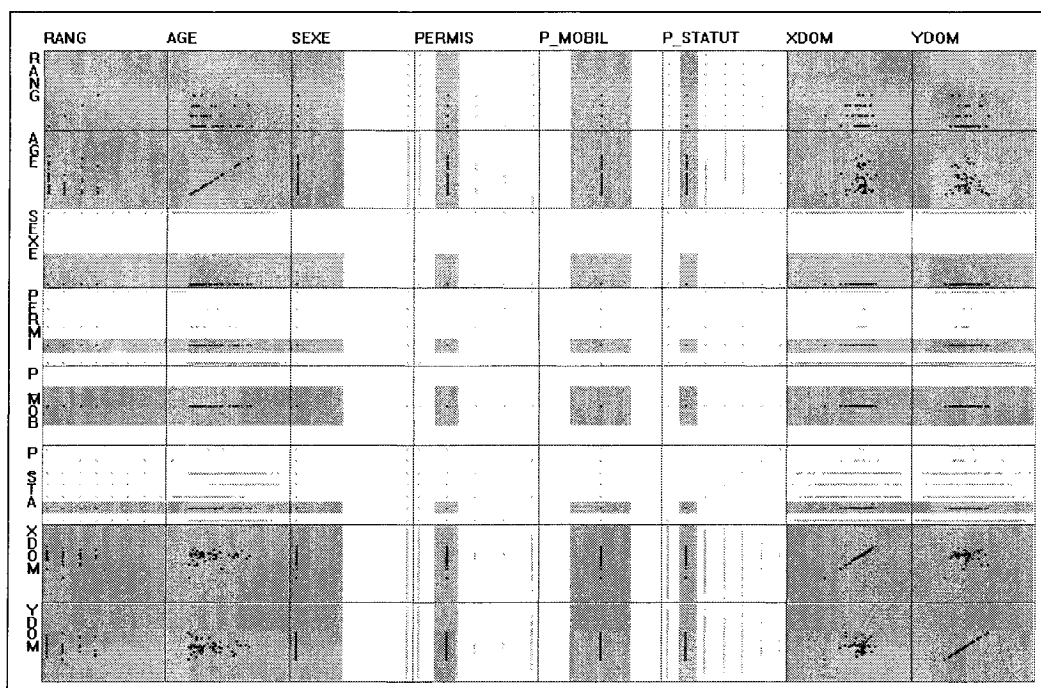


Figure 6.9 Les graphiques de nuage de point.

Pour révéler les relations entre les variables, la méthode la plus simple serait de tracer les points dans un plan cartésien. Présentement, les logiciels conçus pour KDD (Knowledge Discovery in Database) permettent aux usagers de sélectionner dynamiquement dans tous les $n \times n$ graphiques de n variables. La Figure 6.9 est une image de la capture d'écran du logiciel XmdvTools dans laquelle les points rouges sont des points sélectionnés à l'aide de multiples critères suivants : l'homme qui travaille à temps partiel, qui n'a pas de permis de conduite.

Une autre solution est la visualisation de « *Parallel coordinate* » (Inselberg 1985). Ce type de graphique est une méthode très efficace pour la visualisation des relations entre les variables. La réalisation est très simple : les axes des variables sont placés parallèlement et les enregistrements sont présentés avec des lignes tracées entre les axes. Aujourd'hui, avec les ordinateurs, les usagers sont capables d'extraire dynamiquement une partie de l'ensemble des enregistrements selon certains critères.

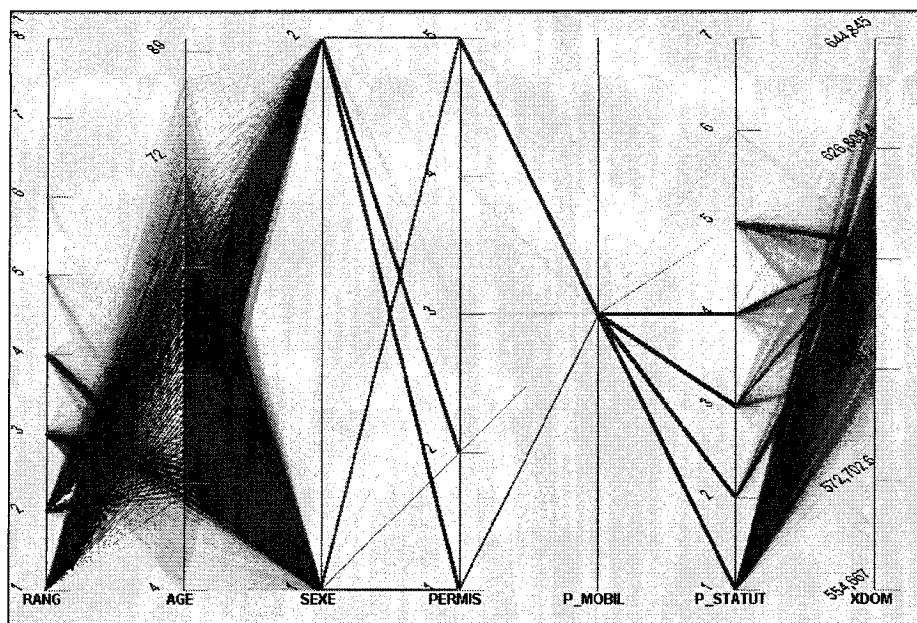


Figure 6.10 Diagramme de « Parallel coordinate » réalisé par logiciel ILOG.¹⁶

6.3 La visualisation des propriétés pseudo-géométriques du ménage

Ici on propose deux types de représentation. D'abord la représentation des localisations de chaque ménage par un symbole ponctuel; ensuite, on présente les résultats suivant le traitement de l'agrégation.

6.3.1 La représentation des localisations des phénomènes - Nuage des points 2D

Puisque les ménages peuvent être localisés par une paire de coordonnées, cela nous permet de réaliser une représentation de nuage de points afin de montrer directement la distribution spatiale. Vu que la taille de la base de données est très grande, l'utilisation

¹⁶ Logiciel ILOG, Télécharger : <http://www.ilog.com/> dernier accès : 2005-07-15

des variables visuelles telles la forme, la taille, l'orientation, la texture et la transparence n'est pas une solution réalisable à cause de la limite imposée par la puissance des ordinateurs et la capacité de la perception de l'homme. Donc il nous reste deux variables, soit la couleur et la position.

Dans la cartographie 2D, le nuage de points est très fréquent. Il est réalisé en représentant pour chaque observation un petit point dans un plan 2D. Donc, la distribution de points peut révéler une certaine tendance spatiale.

La Figure 6.11 illustre la distribution spatiale des ménages ayant une personne qui effectue un déplacement vers le centre-ville. La couleur représente la langue parlée à domicile. On observe rapidement une concentration des anglophones dans l'ouest de l'île.

Cependant, un des problèmes de la carte nuage de points est qu'elle est difficile d'emploi avec des données très denses. Parce que dans ce cas, les points sont couverts les uns par les autres. La solution souvent utilisée est de découper l'espace en secteurs ou d'utiliser les fonctions de « Zoom », c'est-à-dire, donner à l'utilisateur la possibilité de choisir la partie à visualiser et de changer l'échelle de la carte selon ses besoins.

6.3.2 Nuage de points en 3D

Le nuage de points en 3D nous permet de visualiser à la fois la localisation des ménages et une autre série de données.

Dans la Figure 6.12, les coordonnées X et Y des points sont ceux des ménages auxquels les personnes appartiennent. La coordonnée Z correspond à l'âge de personne multiplié par 100. La couleur est segmentée en 8 classes.

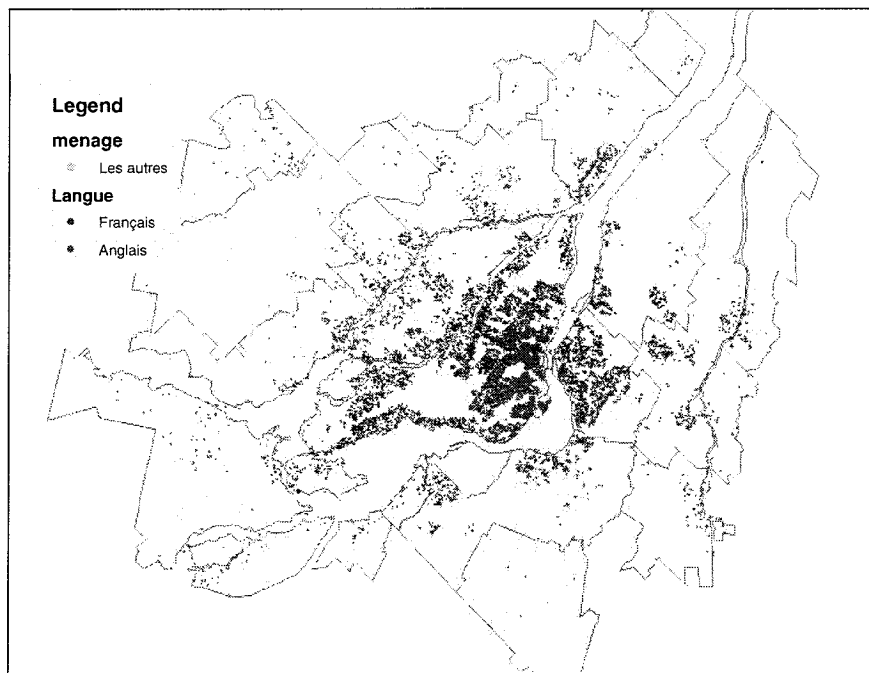


Figure 6.11 La représentation de nuage de points des ménages.

Cette technique peut être également appliquée aux données nominales ou ordonnées. Dans ce cas, les multiples couches de nuage de points sont placées à différents niveaux d'élévations.

Toutefois, l'établissement d'une image mentale de ces points avec leur emplacement 3D est difficile sinon impossible avec une image statique de nuage de points 3D à cause de sa petite taille. Dans ce cas, le seul moyen qui nous permet de discriminer l'emplacement de ces points est d'utiliser le point de vue dynamique par lequel nous percevrons la position relative de ces points pour comparer les différences entre les images obtenues de différents points de vue.

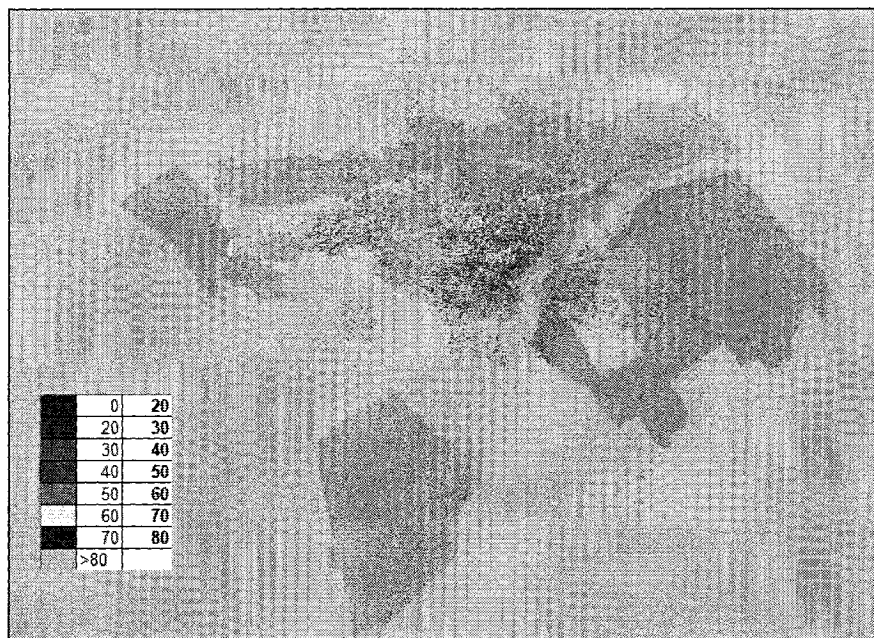


Figure 6.12 La représentation du type nuage de points 3D.

6.3.3 La visualisation des données en surface

Les processus comme le calcul de densité et l'agrégation nous permettent de transformer les informations discrètes en informations continues, c'est-à-dire en surface.

Trois types de format sont fréquents pour représenter les informations de surface :

- Le format de structure matricielle. La surface est coupée par les grilles, et pour chaque cellule, une valeur est associée;
- Le format vectoriel. La surface est coupée en polygones, et pour chaque polygone une valeur est associée;

- Le format MNT¹⁷. C'est-à-dire par un réseau irrégulier de triangles.

Les données surfaces peuvent être visualisées avec une des méthodes suivantes :

- En 2D,
 - Les cartes matricielles. Les valeurs portées par les cellules sont interpolées aux couleurs - Figure 6.13, Figure 6.14;
 - Les cartes de contour (isoligne). Les lignes de contour sont obtenues par les méthodes de quadrillage des données x y z ayant les espaces irréguliers (*irregular space*). - Figure 6.15.
- En 3D,
 - Les polylignes 3D. L'élévation ou les largeurs de polyligne varie selon les valeurs - Figure 6.16 et Figure 6.17;
 - Les polygones 3D. L'élévation de polygone varie selon les valeurs - Figure 6.18;
 - Les surfaces 3D. Les surfaces sont construites par un processus d'interpolation - Figure 6.19.

Nous présentons dans les prochains paragraphes des exemples de ces visualisations avec la densité de ménages qu'on a présentée dans la dernière section.

¹⁷ MNT est une représentation numérique du terrain en terme d'altitude. Il fournit des renseignements non seulement sur les formes du relief mais également sur leur position. Un MNT peut être relié à un ou plusieurs systèmes de coordonnées.

6.3.3.1 La visualisation des données en surface en 2D

Sur la forme 2D, la densité est souvent représentée par une carte dont les pixels sont colorés selon la valeur. La Figure 6.13 illustre la densité de ménage.

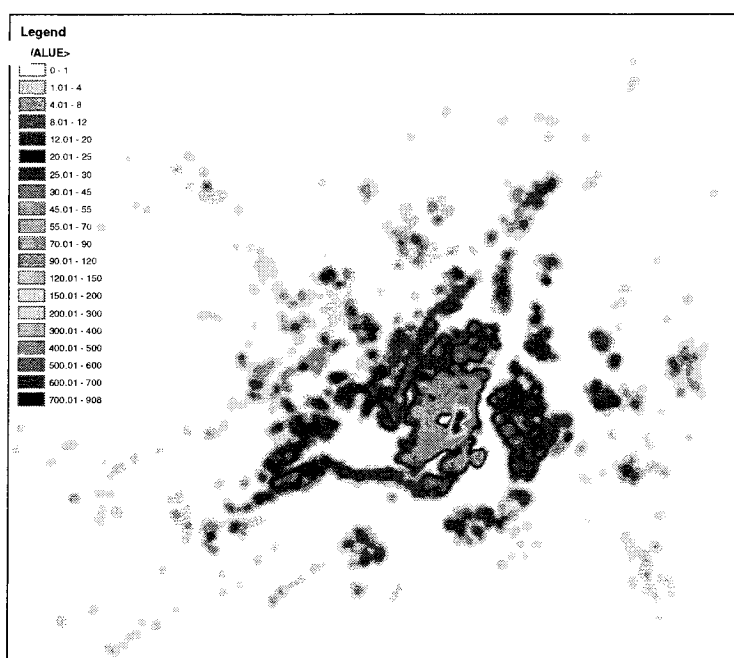


Figure 6.13 La carte de densité de ménage calculée avec la méthode des noyaux.

Outre la couleur, la transparence peut aussi être utilisée dans les cartes de densité. L'avantage d'utiliser la transparence est qu'elle permet de visualiser la carte référence en même temps (Voir Figure 6.14).

6.3.3.2 La visualisation des données en surface en 2D

Les cartes de densités sont une visualisation puissante, efficace et facile à comprendre. Cependant, la variable de couleur n'est pas très adaptée à la représentation des valeurs quantitatives. Pour mieux représenter ces informations, une des solutions est d'utiliser les représentations 3D (Figure 6.18 et Figure 6.19).

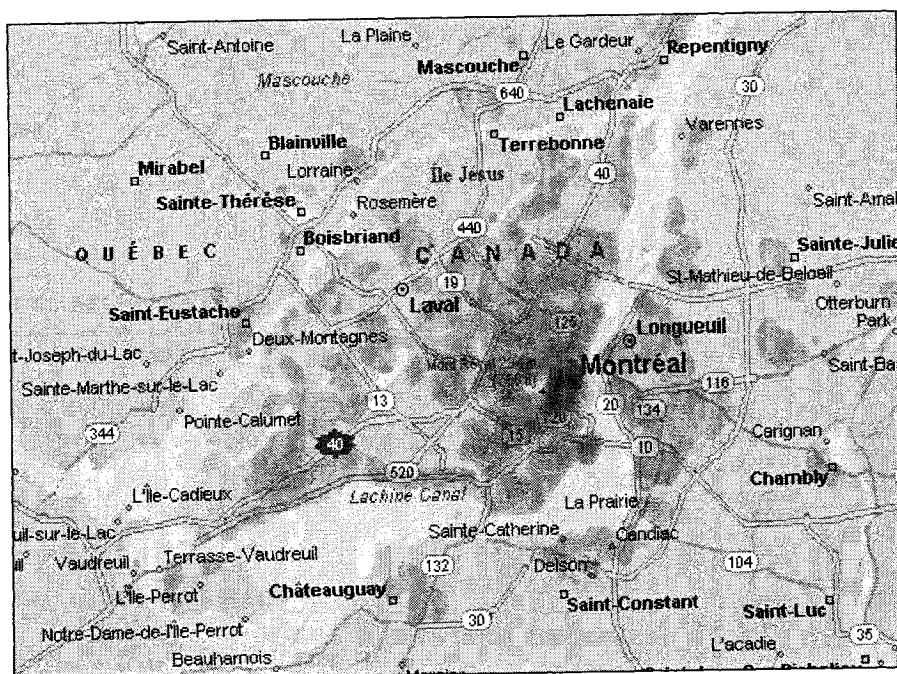


Figure 6.14 L'utilisation de la transparence dans la carte densité ménage d'enquête.

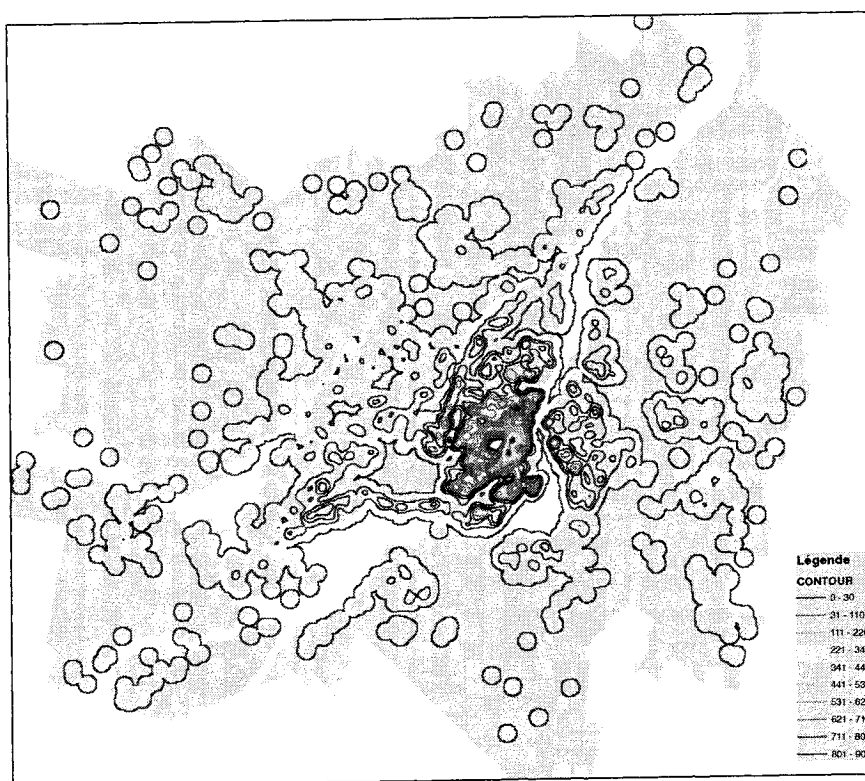


Figure 6.15 Représentation de la densité par les contours de la densité.

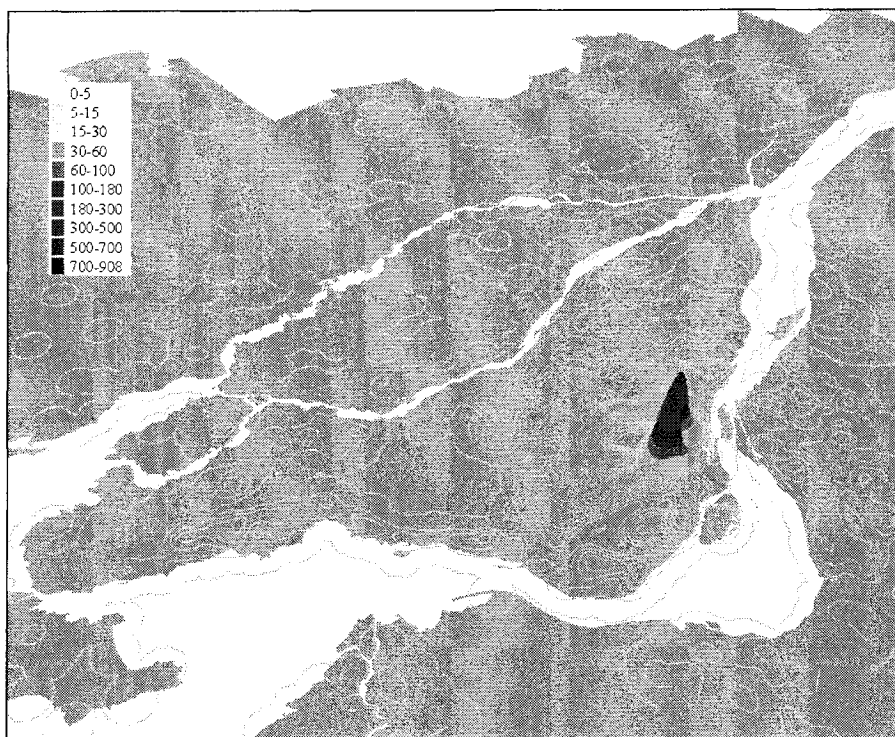


Figure 6.16 Représentation de la densité par les contours polygones 3D.

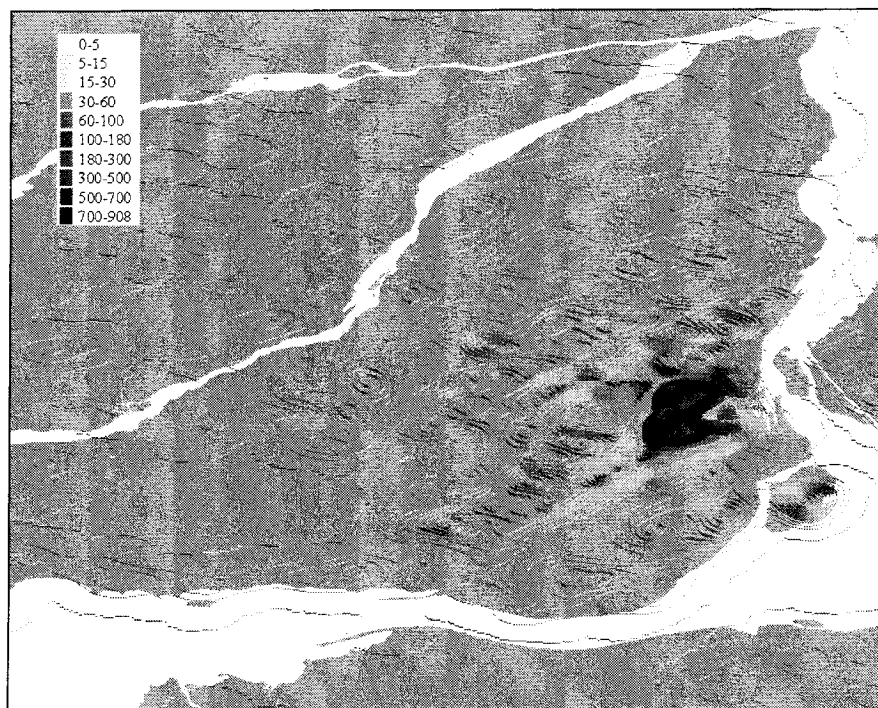


Figure 6.17 Représentation de la densité avec les lignes de contour 3D.

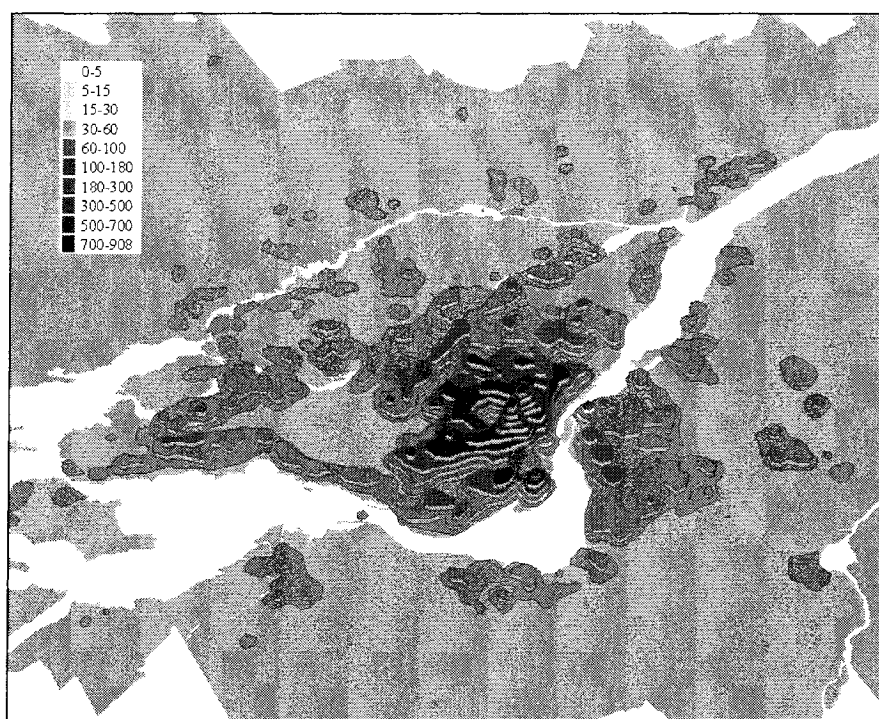


Figure 6.18 Représentation de la densité avec les polygones 3D.

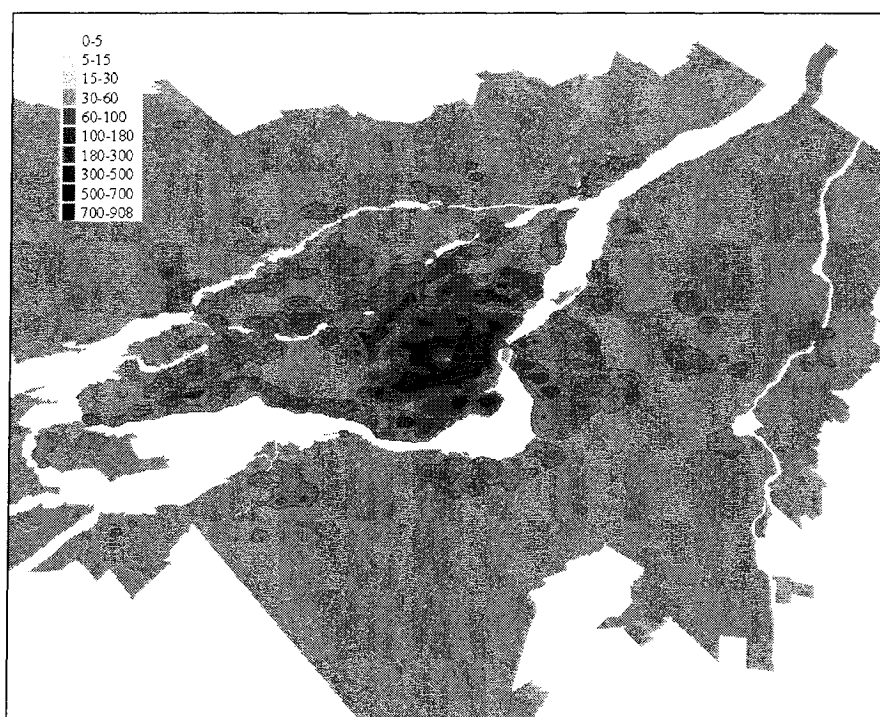


Figure 6.19 Représentation 3D de la densité avec le modèle de terrain virtuel.

6.4 Visualisation de l'objet *Déplacement*

Les données de déplacements comportant l'information géoréférencée sont originellement collectées de diverses manières lors d'enquête : le code postal, les intersections de rues, etc. Ces informations doivent être transformées en coordonnées appropriées selon la projection utilisée (par exemple, UTM, MTM) avant d'être visualisées. En même temps, l'élément temporel de ces déplacements, décrits par l'heure de départ est aussi collecté.

6.4.1 Visualisation des itinéraires de l'objet *Déplacement*

Avec la base de données brute de l'enquête, les procédures de géolocalisation attribuent une paire de coordonnées x, y à tout lieu spatial impliqué dans la manifestation d'un déplacement : résidence, origine, destination, gares et stations.

Ensuite, les procédures de validation-réseau et procédures de valeur ajoutée permettent d'obtenir une chaîne de déplacement qui décrit l'itinéraire détaillé de chaque déplacement et dérive les attributs pertinents pour l'étude contrastée des comportements de mobilité (Chapleau et Morency 2002).

Les déplacements peuvent être visualisés de manière individuelle, mais les représentations des ensembles d'un groupe de déplacements restent des solutions intéressantes afin de donner une vue globale. Les figures suivantes montrent certaines expérimentations effectuées en 2D et 3D.

6.4.1.1 **Visualisation d'un déplacement défini par son origine et sa destination**

De manière simplifiée, on décrit le déplacement par deux paires de coordonnées X, Y qui associent respectivement son origine et sa destination. Donc un déplacement peut être présenté par un vecteur du point d'origine vers le point de destination.

La base de données qu'on utilise ici est obtenue de l'enquête O-D 1998. Elle représente les déplacements vers le centre-ville de Montréal pendant une semaine.

Les figures sont :

Figure 6.20 La représentation des lignes de désir dans un plan 2D.

Figure 6.21 La représentation des déplacements 3D (en VRML). Deux plans 2D de différentes élévations sont attribués respectivement aux points d'origine et de destination. En plus, puisque les destinations sont concentrées au centre-ville, l'échelle du plan destination est 20 fois plus grande que celle d'origine. Les lignes sont colorées selon les motifs de déplacement.

Figure 6.22 Nous pouvons également réaliser la visualisation 3D de ces déplacements en appliquant les données temporelles à l'axe Z. De cette manière, un déplacement peut être représenté par une ligne dans l'espace dont les coordonnées Z des deux extrémités correspondent respectivement à l'heure de départ et d'arrivée, et les coordonnées X et Y correspondent à la localisation de l'origine et de la destination. Dans la Figure 6.22, on observe clairement la dispersion temporelle des déplacements, par exemple, la concentration à l'heure de pointe, et en même temps l'évolution temporelle de la distribution spatiale des origines.

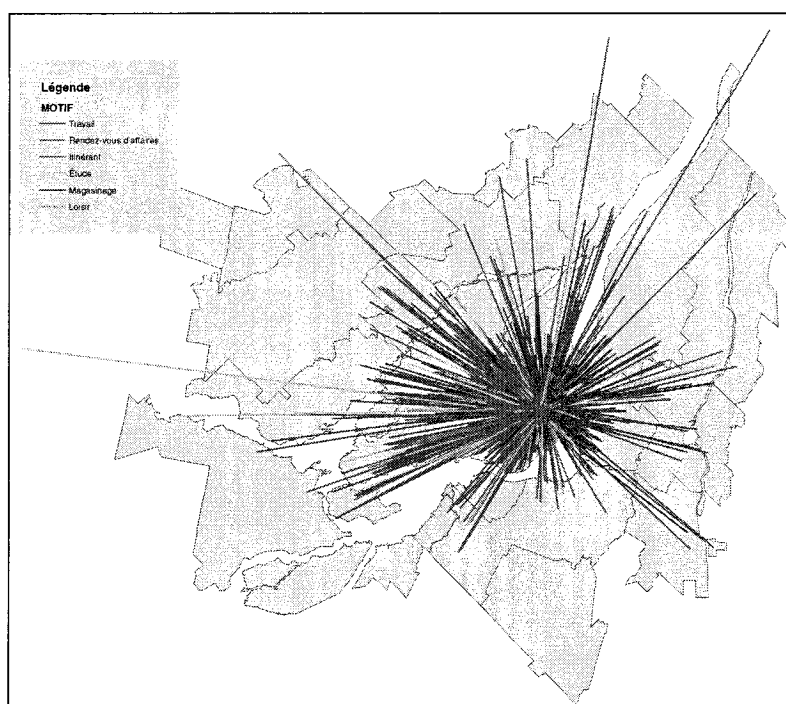


Figure 6.20 Représentation des déplacements en 2D.

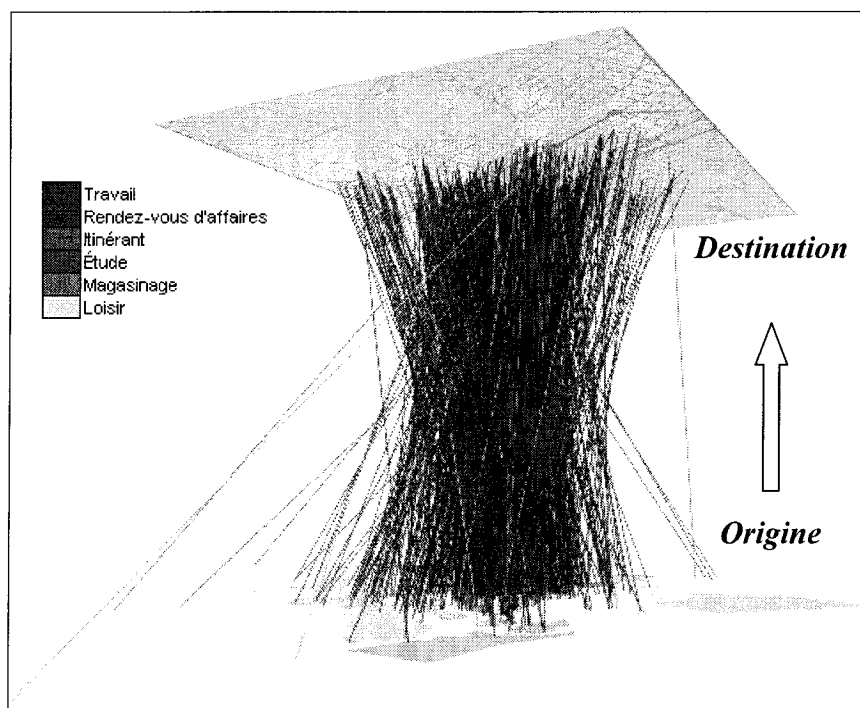


Figure 6.21 Représentation des déplacements vers le centre-ville.

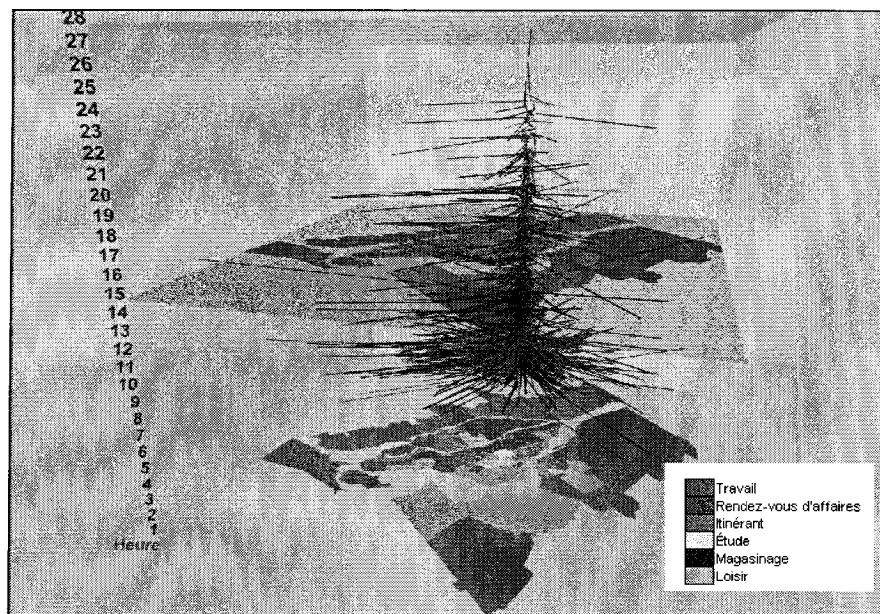


Figure 6.22 Représentation des déplacements en 3D.

6.4.1.2 Visualisation de la chaîne de déplacement

Dans un fichier de déplacements, un déplacement s'exprime avec une chaîne de mouvements de la personne. Sa définition est montrée dans la Figure 6.23.

Par exemple une personne a effectué un déplacement de son domicile à École. Elle quitte son domicile à 8h14. Elle marche à l'arrêt d'autobus de la ligne 506. Là, l'autobus arrive dans 1 minute. Elle l'emprunte jusqu'à la station Angrignon. Elle attend 2 minutes la station avant de commencer son voyage en métro jusqu'à la station Université de Montréal, ayant fait deux correspondances à la station Lionel-Groulx et Snowdon. Finalement, elle marche jusqu'à sa destination : l'École Polytechnique de Montréal.

Avec ces données, les expérimentations suivantes sont réalisées:

- Dans une représentation linéaire, ce déplacement peut être représentée par la Figure 6.24.

- La visualisation 2D de cet itinéraire de déplacement est illustrée dans la Figure 6.25. Les modes de déplacement sont différenciés par la couleur.
- La Figure 6.26 démontre le même itinéraire dans une scène 3D. Son avantage est qu'il permet de représenter la vitesse par la pente de la ligne.

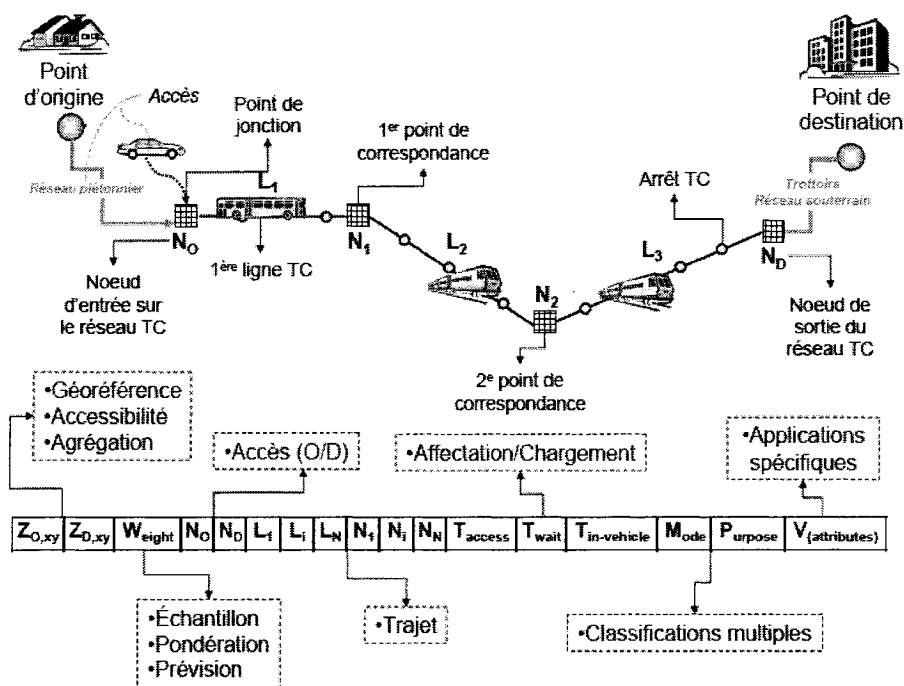


Figure 6.23 Définition d'un itinéraire de déplacement et composantes analytiques pertinentes.

(D'après Chapleau 2003)

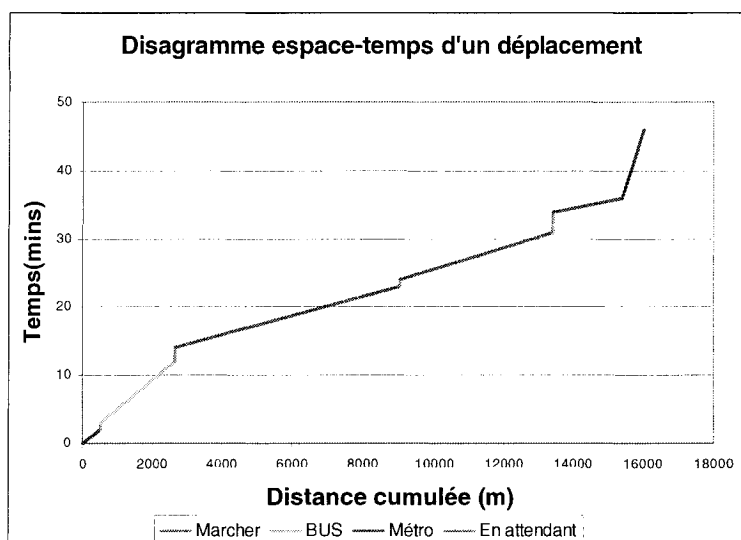


Figure 6.24 Le diagramme espace-temps d'un déplacement.

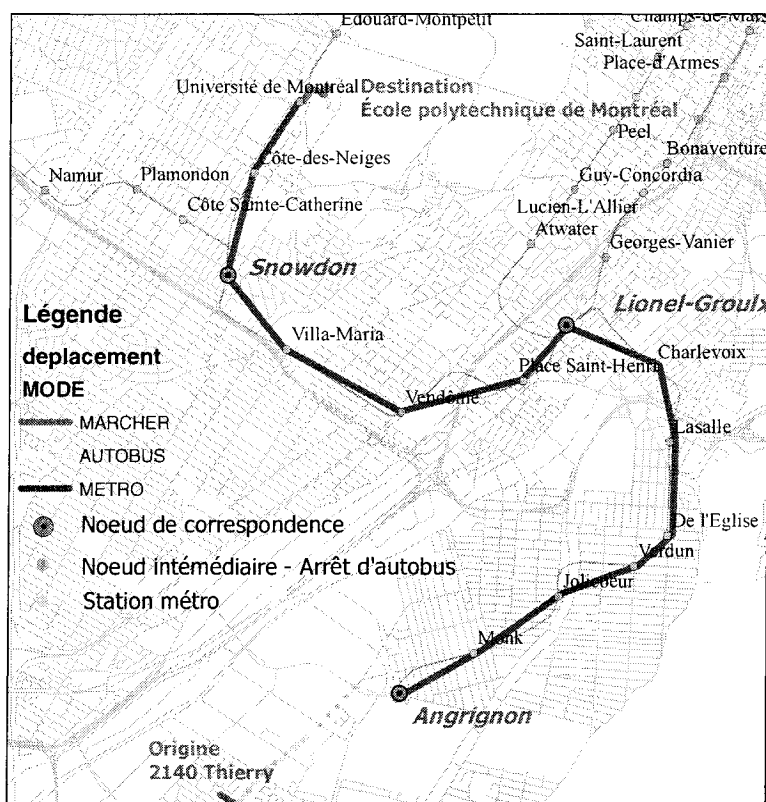


Figure 6.25 La représentation d'un déplacement en 2D.

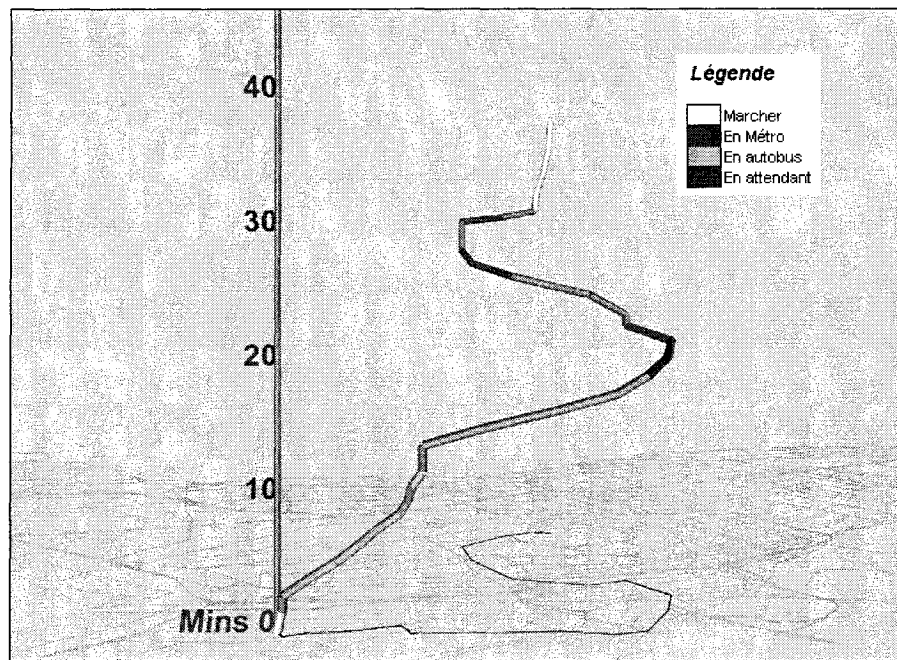


Figure 6.26 Représentation d'un déplacement en 3D.

6.4.2 La visualisation de l'objet *Personne*

6.4.2.1 Les propriétés pseudo-géométriques et temporelles

L'objet *Personne* a des propriétés pseudo-géométriques et temporelles. La personne se situe à un endroit donné à un moment donné. Donc le calcul de densité, l'agrégation et les autres analyses spatiales et traitements sont aussi applicables.

Cependant, lorsqu'elle se déplace par rapport à l'objet *Ménage* qui est relativement statique, la position de la personne peut varier avec le temps. Même, la localisation de la personne dépend de l'itinéraire qu'elle effectue, alors que ce même itinéraire fait partie des résultats de l'analyse de l'objet déplacement.

Pour la visualisation de ces variations temporelles, les visualisations dynamiques sont nécessaires. Les données qu'on utilise ici représentent les nombres de personnes se trouvant par km^2 pendant la journée. Elles font partie des résultats de l'analyse spatiale réalisée dans le groupe MADITUC.

On peut utiliser une des méthodes suivantes à cette fin :

1. L'animation des mouvements des individus. On peut employer la même méthode que celle qu'on a utilisée pour les véhicules;
2. Les animations sur les données calculées à partir des informations discrètes. Si on effectue les traitements sur les moments spécifiques, par exemple, les calculs de densité sur chaque heure dans la journée, on obtient une séquence d'images qui reflètent les changements de cet indice temporel. Donc on peut réaliser :
 - a. En 2D, les images animées en utilisant la variation de couleur. On peut utiliser divers formats d'animation pour les présenter : le format GIF, Flash etc. (voir Figure 6.27)
 - b. En 3D, les animations avec la variation des élévations des objets graphiques. La Figure 6.28 fait varier la hauteur des extrusions des carrés selon la valeur tandis que la couleur sert comme une variable visuelle redondante de la variable de taille.

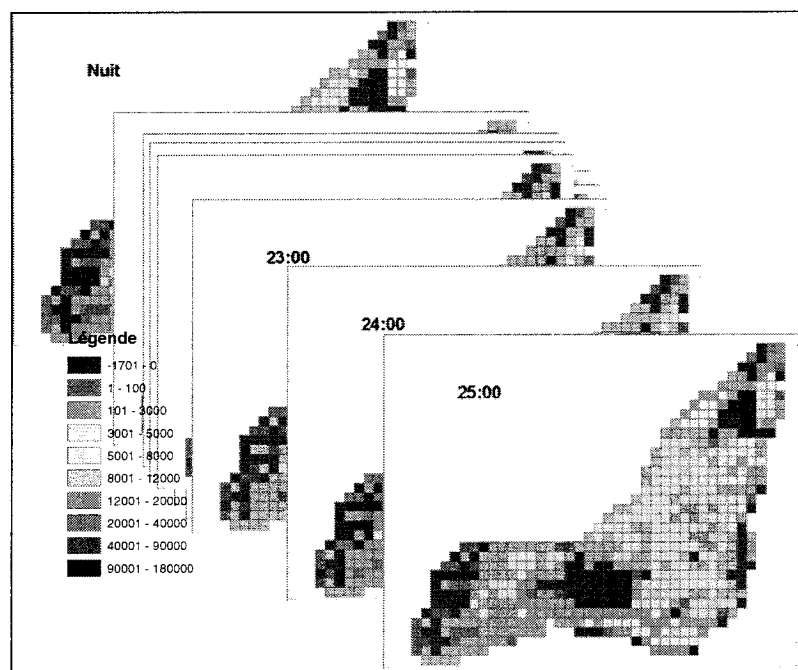


Figure 6.27 Les images séquencées de l'animation.

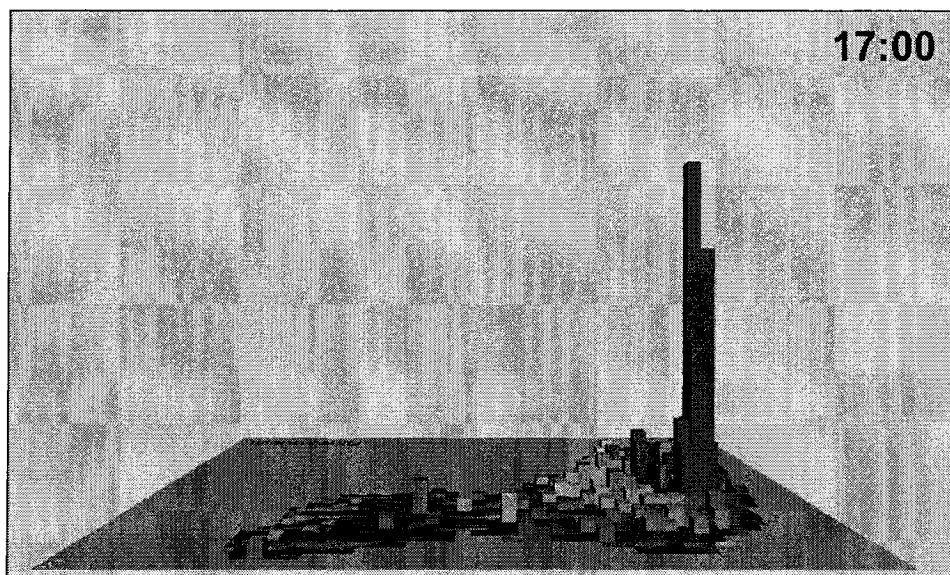


Figure 6.28 L'image capturée d'une animation représentant les nombres de personnes se trouvant dans l'île de Montréal pendant 24H.

6.4.3 Représentation de la matrice de déplacements

Dans le cas des transports, un des résultats intéressants à partir des données d'enquête Origine-Destination de l'approche totalement désagrégé est la matrice de déplacements. Cette matrice, représente les déplacements multi-modaux et multi-motifs. Ils sont traités de manière individuelle par un processus d'agrégation multicritère complété par des données sociodémographiques. Ces bases de données issues des recensements canadiens et les données recueillies par les multiples autorités organisatrices des transports rendent possible l'appréhension des questionnements stratégiques liés aux études de grande envergure : étalement urbain, migration des pôles d'emplois ainsi que relation entre les instruments transports et les facteurs économiques. (Chapleau 1993, Chapleau et Morency 2002)

La matrice de déplacements illustrée dans les Figure 6.29 à Figure 6.33 représente les déplacements de pointe du matin pour une journée moyenne de semaine entre 8 grandes régions d'analyse.

6.4.3.1 La représentation de la matrice de déplacements en 2D

Dans le cas de la représentation d'une matrice de déplacements, la carte de flux est largement utilisée afin de montrer les mouvements du phénomène. Chaque flux comporte au moins deux types d'informations : l'information vectorielle qui définit l'origine et destination de ce flux et l'information quantitative ou qualitative qui caractérise les phénomènes.

On utilise deux variables visuelles,

- soit la couleur - Figure 6.29, les nombres de déplacements sont représentés par les lignes colorées.
- soit la taille - Figure 6.30. Les largeurs des lignes sont proportionnelles aux nombres de déplacements.

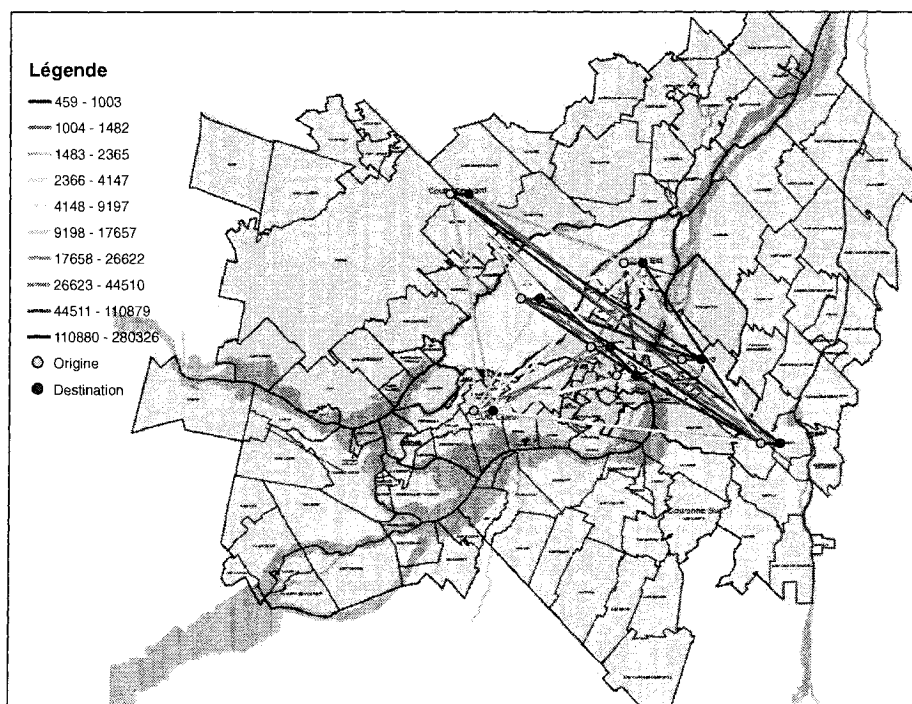


Figure 6.29 La représentation de la matrice de déplacements avec les lignes colorées.

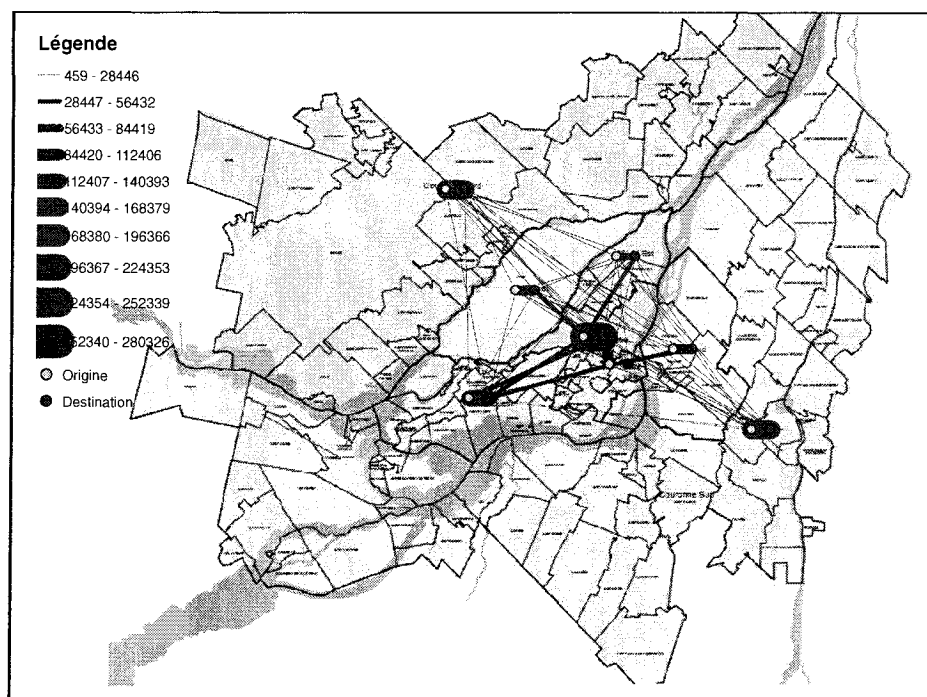


Figure 6.30 La représentation de la matrice de déplacements avec la largeur de ligne.

Pour les cartes 2D, une des techniques répandues est d'utiliser les lignes ou flèches de telle sorte que le vecteur soit décrit par sa direction, que l'information quantitative soit décrite par l'épaisseur des lignes et que l'information qualitative soit présentée par la texture ou couleur.

Pourtant, la réalisation d'une carte de flot reste problématique en raison de deux caractéristiques de la carte de flot. En premier lieu, puisque le nombre de données à présenter est le carré du nombre d'origine ou de destination, il est donc difficile de disposer cette grande quantité de flèches dans un espace limité. En second lieu, il est possible que le flot soit en double sens, c'est-à-dire un flot du point A au point B et un flot de B à A, par conséquent on aurait besoin de mettre deux flèches au même endroit. Ces deux difficultés nous amènent à une seule conclusion : nous n'avons simplement pas suffisamment de place pour disposer de si nombreuses flèches.

Du point de vue de la visualisation, la matrice de déplacements Origine-Destination possède, généralement par rapport aux cartes de flot, une caractéristique non

négligeable : les déplacements effectués à l'intérieur de la zone d'analyse, qui, représentent une portion importante des déplacements totaux. Cette partie des déplacements, en effet, ne peut pas être représentée sous forme vectorielle. Il nous donc faut trouver une représentation qui est premièrement capable de montrer les nombreux flux envoyés et reçus par les zones et deuxièmement, susceptible d'illustrer les informations quantitatives, y compris les flux effectués dans une même zone, de manière cohérente afin de permettre aux usagers de comparer toutes les valeurs simultanément. Les figures au-dessus (Figure 6.29 et Figure 6.30,) ont séparé les points d'origines et les points destinations pour contourner ce problème.

6.4.3.2 La représentation de la matrice de déplacements en 3D

Avec le langage VRML, nous avons réalisé deux types de représentation 3D.

- La première représentation, illustrée par la Figure 6.31 est l'affectation des valeurs des déplacements aux hauteurs des facettes.
- La deuxième représentation est inspirée de la carte de type *facette* dans laquelle les vecteurs sont représentés par une surface rectangulaire qui lie les deux points en question. Tel que montré dans la Figure 6.32, cette visualisation comporte trois parties.
 - D'abord un cylindre vertical coloré représente le centroïde de la zone et la hauteur de ce cylindre le nombre total des déplacements interzonaux.
 - En second lieu, les facettes connectent les deux cylindres de sorte que la couleur change graduellement du blanc (au point d'origine) à la couleur correspondant à la couleur de destination et que la hauteur corresponde au nombre de déplacements.
 - Troisièmement une facette demi transparent expose les déplacements dans la zone par variation de largeur.

- Le troisième type de représentation illustré par la Figure 6.33, concerne l'utilisation de deux plans qui représentent respectivement l'origine et la destination éloignée dans l'axe Z et le rayon des cylindres associées au nombre de déplacement.

En étudiant les deux expérimentations de représentation de matrice OD, il paraît évident que les types 3D peuvent comporter plus d'information à la fois que les cartes de flux traditionnelles. Mais nous ne disons pas qu'il résoudra tous les problèmes de la visualisation de flux surtout pour les cas particuliers. Par exemple, la visualisation des déplacements effectués à l'intérieur des zones dans la Figure 6.31, la Figure 6.32 et la Figure 6.33 reste difficile. Puisque ces nombres sont très grands par rapport aux déplacements interzonaux, nous devons appliquer la transparence aux facettes ou aux cylindres afin de libérer certaines places pour les déplacements interzonaux.

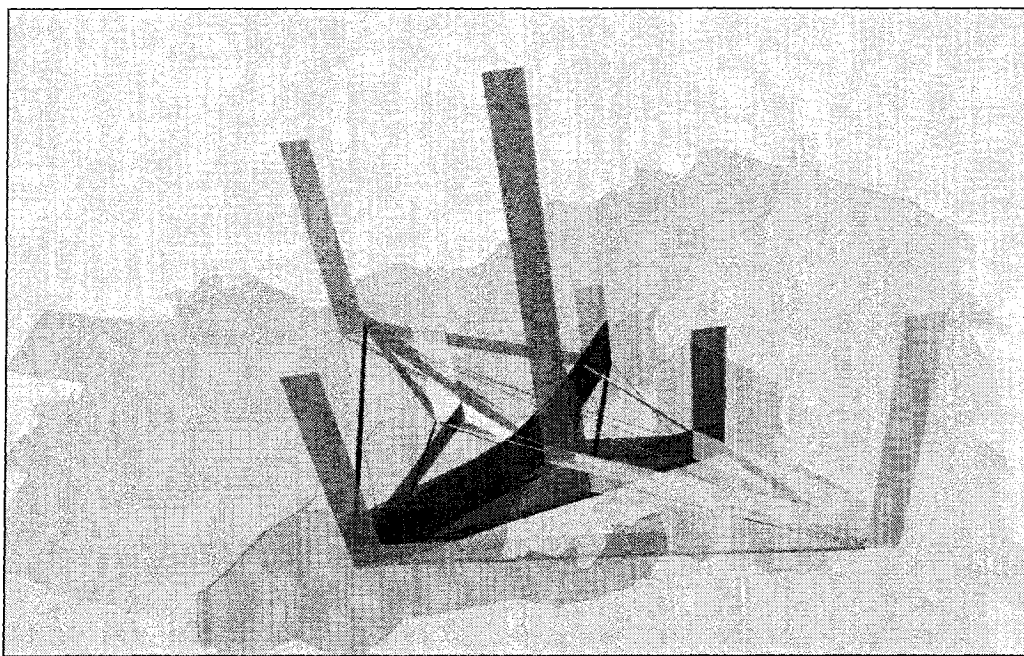


Figure 6.31 Matrice Origine-Destination montréalaise de 8 grandes régions d'analyse représentée par les facettes -1.

Conclusion

Dans ce mémoire, nous avons exploré les techniques de la représentation et de la visualisation des objets du transport urbain dans le cadre de l'approche totalement désagrégée orientée-objet. Dans un premier temps, la revue de littérature sur les technologies graphiques et la sémiologie graphique a présenté les progrès récents et les concepts cohérents de la visualisation. Elle confirme aussi les influences des multiples disciplines sur la visualisation des phénomènes et objets liés aux transports, y compris la cartographie, la visualisation informationnelle, la visualisation scientifique et la géovisualisation. Nous avons surtout mis l'emphasis sur les techniques de représentation des phénomènes spatio-temporels et le langage VRML de représentation 3D dans le cyberspace.

Nous avons effectué des expérimentations systématiques afin d'illustrer l'exploitation de ces technologies de la visualisation dans le contexte de l'approche orientée-objets. Le résultat affirme le rôle indispensable de la visualisation dans la représentation des données de transport et son emploi comme outil d'analyse dans le processus de la planification.

Les parties sur les expérimentations 3D avec VRML nous ont permis de souligner l'avantage de la visualisation 3D et de l'animation aux fins de la représentation des données spatio-temporelles.

Cependant, la collection des objets de transport est si vaste et les données de transport dans le cadre de l'approche totalement désagrégée sont si riches, qu'il est difficile de toute couvrir dans cette étude. Il reste alors certains aspects qui ne sont pas encore explorés, par exemple :

- La visualisation de la topologie des réseaux routiers et réseaux de transport en commun;

- Les fonctions de communication de la visualisation, comme l'utilisation des nouveaux langages sur le cyberspace (par exemple, VRML, X3D, SVG) afin de fournir des services à la clientèle.
- Les visualisations interactives permettant d'effectuer les fonctions analytiques avec les fonctionnalités de gestion de bases de données.

BIBLIOGRAPHIE

- BADARD, T et RICHARD, D (2001) Using XML for the exchange of updating information between geographical information systems. Computers, Environment and Urban Systems 25 (1).17-31.
- BARNARD, Fred R. (1921) Printers' Ink. 8 Dec., 1921, p. 96.
- BEGUIN, Michèle, PUMAIN, Denise et PASCARD, Élisabeth (2000). La représentation des données géographiques statistique et cartographie. Paris: A. Colin.
- BERTIN, Jacques et BARBUT, Marc (1967). Sémiologie graphique les diagrammes, les réseaux, les cartes. Paris: Mouton.
- BERTIN, Jacques (1983). Semiology of graphics diagrams, networks, maps. Madison, Wis: University of Wisconsin Press.
- BONNEL P., BECHAR, M., JULIEN, H., ODENT, P. et SAINT-MARC, L. (2002) Didacticiel de formation à la modélisation transport, produit sous CD-Rom, LET, ENTPE, IMTRANS, MVA pour le compte de l'ADEME, Lyon,
- BORDIN, Patricia (2002). SIG concepts, outils et données. Paris: Hermès science.
- BREWER, C. A. (1999) Color Use Guidelines for Data Representation. American Statistical Association. Proceedings of the Section on Statistical Graphics, 55-60. Alexandria VA.
- CARD, Stuart, MACKINLAY, Jock et SHNEIDEMAN, Ben (1999) Readings in Information Visualization: Using Vision to Think. Morgan, Kaufmann.

- CHAPLEAU, Robert, de CEA, Joaquin (1983) La perception de l'offre par les usagers du transport en commun, sous la perspective d'un modèle d'affectation. Routes et Transports, Montréal, no. 36.
- CHAPLEAU, Robert (1992) La modélisation de la demande de transport urbain avec une approche totalement désagrégée. Selected Proceedings of The World Conference on Transportation Research, WCTR Society, Lyon, volume II.
- CHAPLEAU, Robert et ALLARD, Bruno (1992) L'ère des systèmes d'information fondés sur une analyse désagrégée pour la prise de décision en transport urbain. Congrès annuel de l'Association des transports du Canada, Québec.
- CHAPLEAU, Robert (1993) Une carte d'utilisation du sol dérivée d'une enquête Origine-Destination. 28e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes.
- CHAPLEAU, Robert (1997) Conducting telephone Origine-Destination Household Survey with an Integrated Informational Approach. Transport research Circular. EC-008. Grainau, Allemagne.
- CHAPLEAU, Robert, ALLARD, Bruno, TREPANIER, Martin et MORENCY, Catherine (2000) Les sites Web transport dans la Grande Région de Montréal : problématique et orientations informationnelles. Congrès annuel de l'Association des transports du Canada, Québec.
- CHAPLEAU, Robert. (2002) Mobilité des personnes âgées à Montréal en 1993: Analyse désagrégée. Livre Démographie et transport: Villes du Nord et Villes du Sud, BUSSIERES, Yves, et MADRE, Jean-Loop, France.
- CHAPLEAU, Robert, ALLARD, Bruno, TREPANIER, Martin et MORENCY, Catherine. (2002) TRAIN : Théorie de la Relativité Analysée Interactivement... à Nouveau, 37e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, avril 2002, Québec, 23 pages.

- CHAPLEAU, Robert et MORENCY, Catherine (2002) Pour une confusion interrompue à propos des déplacements urbains. 37e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Québec, 18 pages.
- CHAPLEAU, Robert (2003) Visual-is-action analytique du transport urbain. 39e Congrès annuel de l'association québécoise du transport et des routes, Québec.
- CIMTU (2005) Mobilité des personnes dans la région de Montréal Enquête O-D 2003
Document de consultation
<http://www.cimtu.qc.ca/EnqOD/2003/Resultats/EnqOD03-Mobilite.pdf> Dernier accès 2005-01-16.
- CLEVELAND, W. (1985) The Elements of Graphing Data. HOBART Press.
- DIBIASE, D (1990) Visualization in the earth sciences. Bulletin of the College of Earth and Mineral Sciences, Page 13-18, Earth and Mineral Sciences, Pen State University.
- DÜRSTELER, Juan C. (2002) The History of Visualisation, Inf@Vis
http://www.infovis.net/E-zine/2002/num_110.htm Dernier accès: 2005-11-7.
- EKMAN, G., JUNGE, K. (1961) Psychophysical relations in visual perception of length, area and volume. Scandinavian Journal of Psychology, 2,1-10.
- FAYYAD, Usama M., GEORGES, G. Grinstein, et ANDREAS, Wierse (2002) Information visualization in data mining and knowledge discovery. San Diego, CA: Morgan Kaufmann.
- FRIENDLY, M. et DENIS, D. j. (2004) Milestones in the History of Thematic Cartography, Statistical Graphics, and Data Visualization.
<http://www.math.yorku.ca/SCS/Gallery/milestone/> dernier accès 2005-10-10
- GAHEGAN, M. et LEE, I. (2000) Data structures and algorithms to support interactive spatial analysis using dynamic Voronoi diagrams. Computers, Environment and Urban Systems 24.509-37.

- GEORGE, Robertson, G., MACKINLAY, Jock et CARD, K. Stuart (1991) Cone Trees: Animated 3D Visualizations of Hierarchical Information, Conference on Human Factors and Computing Systems (CHI '91). 189-194. ACM press.
- GRINSTEIN, Georges G et WARD O. Matthew (2002) Introduction to data visualization. Information visualization in data mining and knowledge discovery, Fayyad, Usama M., 21-45. Academic Press.
- HARDISTY, Frank, MACEACHREN, A. M., et TAKATSUKA, Masahiro. (2001) Cartographic Animation in Three Dimensions: Experimenting with the Scene Graph. ICA et August 6-10, 2001. 20th International Cartographic Conference. 2810-2817.
- HAVRE, S., E. Hetzler, WHITNEY, P. et NOWELL, L. (2002). ThemeRiver: visualizing thematic changes in large document collections. Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on 8.9-20.
- HEYWOOD, Ian, CORNELIUS, Sarah, CARVER, Steve (1998) An introduction to geographical information systems xiii, 279 p., Harlow, England, Longman.
- HUGHES, Ronald G (2004) Visualization: Where Should Our Focus Lie? A DRAFT White Paper on the Perceived Role of the TRB Visualization in Transportation Task Force,
http://www.hsrb.unc.edu/pdf/hfactors/pdf/whitepaper_rev3.pdf Dernier accès 2004/11/1.
- INSELBERG, A. (1985) The Plane with Parallel Coordinates. The Visual Computer, 61-69.
- JIANG, Bin, HUANG, Bo et VIT, Vasek (2002). Geovisualisation for Planning Support Systems. Planning Support Systems in Practice, 169-83. Springer-Verlag.
- JOHNSON, B. et SHNEIDERMAN, Ben (1991) Treemaps: A Space-filling Approach to the Visualization of Hierarchical Information Structures. 2nd International IEEE Visualization Conference.

- KEIM, A. Daniel, PANSE, Christian, SCHNEIDEWIND, Jörn, SIPS, Mike et BARRO, Helmut (2004) Exploring and Visualizing the History of InfoVis. http://www.cs.umd.edu/hcil/InfovisRepository/contest2004/12/unzip/standardform2004_KeimPaScSiBar.html Dernier accès: 2005-05-01.
- KRAAK, M.-J. (1993) 3-Dimensional Map Design. Cartographic Journal 30.188-94.
- KRAAK, M.-J. (1999) Visualizing spatial distributions. Geographical information systems, Longley, Paul, New York: Wiley.
- KRAAK, M.-J. (2002) Current trends in visualization of geospatial data with special reference to cartography. Indian Cartographer.
- KRAAK, M.-J. (2003) The space-time cube revisited from a géovisualisation perspective. 21st International Cartographic Conference, Cartographic Renaissance.
- KROHN, U. (1995) Visualization of navigation retrieval in virtual information spaces. CIKM'95 Workshop on New Paradigms in Information Visualization and Manipulation. Baltimore, Maryland, USA.
- KWAN, Mei-Po (1999) Gender and individual access to urban opportunities; a study using time-space measures. Professional geographer, Association of American Geographer 200-27.
- KWAN, Mei-Po (2002) New Information Technologies, Human Behavior in Space-Time and the Urban Economy. Innovation and the Transport System.
- KWAN, Mei-Po et LEE, Jiyeong (2003) Geovisualization of Human Activity Patterns Using 3D GIS: A Time-Geographic Approach. Spatially Integrated Social Science: Examples in Best Practice. GOODCHILD, M. F. et DONALD, G. Janelle, Oxford: Oxford University Press.
- LAMBERT, J. H. (1779) Pyrometrie Berlin, Germany.

- LIPCHAK, Benjamin N et WARD, Matthew O. (1998) Visualization of Cyclic Multivariate Data. Visualization '97 Late Breaking Hot Topics, 61-64.
- LONGLEY, Paul (1999) Geographical information systems. New York: Wiley.
- LOWELL, Kim et ANNICK, Jaton (1999) Spatial accuracy assessment land information uncertainty in natural resources. Chelsea, Mich: Ann Arbor Press.
- MACEACHREN, A. M. et TAYLOR, D. R. F. (1994) Visualization in Modern Cartography. London: Pergamon Press.
- MACEACHREN, Alan M (1995) How maps work: representation, visualization, and design. New York: Guilford Press.
- MACEACHREN, A. M. et KRAAK, M. J. (2001) Research challenges in geovisualization. Cartography and Geographic Information Systems, 28.3-12.
- MACEACHREN, Alan M., BREWER, Isaac, et STEINER, Erik (2001) GEOVISUALIZATION TO MEDIATE COLLABORATIVE WORK: Tools to Support Different-Place Knowledge Construction and Decision-Making. <http://hero.geog.psu.edu/products/ICC16009amm.pdf>. dernier accès: 2005-11-10.
- MCCORMICK , B. H. et DEFANIT, T. A. Brown (1987). Visualization in scientific computing, a synopsis. IEEE Computer Graphics.Applications, pp. 61-70.
- MINARD, C. J. (1869) Carte figurative des pertes successives en hommes de l'armée qu'Annibal conduisit d'Espagne en Italie en traversant les Gaules (selon Polybe). Carte figurative des pertes successives en hommes de l'armée française dans la campagne de Russie, 1812-1813. lith.
- MILLER, H. J. (1991) Modeling Accessibility Using Space-Time Prism Concepts Within Geographical Information Systems. International Journal of Geographical Information Systems 5, no. 3:287-301.

- MORENCY, Catherine et CHAPLEAU, Robert (2004) De petits points lourds de connaissance: essais méthodologiques sur les données spatiales urbaines, 39e Congrès annuel de l'association québécoise du transport et des routes, Québec.
- MUEHRCKE, Phillip et MUEHRCKE, Juliana O. (1992) Map use reading, analysis, and interpretation. Madison, Wis: JP Publications.
- MÜLLER, Wolfgang, SPIKERING, Ulrike, ALEXA, Marc et LURGEN, Ido (2003) Visualization for modeling and simulation: visualization methods for time-dependent data - an overview. Winter Simulation Conference. Proceedings of the 35th conference on winter simulation: driving innovation, 737-745.
- MUNZNER, Tamara (2002) Guest Editor's Introduction: Information Visualization. 20-21 Computer Graphics and Applications, IEEE.
- OLSEN, Dan. r. Jr. (1999) Interacting in chaos. Interactions Journals, septembre, 1999.
- PUMAIN, Denise (2003) Colloque 30 ans de sémiologie graphique. <http://193.55.107.45/semiogra/semiogrf.htm>. 12-12-2003. 8-19-2004.
- ROBINSON, Arthur Howard (1984) Elements of cartography. New York: Wiley.
- SCIENTIFIC VISUALIZATION LABORATORY (2005) Tutorial on scientific visualization. <http://www.cc.gatech.edu/scivis/tutorial/linked/whatisscivis.html> 08-08-2004.
- SLOCUM, Terry A. (1999) Thematic cartography and visualization. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall.
- THOMAS, Isabelle (2000) Cartographie d'aujourd'hui et de demain : rappels et perspectives. <http://www.cybergeopresse.fr/cartogrf/thomas/thomas1.htm>. 11-04-2005.
- TREPANIER, Martin (1999) Modélisation totalement désagrégée et orientée-objet appliquée aux transports urbains. Thèse doctorale, École polytechnique de Montréal, Montréal.

- TUFTE, Edward R. (1990) Envisioning information. Cheshire, Conn: Graphics Press.
- VASCONCELLOS, R. (1992) Knowing the Amazons through tactual graphics. 15th Conference of the International Cartographic Association. September-October, 206-210. Bournemouth, UK.
- WANG, XinHao (2004) Integrating GIS, simulation models, and visualization in traffic impact analysis. Computers, Environment and Urban Systems.
- WEBER, Joe et Mei-Po Kwan (2002) Evaluating the Effects of Geographic Contexts on Individual Accessibility: A Multilevel Approach. Urban Geography 24. 647-71.
- WEBER, Marc, Marc Alexa et Wolfgang Müller (2001) Visualizing Time-Series on Spirals. Proceedings of InfoVis. 2001.