HAL
open science

Méthodologie pour optimiser le transport de marchandises en ville : application aux villes moyennes et dans le cadre de l'agglomération de La Rochelle

Loïc Delaître

To cite this version:

Loïc Delaître. Méthodologie pour optimiser le transport de marchandises en ville : application aux villes moyennes et dans le cadre de l'agglomération de La Rochelle. Sciences de l'Homme et Société. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008. Français. NNT : 2008ENMP1566 . pastel-00004670

HAL Id: pastel-00004670

https://pastel.hal.science/pastel-00004670v1

Submitted on 30 Jan 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Collège doctoral

ED n° 396: Economie, Organisations, Société

N° attribué par la bibliothèque
|__|__|__|__|__|__|__|__|__|__|

T H E S E

pour obtenir le grade de
Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris
Spécialité "Sciences de gestion"

présentée et soutenue publiquement par
Loïc DELAÎTRE

le 28 novembre 2008

METHODOLOGIE POUR OPTIMISER LE TRANSPORT DE MARCHANDISES EN VILLE. APPLICATION AUX VILLES MOYENNES ET DANS LE CADRE DE L'AGGLOMERATION DE LA ROCHELLE

Directeur de thèse : Hugues Molet

Jury

M. D. Breuil, *Directeur de la recherche de l'EIGSI*	Co-directeur
M. M. Browne, *Professor of the University of Westminster*	Président
M. B. Vallespir, *Professeur de l'Université de Bordeaux I*	Rapporteur
Mme. E. Gouvernal, *Directrice de recherche, SPLOT, INRETS*	Rapporteur
Mme. L. Dablanc, *Chercheuse, INRETS / ENPC*	Examinatrice
M. A. De La Fortelle, *Directeur du CAOR, Mines ParisTech*	Examinateur
M. C. Samson, *Directeur Logistique Monoprix et DG Samada*	Examinateur
M. M. Parent, *Directeur de programmes, INRIA/IMARA*	Invité

T H E S E

pour obtenir le grade de

Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris

Spécialité "Sciences de gestion"

présentée et soutenue publiquement par

Loïc DELAÎTRE

MÉTHODOLOGIE POUR OPTIMISER LE TRANSPORT DE MARCHANDISES EN VILLE. APPLICATION AUX VILLES MOYENNES ET DANS LE CADRE DE L'AGGLOMERATION DE LA ROCHELLE

Directeur de thèse : Hugues MOLET

Jury

M. D. Breuil, *Directeur de la recherche de l'EIGSI*	Co-directeur
M. M. Browne, *Professor of the University of Westminster*	Président
M. B. Vallespir, *Professeur de l'Université de Bordeaux I*	Rapporteur
Mme. E. Gouvernal, *Directrice de recherche, SPLOT, INRETS*	Rapporteur
Mme. L. Dablanc, *Chercheuse, INRETS / École des Ponts ParisTech*	Examinatrice
M. A. de La Fortelle, *Directeur du centre de recherche CAOR, Mines ParisTech*	Examinateur
M. C. Samson, *Directeur Logistique Monoprix et DG Samada*	Examinateur
M. M. Parent, *Directeur de programmes, INRIA-IMARA*	Invité

Table des matières

xiii

Remerciements **xv**

Introduction générale **xvii**

1 Contexte et Problématique du TMV **1**

1.1 Introduction 2

1.2 Contexte 2

1.2.1 Définition du Transport de Marchandises en Ville 2

1.2.2 Quelles marchandises ? 4

1.2.3 Acteurs du TMV 6

1.3 Problématique 8

1.3.1 Problématique pour une ville 8

1.3.2 Une problématique d'une grande variété 18

1.3.3 Une problématique au centre de nombreuses contradictions 19

1.3.4 Problématique pour une ville de taille moyenne 20

1.4 Conclusion 22

2 Expérimentations et Modèles pour le TMV **25**

2.1 Introduction 26

2.2 Les approches expérimentales 26

2.2.1 Les projets européens 27

2.2.2 Les projets nationaux 28

2.2.3 Les initiatives locales 29

2.3 Solutions expérimentées et synthèse des résultats 31

2.3.1 Les leviers d'action 31

2.3.2 Synthèse qualitative des résultats 45

2.4 Modèles et outils du TMV 45

2.4.1 Spécificité de la modélisation du TMV 45

2.4.2 Rétrospective de la modélisation du TMV 49

2.4.3 Les outils d'aide à la décision pour le TMV 56

2.4.4 Conclusion sur les modèles et outils du TMV 64

2.5 Conclusion 65

3 Modèle conceptuel du TMV pour l'aide à la décision **67**

3.1 Introduction 68

3.2 Problématique 69

3.2.1 Un besoin des autorités locales 69

3.2.2 La logistique en ville : un système complexe 70

3.2.3 L'acquisition de la connaissance pour la décision 72

3.3 Modèle conceptuel 74

3.3.1 Méthodologie de modélisation 74

3.3.2 Analyse causale 75

3.3.3 Le modèle conceptuel 83

3.4 Conclusion 91

4 Approche et outil de simulation pour le TMV 93

4.1 Introduction 95

4.2 Nécessité d'une approche globale de l'outil 96

4.2.1 La transversalité 96

4.2.2 Les dimensions nécessaires 98

4.3 L'approche de simulation CILOSA 99

4.3.1 Outil de simulation 99

4.3.2 CILOSA : CIty-LOgistics-Simulation-Approach 120

4.4 Simulation des aires de livraison 142

4.4.1 Problématique 142

4.4.2 Le stationnement gênant pris en compte 144

4.4.3 Principes 146

4.4.4 Simulation d'une aire de livraison 147

4.4.5 Simulation de la propagation de la gêne occasionnée 149

4.4.6 Relations entre les deux modules 153

4.5 L'utilité pour les collectivités locales 154

4.5.1 Un outil pour le diagnostic 154

4.5.2 Un outil pour l'aide à la décision 154

4.5.3 Un outil formalisé pour la concertation et le dialogue 156

4.5.4 Les limites de l'outil 157

4.6 Conclusion 158

5 Méthodologie de mise en œuvre **161**

5.1 Introduction 163

5.2 Définition des objectifs 163

5.2.1 Les Groupes Cible 164

5.2.2 L'identification des attentes 165

5.2.3 Définition des objectifs 166

5.3 Caractérisation de la ville pour le TMV 167

5.4 Conception globale et solutions 167

5.4.1 Conception globale 168

5.4.2 Évaluation des solutions 169

5.5 Position de la démarche 170

5.6 Réactions et motivations des acteurs 171

5.6.1 Les transporteurs 173

5.6.2 Les commerçants du centre-ville 174

5.6.3 Les artisans du BTP 174

5.6.4 Les négoces du BTP 175

5.6.5 Les « Cafés Hôtels Restaurants » 176

5.6.6 Les acteurs du Port autonome de La Rochelle 176

5.6.7 Les acteurs liés aux déchetteries 176

5.6.8 Les commerçants en dehors du centre-ville 177

5.6.9 Les artisans hors BTP 177

5.6.10 Les acteurs de la Presse 177

5.6.11 Les habitants 178

5.6.12 La collectivité locale 178

5.7 Conclusion 179

6 Application à La Rochelle et réactions des acteurs 181

6.1 Introduction 182

6.2 Présentation du contexte rochelais 183

6.2.1 La Communauté d'Agglomération de La Rochelle 183

6.2.2 Le projet SUCCESS 184

6.3 Caractérisation de la ville 184

6.3.1 Résultats de la variabilité à La Rochelle 184

6.3.2 La Rochelle dans l'espace de caractérisation 186

6.3.3 Sélection des solutions potentiellement efficaces à La Rochelle 187

6.4 Impacts du schéma d'aires de livraison 187

6.4.1 Contexte de la validation 187

6.4.2 Données d'entrée et calibrage 188

6.4.3 Validation de la simulation numérique (DALSIM) 189

6.4.4 Utilisation de l'outil à Poitiers 196

6.5 Analyse critique des résultats et préconisations 199

6.6 L'outil et les acteurs 201

6.7 Conclusion 202

Conclusion générale 205

Abréviations 213

Bibliographie **217**

A Spécifications approfondies du premier module de DALSIM **1**

A.1 Diagrammes de classes 1

A.2 Diagramme de Flux 5

A.3 Interfaces 5

B Quelques photos... **9**

Table des figures

1.1 Flux de marchandises en ville 5

1.2 Interactions des acteurs dans le TMV 8

1.3 Impacts négatifs du TMV 9

1.4 Évolution des émissions de CO_2 dans le transport 15

1.5 Évolution de la pollution du transport routier et des autres modes 16

1.6 Évolution des victimes de la route et objectifs à 2010 de l'Europe des 15 et de l'Europe des 25 18

2.1 Caractérisation des ELU inspirée du [PREDIT, 2005] et de [Boudouin, 2006] . . . 36

2.2 Avantages-Inconvénients et exemples des trois premiers leviers 46

2.3 Avantages-Inconvénients et exemples des deux derniers leviers 47

2.4 Classification des types de modèles de TMV inspiré de [Paglione, 2006] 52

2.5 Schéma de principe de la modélisation en 4 étapes 54

2.6 Structure du modèle Wiver© 58

2.7 Structure du modèle GoodTrip© 59

2.8 Structure modulaire de Freturb© 64

3.1 Méthodologie de modélisation 75

3.2 Causes de la problématique TMV 76
3.3 Causes du manque d'accessibilité 77
3.4 Causes du manque de sécurité 77
3.5 Causes des impacts environnementaux 77
3.6 Causes de la contribution à la congestion 79
3.7 Schéma causal pour le système TMV 81
3.8 Modélisation sur quatre horizons 83
3.9 Le système TMV représenté par une grille GRAI 86

4.1 Place centrale du TMV 97
4.2 Interactions spatiales dans le TMV 98
4.3 Étapes clés des processus de livraison et d'enlèvement sur un exemple significatif 103
4.4 Structure de l'outil de simulation 104
4.5 Caractéristiques d'un colis i et d'un véhicule j 107
4.6 Représentation des coordonnées d'un colis dans l'espace 107
4.7 Représentation d'une tranche d'un véhicule j 108
4.8 Schéma de la méthodologie de chargement des véhicules 112
4.9 Pseudo code de l'algorithme en tenant compte des dimensions 113
4.10 Représentation de quelques éléments du problème 116
4.11 Chemin le plus court pour un véhicule k 118
4.12 Amélioration de l'itinéraire 118
4.13 Graphe d'états d'un espace final de stationnement i 120
4.14 Structure de l'approche de simulation CILOSA 122
4.15 Schéma de principe pour la caractérisation de la ville 124

4.16 Exemples de solutions diminuant la congestion 125

4.17 Nombre de livraisons-enlèvements/semaine par activité par employé 126

4.18 Représentation des zones dans la ville 127

4.19 Espace de caractérisation 129

4.20 Représentation de quatre zones de caractérisation 130

4.21 Distribution des livraisons dans le centre-ville de Poitiers 132

4.22 Zones dans le centre-ville de Poitiers 133

4.23 Diagramme causal pour comprendre les mouvements de marchandises 135

4.24 Relation entre variables et modules de simulation pour les mouvements de marchandises 136

4.25 Diagramme causal pour comprendre les impacts du mouvement des marchandises 138

4.26 Relation entre modules et variables pour comprendre les impacts du TMV 139

4.27 Entrées/Sorties du module de caractérisation de la ville 140

4.28 Entrées/Sorties pour la modélisation des flux 141

4.29 Cas concrets de véhicules dits gênants 145

4.30 Structure de l'outil DALSIM 146

4.31 Entrées/Sorties du modèle d'aire de livraison 147

4.32 Critères pour le taux d'arrivées d'une aire de livraison 148

4.33 Les trois statuts des véhicules en circulation 150

4.34 Boucles de rétroaction dans le modèle de propagation de la gêne 151

4.35 Lien entre les deux sous-modèles 153

4.36 Méthodologie d'utilisation de l'outil 155

5.1 Schéma de principe de la méthode de mise en œuvre 164

5.2 Exemple de structure de hiérarchisation des acteurs 165

5.3 Tableau à double entrée pour la cohérence des actions 168

5.4 Cohérence des actions à La Rochelle 169

5.5 Position de la démarche proposée 171

6.1 Carte de la CdA de La Rochelle 183

6.2 La Rochelle dans l'espace de caractérisation 186

6.3 Carte de l'hyper-centre de La Rochelle 188

6.4 Nombre de véhicules gênants par rue et par semaine 190

6.5 Distribution des véhicules gênants simulés et constatés 191

6.6 Distributions détaillées des véhicules gênants 192

6.7 Localisation des trois rues les plus génératrices de véhicules gênants 193

6.8 Scénario de référence pour 50 véhicules gênants 194

6.9 Distribution des véhicules gênés et gênants 195

6.10 Cadre géographique de l'étude sur Poitiers 197

6.11 Génération des véhicules gênants à Poitiers 198

A.1 Diagramme de classes de la version prototype du premier module 2

A.2 Diagramme de classes de la version industrielle du premier module 3

A.3 Diagramme de flux du premier module de DALSIM 6

A.4 Vue de l'interface pour l'administrateur 7

A.5 Affichage des détails lors du zoom 8

« Il faut apprendre à résoudre le problème qui consiste à poser le problème »

J-L. Le Moigne

« La modélisation des systèmes complexes »

Remerciements

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Monsieur Hugues MOLET, professeur à l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, qui a dirigé ma thèse, pour tous ses conseils précieux, ses critiques constructives et ses encouragements. L'enthousiasme, l'intuition scientifique et la ténacité dont il a fait preuve, ainsi que la confiance et la liberté qu'il m'a accordées au cours de ce travail de recherche, m'ont permis d'entreprendre de nombreuses expériences et ont largement contribué à la richesse de cette thèse.

Mes remerciements vont également à Monsieur Dominique BREUIL, directeur de la recherche à l'EIGSI et co-directeur de ma thèse, pour m'avoir accueilli dans d'excellentes conditions de travail, pour avoir patiemment lu et relu chacun de mes articles et publications et m'avoir fait l'honneur de me déléguer plusieurs responsabilités dont j'espère avoir été à la hauteur.

Mes sincères remerciements vont également à Monsieur Bruno VALLESPIR et Madame Elisabeth GOUVERNAL pour avoir accepté d'être rapporteurs de mon mémoire de thèse. L'attention qu'ils ont portée à mes travaux, leurs conseils et leurs remarques constructives ont assuré la qualité de ces travaux.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à Madame Laetitia DABLANC, à Monsieur Claude SAMSON et à Monsieur Arnaud DE LA FORTELLE, pour leur participation, dans mon jury de thèse, en tant d'examinateurs. Je joins également à mes remerciements Monsieur Michel PARENT, invité du jury, et Monsieur Michael BROWNE pour avoir accepté d'être le président de ce jury.

Un remerciement spécial va à tous mes collègues locaux, en particulier, Madame Anjali AWASTHI, Monsieur Matthieu ROQUE et Mademoiselle Anna TRENTINI. Merci également

aux ingénieurs de la Communauté d'Agglomération de La Rochelle Messieurs Matthieu GRAINDORGE, Matthieu AUBINEAU, Hervé LE BERRE, Thierry REVEILLERE et Jean-Marie GRELLIER (directeur du service Transport et déplacements) et de la Communauté d'Agglomération de Poitiers Messieurs Sylvain RIOLAND et Laurent FONTENEAU (directeur du service mobilité, transport et stationnement) qui ont su faire régner la bonne humeur et qui, dans une atmosphère constructive et agréable, ont contribué à l'avancée de mes travaux ; Merci à Monsieur Gilbert TRAN-THANH de la mairie de Toulouse pour sa collaboration dans ces travaux et à Monsieur Arnaud LAGRANGE (PMP) pour ses articles de journaux, dépêches et informations tant appréciés.

J'adresse aussi mes remerciements aux membres du Comité Technique du programme national « Marchandises en Ville » et plus particulièrement à Monsieur Jean THÉVENON, Monsieur Philippe BOSSIN, Monsieur Jean-Louis ROUTHIER et Madame Danièle PATIER pour leur contribution à la dissémination de ces travaux au niveau national.

Dans le cadre de ce projet, j'ai été en contact avec de nombreux opérateurs privés du domaine du transport, qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma gratitude pour leur accueil ; Merci notamment à Madame Anne CHANÉ et Monsieur Thierry DEPLEUX (Comox – Véolia Transport), au président Jean-Michel DRAPEAU et au secrétaire général Francis BRETON de la Confédération de l'Artisanat et des Petites Entreprises du Bâtiment (CAPEB). Je tiens également à associer à ces remerciements Monsieur Philippe HUGUET (Newteon) ainsi que Monsieur Mickaël RICHARD (Toyota) pour avoir toujours répondu présents lors des projets et des manifestations organisées.

Un grand merci à Madame Myriam ROQUES qui est devenue mon fournisseur officiel de boules au chocolat fourrées à la crème que personne n'aime !

Je réserve enfin mes plus tendres pensées à toute ma famille et plus particulièrement à ma future femme, Emmanuelle, qui a su me soutenir dans les moments d'incertitude et à notre chère fille, Léane, qui me donne amour, joie et bonheur à chaque instant.

Introduction générale

La distribution de marchandises dans les secteurs urbains est indispensable à la prospérité de ces derniers bien que ceux-ci ne soient pas autosuffisants. Avec leur rôle économique majeur, les secteurs urbains ne peuvent pas fonctionner sans un système adapté de distribution des marchandises. Malheureusement, des problèmes liés à la distribution de marchandises en ville contraignent l'adaptabilité et l'efficacité du système de transport des marchandises. Les véhicules de distribution de marchandises engendrent de la pollution sous forme d'émissions de bruit, de polluants comme le NO_x (oxyde d'azote), contribuent au réchauffement climatique par des émissions de gaz à effet de serre tels que le CO_2 (dioxyde de carbone), concourent à l'insécurité routière et obstruent physiquement les flux des autres usagers de l'espace public. Le trafic de marchandises contribue aux problèmes d'accessibilité dans la plupart des secteurs urbains. De plus, l'efficacité de la distribution de marchandises en ville est elle-même entravée par la congestion, pouvant être plus ou moins aggravée par les mesures réglementaires qui ont été prévues pour réduire d'autres nuisances. L'ensemble des problèmes environnementaux et d'accessibilité, que ce soit pour le transport de passagers ou pour la distribution de marchandises en ville, met en danger la viabilité et le développement durable des secteurs urbains.

D'un point de vue macroscopique, plusieurs types de flux sont à envisager. Le transport d'objets arrivant de l'extérieur de la cité par l'intermédiaire de prestataires logistiques et devant être acheminés en différents lieux internes à la ville a déjà été examiné dans de nombreuses études portant sur la problématique des « 100 derniers mètres » ou du « dernier kilomètre ». Toutefois, ces démarches souvent macroéconomiques, et uniquement focalisées sur la thématique du transport, nécessitent d'être approfondies. Les décisions prises en matière de transport de marchandises reposent en principe sur des considérations rationnelles (par exemple le choix du mode de transport). Le résultat d'une telle optimisation dépend donc de la

taille et de la structure des systèmes concernés. Comme les limites du TMV (Transport de Marchandises en Ville) changent constamment, les conditions d'amélioration macroéconomique doivent également évoluer.

Ainsi, la manière dont les marchandises sont actuellement distribuées compromet l'attractivité des secteurs urbains pour leurs utilisateurs présents et surtout futurs, mettant en danger, de ce fait, leur développement économique et rôle dans la société. Dans une multitude de cas, des mesures politiques ont été proposées et mises en application pour pallier ces différents problèmes. Néanmoins, ces derniers subsistent et tendent même à augmenter.

Ces solutions sont apportées par les résultats d'évaluation de critères de performance qui permettent notamment la comparaison de plusieurs hypothèses formulées pour choisir les plus adéquates vis-à-vis de l'efficacité voulue du système. Or, l'évaluation est issue de modèles, il devient alors nécessaire de mettre en place des méthodes et outils pour élaborer et construire le ou les modèles demandés.

Un système peut être vu de plusieurs façons, plus ou moins agrégées, et selon des dimensions différentes : économique, environnementale, sociale, etc. Un degré d'agrégation faible permet une analyse fine du système au dépend du temps de calcul, une vision plus globale favorise une synthèse du fonctionnement du système mais en dénaturant parfois l'intelligibilité du système. Pour un niveau d'agrégation donné, le système peut être analysé selon une dimension particulière. Le plus souvent, toutes ces manières de voir le système répondent aux mêmes objectifs et ne sont pas prises en compte simultanément. Il semble pourtant très intéressant d'utiliser ces différentes techniques de modélisation conjointement et avoir ainsi une approche hybride de modélisation de la conception à la phase de développement d'un outil informatique.

Dans ce cadre, cette thèse a pour objectif de proposer un modèle conceptuel et une approche de simulation du TMV, pour, in fine, développer un outil d'aide à la décision au profit des autorités organisatrices de transports ayant une démarche d'amélioration du TMV. Cette thèse doit également établir une méthode de modélisation pour la simulation du transport de marchandises en ville. Le mémoire est structuré en six chapitres.

Le **chapitre 1** vise à décrire notre cadre de travail, les enjeux, les caractéristiques et la problématique générale de cette thèse. Il comporte deux parties. La première s'intéresse au contexte du TMV en explicitant les principales définitions du TMV, les marchandises concernées, leurs cycles à l'intérieur et à l'extérieur de la ville ainsi que les acteurs impliqués. La seconde partie

décrit la problématique du TMV pour une ville quelconque et justifie que l'on s'attarde plus particulièrement sur les villes de taille moyenne.

Le **chapitre 2** a pour objectif de retracer les approches expérimentées pour palier la problématique présentée dans le chapitre 1 et d'analyser leurs limites afin de dégager des pistes d'amélioration de la modélisation du TMV. Il est articulé en trois parties. La première partie propose un état de l'art des approches expérimentales pour l'amélioration du TMV qu'elles soient issues de consortium européens, nationaux ou locaux. La deuxième partie établit une liste des catégories de leviers à disposition des collectivités locales, structurée autour d'exemples significatifs, et synthétise leurs effets qu'ils soient positifs ou négatifs. Enfin, la troisième partie dresse le bilan des travaux sur la modélisation du TMV en mentionnant la particularité de ce type de modélisation, en faisant le point sur les approches de modélisation utilisées jusqu'à présent et en détaillant les principaux outils opérationnels.

Dans le **chapitre 3**, nous développons une représentation du TMV basée sur les processus décisionnels pour mettre en avant l'importance de la décision dans le système TMV, permettant ainsi d'approfondir les approches existantes du chapitre 2. Nous exprimons la problématique concernant les difficultés rencontrées pour la prise de décision dans le TMV du point de vue des autorités organisatrices de transports, en précisant les caractéristiques du système complexe de la logistique en ville. Enfin, nous proposons une représentation des différentes décisions au sein de ce système par l'intermédiaire d'un modèle conceptuel du TMV. Nous précisons la méthodologie de modélisation utilisée et l'analyse causale du système TMV mettant en avant les thèmes structurants et leurs relations de causes à effets, et, in fine, le modèle conceptuel du TMV afin de formaliser le cadre décisionnel de ce système à différents horizons, permettant le développement futur d'outils d'aide à la décision dans ce domaine.

Sur la base du modèle conceptuel du chapitre 3, le **chapitre 4** établit une approche de simulation et propose un exemple particulier de développement d'outil d'aide à la décision issu de cette approche pour traiter la problématique fondamentale de la position et du dimensionnement des aires de livraison. Ce chapitre est divisé en quatre parties. La première justifie une approche de simulation globale. La seconde partie décrit l'approche de simulation appelée CILOSA (CIty LOgistics scenarios Simulation Approach). Cette approche permet de formaliser les éléments du système TMV et leurs interactions afin d'évaluer des scénarios et favoriser l'aide à la décision par un jeu de comparaison de ces derniers. Elle est basée sur une hybridation d'approches de modélisation que sont la Recherche Opérationnelle et la Dynamique des Systèmes.

La troisième partie propose un outil de simulation DALSIM (Delivery Areas and Logistics SIMulation) développé selon l'approche de simulation CILOSA. Cet outil permet d'élaborer des scénarios sur le plan d'aires de livraison d'une ville donnée pour limiter les impacts négatifs sur le trafic de véhicules. Enfin, la quatrième partie propose notre réflexion sur la véritable utilité d'un outil de simulation manipulé par les collectivités locales, pour la compréhension du système et la prise de décision et se focalise sur les apports d'un outil proposant des simulations numériques.

Le **chapitre 5** expose la méthodologie de mise en œuvre d'une démarche d'amélioration permettant l'identification des problématiques à traiter pour développer, à partir de CILOSA, des outils d'aide à la décision et proposant sur un cas concret la nécessité de l'outil de simulation du chapitre 4. Cette méthodologie repose sur la définition des objectifs, la caractérisation de la ville, la conception globale des solutions, l'évaluation et l'élaboration d'un schéma directeur d'actions à mettre en œuvre. Puis, il positionne la méthodologie proposée par rapport à l'existant et précise le retour d'expériences de la concertation avec les acteurs de La Rochelle.

Enfin, le **chapitre 6** détaille la validation de l'outil de simulation construit et appliqué sur la Communauté d'Agglomération de La Rochelle après avoir décrit le contexte de ces travaux. Il est ainsi présenté la recherche de solutions issues de la concertation avec les acteurs du domaine, la caractérisation de La Rochelle pour le TMV, la simulation du plan existant d'aires de livraison et les propositions d'amélioration, le tout basé sur une analyse critique des résultats. L'outil est ensuite utilisé comme outil d'aide à la décision dans la Communauté d'Agglomération de Poitiers (CAP) pour en dégager les fonctionnalités dans les services techniques. Enfin, un bilan est dressé sur la manière dont les acteurs ont réagi vis-à-vis de l'outil de simulation.

Pour résumer, cette thèse propose un modèle conceptuel et une approche de simulation du transport de marchandises en ville, pour, in fine, développer un outil spécifique d'aide à la décision au profit des autorités organisatrices de transports avec pour objectif l'amélioration du TMV. Nous proposons de présenter cette démarche en nous appuyant sur le projet européen SUCCESS du programme CIVITAS où l'agglomération de La Rochelle est prise comme pilote pour la validation de nos travaux. A partir des modèles présentés dans cette thèse, il est possible de concevoir des outils de diagnostic et d'aide à la décision qui peuvent jouer un rôle majeur dans l'identification de solutions à moyen terme. Ces outils permettent de formali-

ser des situations hypothétiques afin de mesurer les conséquences des futures décisions que doivent prendre irrémédiablement les autorités pour faciliter la circulation urbaine. Le retour d'expériences de la Communauté d'Agglomération de Poitiers indique que ces outils sont particulièrement appréciés pour leur capacité à fournir une base de réflexion lors des dialogues et débats avec les acteurs impliqués dans la logistique urbaine.

Chapitre 1

Contexte et Problématique du TMV

Sommaire

1.1 Introduction **2**

1.2 Contexte **2**

1.2.1 Définition du Transport de Marchandises en Ville 2

1.2.2 Quelles marchandises ? 4

1.2.3 Acteurs du TMV 6

1.3 Problématique **8**

1.3.1 Problématique pour une ville 8

1.3.2 Une problématique d'une grande variété 18

1.3.3 Une problématique au centre de nombreuses contradictions 19

1.3.4 Problématique pour une ville de taille moyenne 20

1.4 Conclusion **22**

1.1 Introduction

Le TMV demeure aujourd'hui un domaine dans lequel une source d'optimisation potentielle pour le décongestionnement des villes est envisageable puisqu'il n'a pas fait l'objet d'études particulières en France, ni en Europe avant les années 90. Cependant, l'enjeu est de taille, car à l'heure où les comportements des acteurs sont difficilement influençables, où les cultures politiques n'ont pas encore totalement intégré les marchandises dans les stratégies de développement de la ville, il subsiste un flou juridique et technique sur les moyens à mettre en œuvre pour considérer les marchandises au même titre que les passagers dans le système de transport urbain. Afin de mieux comprendre les différents enjeux, économiques, fonctionnels, environnementaux et de mobilité, il est nécessaire d'éclairer la problématique du TMV et de la situer dans son contexte. Ce premier chapitre balaye le TMV dans son ensemble et propose une revue synthétique englobant ses éléments constituants que sont les acteurs, les marchandises et leurs interactions, la problématique générale, les enjeux et un état de l'art des approches, modèles et outils existants du TMV. L'objectif, in fine, est de rendre compte de la situation actuelle et d'identifier les pistes d'amélioration en particulier pour la modélisation du TMV.

Dans la première partie, nous décrivons le contexte actuel en explicitant quelques définitions du TMV les plus connues de la littérature, les marchandises concernées, et la typologie d'acteur du domaine.

La deuxième partie détaille la problématique et les enjeux du TMV de manière générale et nous expliquerons en quoi la problématique d'une ville de taille moyenne est particulière.

1.2 Contexte

1.2.1 Définition du Transport de Marchandises en Ville

Selon le Ministère des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer, le transport de marchandises en ville est constitué de trois éléments essentiels [Ministère, 2006] inspiré des travaux du Laboratoire d'Économie des Transports [LET, 2001] :

- les flux relatifs aux établissements commerciaux, industriels ou tertiaires du secteur privé ;
- les déplacements effectués par les particuliers pour s'approvisionner, qui sont appréhen-

dés à partir des enquêtes « déplacements » auprès des ménages. Compte tenu de la place importante qu'ils occupent, la recherche se poursuit actuellement dans ce domaine (pratiques d'achats, liens socio-économiques entre logique commerciale et logique d'approvisionnement) ;

- les autres flux désignés comme flux « annexes » sont les flux de marchandises occasionnés par les autres activités telles que le transport de déchets, les besoins propres des services publics, les déménagements, les livraisons à domicile, les services postaux, les hôpitaux ;
- les transports de marchandises réalisés en deux roues et par voie ferrée ne sont pas pris en compte parce qu'ils ne contribuent pas de manière significative à la congestion urbaine.

D'autres définitions plus précises sont proposées notamment par Laetitia Dablanc où elle définit dans [Dablanc, 2007b] le transport des marchandises en ville comme le transport de biens effectué par ou pour des professionnels (où la notion de professionnel, ici, s'oppose à celle de ménage) dans l'espace urbain. Cette définition précise celle donnée par le Ministère des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer, en ce sens qu'elle exclut le transport pour achats et permet l'intégration du trafic de transit qui se déroule en ville même si aucune activité n'est approvisionnée.

Enfin, une dernière définition, plus générale, est donnée par Taniguchi dans [Taniguchi *et al.*, 2001] et [Taniguchi et Thomson, 2002]. Il définit la logistique urbaine ou plutôt la « City Logistic » comme étant :

« The process of totally optimising the logistics and transport activities by private companies in urban areas while considering the traffic environment, traffic congestion and energy consumption within the framework of a market economy. »

Cette définition s'oriente davantage vers les métiers logistiques au sens industriel du terme et beaucoup moins sur l'aspect transport. De surcroît, la question de consommation de l'espace public n'est pas évoquée car le point de vue des autorités organisatrices de transport n'est pas pris en compte. En effet, le transport de marchandises peut être étudié selon plusieurs points de vue et il devient très difficile de fonder une définition englobant toutes les marchandises et les activités, tous les acteurs et les processus associés en restant applicable aux contextes particuliers des villes.

Nous retenons finalement des diverses définitions du TMV, qu'il concerne tout déplacement de marchandises à l'intérieur de la ville sans qu'il y ait vocation première de transport de pas-

sagers. Ainsi, nous ne considérerons pas une personne utilisant sa voiture pour se déplacer sur son lieu de travail. Cette situation est à vocation première de déplacement de personne, même si dans l'absolu la voiture (qui est une marchandise) est déplacée. Nous retenons également que vouloir définir le TMV sous une vision particulière ne peut pas être complet. En essayant de globaliser les définitions citées pour essayer de donner une vision générique sans qu'elle soit orientée (que ce soit transport, économique, logistique...), la difficulté est, in fine, de rester neutre. Ainsi, dans cette thèse, nous retiendrons le TMV comme étant :

« Les déplacements de tout bien, qui n'a pas pour premier but le déplacement de personnes, dont l'origine et/ou la destination est localisée en zone urbaine. »

Cette définition comprend tout type de biens, de modes de transport et d'acteurs et permet de décrire les déplacements de marchandises sans point de vue particulier.

1.2.2 Quelles marchandises ?

Partant du postulat que, au sein d'une agglomération, (presque) tout ce qui n'est pas transport de passagers peut être considéré comme du transport de marchandises, le domaine des recherches est constitué de composants et de sous-systèmes très différents. D'un point de vue macroscopique deux types de flux sont à envisager : les objets arrivant ou sortant d'une agglomération et les objets circulant à l'intérieur.

L'expression « Transport de Marchandises en Ville » est utilisée ici comme le transport des marchandises au départ ou à destination des secteurs urbains et comporte les livraisons des biens de consommation dans les magasins, supermarchés, hôpitaux, bureaux ou directement chez le client mais aussi les achats par les ménages, le transport de matériaux de construction, de déchets et de produits des secteurs industriels. Le TMV, c'est également le transport de l'eau, de gaz et d'électricité pour l'approvisionnement des particuliers comme des professionnels via des modes de transport particuliers. Ces marchandises ne sont pas prises en compte dans ce travail de recherche, puisque le transport de ces marchandises est effectué via un réseau autre que le réseau routier urbain et n'altère en rien les conditions de trafic. En revanche, l'eau et le gaz conditionnés sont des marchandises considérées dans cette thèse lorsqu'ils font l'objet d'un transport routier.

En tenant uniquement compte du contexte de la ville, il est aussi nécessaire de bien distin-

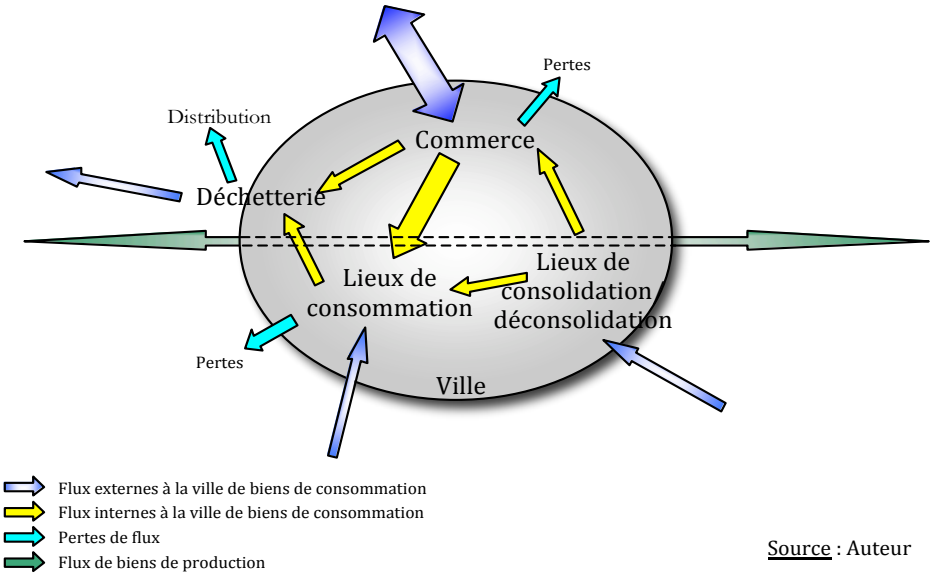


FIG. 1.1 – Flux de marchandises en ville

guer les deux types de biens : les biens de consommation et les biens de production. Le bien de consommation est un bien destiné à la satisfaction d'un besoin chez un consommateur : il s'agit donc d'un bien destiné à un usage normalement non productif d'un point de vue économique. Le bien de production est un bien fabriqué et acquis par l'entreprise dans le but de produire d'autres biens ou des services. Or, il est primordial de considérer ces deux types de bien si l'on veut une certaine exhaustivité dans notre démarche. Ainsi, les flux des artisans par exemple sont pris en compte.

Dans les zones urbaines, les marchandises les plus présentes sont les biens de consommation. La Figure 1.1 représente les flux de biens de consommation et les biens de production. Au sein de la ville, les biens de consommation contribuent largement aux flux totaux de marchandises du réseau urbain et trouvent leur point de vente à l'intérieur de la ville tandis que les biens de production ne font que transiter et ont une destination généralement hors de la ville.

Cette représentation donne les tendances globales des flux au sein d'une ville. Même si les biens de consommation sont effectivement majoritaires dans les zones urbaines, il peut exister, de véritables unités de production en ville.

Pour comprendre le cheminement des marchandises dans une ville, il paraît important de

bien recadrer le contexte, à savoir la ville mais aussi son environnement.

De manière générale, le transport des biens forment un cycle [Routhier, 2002]. Les marchandises sont transformées sur des lieux de production et transitent entre ces lieux de production ; elles sont, suivant la politique de l'établissement qui les vend, transportées jusqu'aux magasins de détail, intermédiaires ou le client final (le consommateur) qu'il soit particulier ou professionnel. Les différents déchets sont collectés et acheminés vers des déchetteries puis transportés jusqu'au centre de destruction et de revalorisation des déchets hors de la ville. Les matières premières recyclées sont employées pour fabriquer de nouveaux produits. Le chemin que déterminent les marchandises forme, d'un point de vue global, une boucle.

1.2.3 Acteurs du TMV

Dans le TMV, une multitude d'acteurs interviennent et sont clairement identifiés. Dans la littérature, ils se déclinent en quatre groupes qui ont notamment été définis par Taniguchi [Taniguchi *et al.*, 2001] que sont les détenteurs de fret, les opérateurs de transport, les habitants et usagers et les institutionnels. Ils ont été, par la suite, classés en deux catégories : nous retrouvons les acteurs de la sphère économique et les acteurs de la sphère urbaine [Routhier, 2002], ouvrage inspiré de [CERTU-ADEME, 1998]. Nous avons complété la liste de manière à faire apparaître les acteurs mixtes qui appartiennent simultanément à plusieurs catégories définies par Taniguchi :

- les **détenteurs de fret** : ou en encore appelés les fournisseurs [Barceló et Hanna Grzybowska, 2005]. Les détenteurs de fret sont ici considérés comme les maillons de la chaîne logistique. Les marchandises transitent entre ces maillons, le rôle de ces acteurs peut être donc double (expéditeur/ destinataire) ; leur comportement est contraint par la demande de marchandises, ce qui, en amont de la chaîne logistique, conditionne leurs besoins en termes de quantité, de délai et de fréquence de livraison. Ces acteurs sont les clients des opérateurs de transport, il peut s'agir des chargeurs, producteurs ou encore distributeurs ;
- les **opérateurs de transport** : ces acteurs sont directement impliqués, à des niveaux de responsabilité différents, dans la gestion des flux de marchandises à destination et/ou au départ des agglomérations. Ces opérateurs organisent les tournées, ont des rôles de prestataires logistiques, définissent les ruptures de charge et participent ainsi directement au trafic routier dans les secteurs urbains avec une flotte de véhicules plus ou moins adaptés

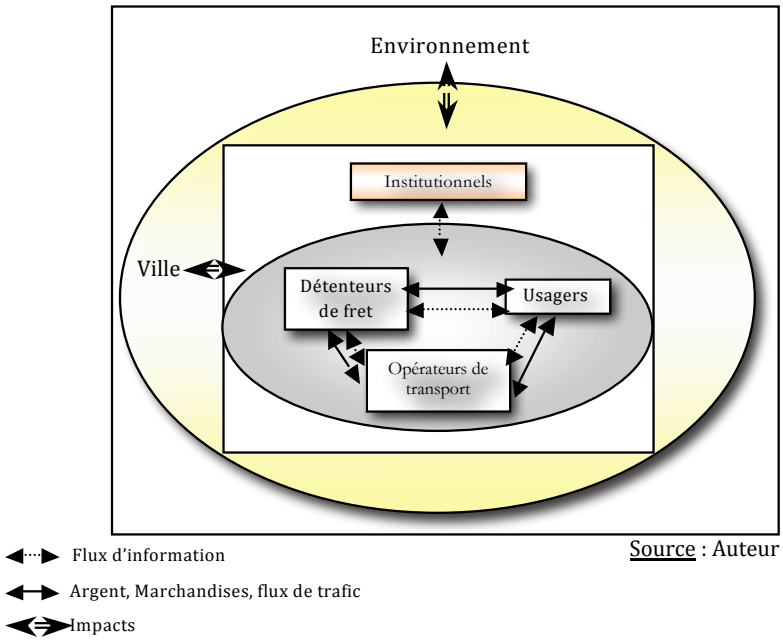
à ces milieux. Ces acteurs exécutent les fonctions logistiques[1] et de distribution ;

- les **habitants et usagers** de l'agglomération : ce sont les usagers du système de transport urbain, habitant et travaillant dans les secteurs urbains ou visitant (touristes) ;
- les **institutionnels** : cette catégorie comprend les élus (des collectivités locales et des chambres consulaires), les services techniques (gestionnaires de l'espace public et des infrastructures de transport), les services de police et de sécurité, etc.... Ils sont directement impliqués dans le volet « marchandises » des Plans de Déplacements Urbains (PDU) [Dablanc et Thévenon, 2000]. Leur rôle est de promouvoir toute activité pour le développement économique durable des secteurs urbains ;
- les **mixtes**. En effet, on peut introduire une nouvelle catégorie d'acteurs de la sphère économique. Cette catégorie regroupe les acteurs transversaux qui peuvent avoir plusieurs casquettes, comme les artisans et les services qui sont à la fois détenteurs de fret et opérateurs de transport.

Chaque comportement, relatif aux acteurs, influe directement sur l'efficacité du TMV. Les problèmes engendrés n'ont pas de responsables attitrés mais sont les conséquences des interactions de chaque acteur : le TMV est l'affaire de tous. D'un point de vue systémique, la logistique en ville se compose de sous-ensembles faisant participer différents détenteurs de fret, opérateurs de transport, habitants et institutionnels comme le propose la Figure 1.2.

Les acteurs mixtes ne sont pas représentés sur le schéma. Un acteur mixte couvre plusieurs catégories d'acteurs, par conséquent il aura les relations issues de ces catégories d'acteurs. Les opérateurs de transport, les détenteurs de fret et les habitants/usagers échangent des flux d'information, d'argent et de marchandises entre eux. Les institutionnels échangent des flux d'information avec le reste des acteurs. Tous les acteurs contribuent à l'évolution du TMV et par conséquent génèrent des impacts bénéfiques ou non (qu'ils soient économiques, sociaux, environnementaux, etc.) sur la ville, qui elle-même influe sur son environnement.

[1] Les fonctions logistiques recouvrent les actions d'organisation des flux, de planification, de relation au client en amont (commandes), de gestion des stocks, de transport et de mise à disposition, de relation au client en aval (délais, taux de service).



Source : Auteur

FIG. 1.2 – Interactions des acteurs dans le TMV

1.3 Problématique

Dans cette section, nous développons la problématique du TMV pour une ville quelconque ; montrons en quoi cette problématique est difficile et décrivons la problématique dans un cadre plus spécifique, celui de la ville de taille moyenne.

1.3.1 Problématique pour une ville

Selon Boudouin et Morel dans [Boudouin et Morel, 2002], les enjeux du TMV sont nombreux et peuvent être classés selon quatre catégories dont nous nous inspirons :

- les enjeux liés à l'**accessibilité et à la mobilité** des espaces urbains, car la fréquentation et l'occupation de l'espace sont en effet intimement liées à son accessibilité tant pour les personnes que pour les marchandises ;
- les enjeux **fonctionnels** s'adressent à la ville dans son ensemble et plus particulièrement sont une réponse technique aux besoins de circulation en insérant les flux de marchandises

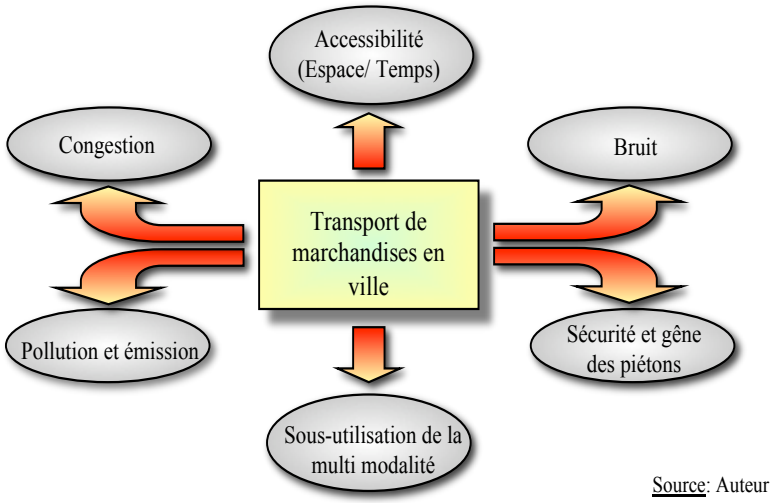


FIG. 1.3 – Impacts négatifs du TMV

dans le trafic global. On retrouve ici les concepts de fonction de système[2] (qui est la ville) liés aux objectifs du système [Le Moigne, 1994] ;

- les enjeux à **caractère économique**, puisque la performance de l'activité TMV est liée à la qualité et à l'efficacité de la desserte des marchandises ;
- les enjeux **environnementaux et sociétaux** ont des répercussions directes sur la qualité de vie et sont désormais au cœur de tous les débats sur l'aménagement du territoire.

Chaque enjeu est développé plus en détail dans les paragraphes suivants. La distribution efficace de marchandises devient un critère de différenciation essentielle et concurrentielle pour les villes, mais est associée à plusieurs types de problèmes en particulier dans le centre urbain. La Figure 1.3 présente les impacts négatifs du TMV.

Chaque acteur essaie de trouver sa propre solution au problème. Dans la plupart des cas, ces solutions mènent à une situation moins optimale du point de vue social et économique. Pour cette raison, les autorités locales, aussi bien que les instances régionales et nationales, sont intéressées pour résoudre les problèmes liés à la distribution urbaine de marchandises d'un point de vue global.

[2] « Un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique organisés en fonction d'un but »[De Rosnay, 1996]. D'après cette définition, considérer une ville comme un système semble pertinent. Cette réflexion sera approfondie dans le chapitre 3.

1.3.1.1 Enjeux d'accessibilité et de mobilité

Les problèmes d'accessibilité, d'un point de vue "Transport de Marchandises en Ville", se réfèrent principalement à la qualité d'accès du centre-ville. Or, depuis une quinzaine d'années, les centres historiques des villes sont souvent réglementés par des restrictions horaires, de charge, ou de taille, ou font l'objet de zones à accès contrôlé que les autorités locales instaurent pour améliorer la qualité de la vie. Parallèlement, il existe une demande croissante du transport des marchandises due à la croissance économique. La congestion, les restrictions sur les véhicules, et les infrastructures elles-mêmes conditionnent les pratiques de livraison et donc l'efficacité du transport de marchandises en ville.

Les problèmes d'accessibilité impliquent des coûts plus élevés pour déplacer les marchandises, mais ils mènent également à une augmentation de consommation de carburant et, en cas de congestion, à un usage intensif des systèmes de transmission, au stress des conducteurs et à une hausse du risque d'accidents [Bhat *et al.*, 2002]. Actuellement, il n'y a aucune évaluation des coûts de cette accessibilité réduite.

La demande de livraisons plus fréquentes, en plus petites quantités (comme la livraison JAT « juste à temps » et bien d'autres concepts améliorant la productivité industrielle [Molet, 1999]), combinée à des plages horaires d'ouverture des magasins restrictives, atténuent l'efficacité des livraisons. De plus, les exigences des expéditeurs ne cessent de croître, faisant des demandes plus rigoureuses de délai de livraison, de fiabilité, de fréquence et bien sûr au moindre coût. Le TMV est ainsi soumis à une pression constante pour obtenir les coûts minimum à chaque étape de la distribution tout en évoluant dans un contexte dont l'accessibilité devient plus contrainte.

Le problème d'accessibilité est le plus important puisqu'il est lié directement ou indirectement à tous les problèmes décrits précédemment. L'enjeu sous-jacent est d'améliorer la desserte des zones difficiles d'accès sans pénaliser la qualité de vie des citoyens tout en se focalisant sur le caractère durable de la mobilité urbaine. Or, il est essentiel pour les centres urbains qu'ils maintiennent leurs fonctions économiques et sociales. Paradoxalement, une amélioration de la vitalité économique des centres urbains mènera probablement à des demandes plus rigoureuses sur le TMV. Cette remarque met en évidence le fait que le TMV est au cœur d'intérêts contradictoires que nous développons dans le paragraphe 1.3.3.

De manière générale, nous retenons que les problèmes d'accessibilité sont liés à :

- l'accès réduit dû aux restrictions des horaires de livraison, de charge ou de taille des véhicules et aux zones d'accès contrôlé ;
- la congestion intra urbaine et péri urbaine ;
- l'infrastructure du réseau : les caractéristiques, les dimensions physiques des rues, la localisation et la dimension des aires de livraison.

L'amélioration de l'accessibilité mène à une efficacité, à une performance accrue de la distribution urbaine de marchandises et a des impacts considérables sur les opérations de transport (coûts inférieurs et utilisation plus élevée), indirectement sur le temps des tournées (réduction des coûts de personnel, de matériel et de carburant) et finalement sur la logistique (réduction de coûts de stocks).

Les gains d'efficacité peuvent également avoir des effets et produire des changements macroéconomiques sur la structure urbaine, provoqués par des différences spatiales dans l'accessibilité. Bien qu'il soit difficile de mesurer la plupart de ces conséquences, elles jouent un rôle important lié à l'accessibilité. La mesure peut être traduite par des indicateurs, et dans ce cas, il est approprié de faire une distinction entre l'accessibilité elle-même (la qualification par un individu) et l'importance de l'accessibilité pour un groupe (la qualification globale de l'accessibilité comme question de l'agrégation). Hilbers et Verroen, [1993] et Pirie, [1979] fournissent une base théorique et une grande variété d'indicateurs pour l'accessibilité tenant compte du niveau d'agrégation. La plupart de ces indicateurs suggèrent seulement l'importance ou la pertinence de l'accessibilité plutôt que de révéler le niveau de l'accessibilité lui-même.

1.3.1.2 Enjeux fonctionnels

La logistique urbaine assure la livraison des magasins de détail, les livraisons à domicile, la livraison sur demande en coordination avec les services de stockage, la « reverse » logistique ou logistique inverse, les enlèvements de marchandises à la demande des magasins de détail ou de points de stockage et les enlèvements à domicile [Köhler et Strauß, 1997], [Visser, 2000], [Visser *et al.*, 1999], [Ruske, 1994], [Patier et Routhier, 1997], [Binsbergen et Visser, 2001]. Le partage de l'espace public entre les différents acteurs pour assurer ces fonctions devient une problématique à part entière, puisque sur un même réseau de transport, les passagers et les marchandises cohabitent. Les deux flux de nature opposée interagissent et se freinent mutuellement. Ils ne sont donc pas complémentaires et sont générateurs de conflits. En effet,

ces deux types de transport utilisent le même réseau viaire, mais n'ont ni les mêmes fonctions, ni les mêmes caractéristiques. Les passagers sont de nature active, effectuent les correspondances, stationnent, débarquent, embarquent, traitent l'information et choisissent leur mode de transport selon leurs utilités (parfois même de manière irrationnelle). Les marchandises sont passives, doivent être chargées/déchargées, transférées, et les gestionnaires logistiques ont la responsabilité de traiter l'information et de choisir les modes de transports de manière rationnelle (souvent les moins coûteux).

A chaque mode de transport est associé son réseau comme le bateau/fleuve, automobile/route, bicyclette/piste cyclable, bus/site propre. Et le transport de marchandises peut être associé à tous les réseaux que ce soit routier, fluvial, etc. Alors, face à ce constat, le transport de marchandises est vu comme un parasite à chaque mode qu'il s'agit d'intégrer de manière globale dans la planification urbaine. Le transport de marchandises surenchérit par rapport à la problématique du transport en général par l'ajout de nouvelles fonctions : charger/décharger, livrer, approvisionner les commerces et les citoyens, déménager, évacuer les déchets, fournir les matériaux de construction, etc.

1.3.1.3 Enjeux économiques

Si l'on se place d'abord du point de vue de l'efficience et de la croissance économique, il n'est pas trop difficile de définir le problème central. Les économies d'agglomération alimentent la croissance des villes, que ce soit l'étalement urbain, le développement des activités économiques ou de la démographie. À mesure que les villes grandissent, et en particulier à mesure qu'elles s'enrichissent, le parc de véhicules augmente demandant des capacités de réseau toujours plus importantes. Or, l'espace disponible pour le réseau est très contraint et devient très rare d'autant plus que l'espace urbain est de plus en plus sollicité par d'autres usages et usagers (terrasses, travaux, stationnements). L'étalement spatial des agglomérations accroît les distances parcourues et en particulier la longueur moyenne des tournées, de sorte que la circulation continue d'augmenter même si le nombre total de véhicules reste stable. Il en résulte une aggravation de la congestion et de la pollution atmosphérique. Ces deux phénomènes sont à l'origine d'un gaspillage de ressources et freinent la croissance économique des villes. L'encombrement de la voirie entrave les mouvements de marchandises. L'un des objectifs de la stratégie de transport de marchandises est donc souvent de trouver le moyen de concilier la

croissance de la ville avec la préservation de son efficience économique. Selon certains courants de pensée, c'est là une tâche impossible, en tout cas pour les mégalopoles, car ces villes sont simplement devenues trop grandes pour pouvoir être efficaces [Binsbergen et Visser, 2001]. Pour eux, une solution serait de transférer l'activité hors des mégalopoles et de concentrer le développement dans les villes de taille moyenne. Malheureusement, on connaît mal le seuil à partir duquel disparaissent les économies d'agglomération. En outre, l'expérience montre que les politiques de déconcentration sont très difficiles à mettre en œuvre [Orfeuil, 2000]. D'autres placent leurs espoirs sur la planification et l'aménagement d'un réseau adéquat et bien structuré parallèlement à la croissance de la ville. Pour les nouvelles agglomérations ou celles qui commencent à se développer, la voirie constitue manifestement un élément indispensable de l'infrastructure urbaine. Un réseau routier d'une capacité inférieure au volume du trafic entraîne des encombrements, compromet l'économie urbaine et aggrave les nuisances environnementales. Il s'agit donc, au stade de l'élaboration de la stratégie de transport urbain, de planifier l'infrastructure requise (y compris, mais non exclusivement les équipements routiers), de réserver l'espace nécessaire à ces aménagements, de définir correctement la structure hiérarchique du réseau viaire et de prévoir les moyens financiers indispensables au bon entretien de la capacité routière économiquement soutenable. La prise en compte du TMV dans la planification est un phénomène récent, et il semble que les autorités européennes ignorent toujours les conditions du TMV parce que le transport de personnes est encore le souci le plus important [Emberger, 2004].

On a tendance à montrer du doigt le transport et plus particulièrement l'efficacité du transport de marchandises dans les problématiques économiques. Une fausse idée que nous rappelle Michel Savy en nous remémorant que si la croissance économique s'est traduite par une forte augmentation du transport de marchandises, celle-ci s'est accomplie à circulation routière constante [Savy, 1998]. Et par une hausse de la productivité du transport et de la logistique plus généralement, la hausse de la circulation routière n'a été que de 3% alors qu'entre 1990 et 2000, le trafic de marchandises intérieur a augmenté de 30% et le trafic de transit de 70 % [ADEME, 2006b]. En revanche, une mauvaise desserte ne permet pas l'autosuffisance de l'économie locale.

Les problèmes économiques sont une conséquence indirecte de l'inefficacité de la desserte d'une zone et d'un manque d'attractivité évident. Alors, la question de la validité d'une politique de restriction des gabarits pour contraindre les flux se pose. Malheureusement, on ne connaît pas, ou mal, les seuils pour lesquels les commerces sont affectés par une mauvaise des-

serte [Boyer, 2004], [Victoria Transport Policy Institute, 2006]. Et, la baisse de l'attractivité d'une zone peut être la conséquence d'une mauvaise gestion des flux de camions et des gênes physiques.

1.3.1.4 Enjeux environnementaux et sociétaux

Tandis que le trafic de marchandises en ville est essentiel et nécessaire pour l'approvisionnement des magasins et donc pour l'économie locale, il produit également des coûts marginaux élevés en augmentant les émissions de polluants (comme les particules, les oxydes d'azote NO_x, le dioxyde d'azote NO_2, les hydrocarbures HC et le dioxyde de soufre SO_2 même si ce-dernier devient un enjeu de moins en moins important pour le transport), de gaz à effet de serre (comme le dioxyde de carbone CO_2, le méthane CH_4) et le bruit. Même si les camions ne représentent que 10% seulement du transport dans les secteurs urbains, ils produisent plus de 40% de la pollution et du bruit provoqués par le trafic local [COST 321 Action, 1998] en véhicules kilomètres. Et les prédictions ne sont pas optimistes dans la mesure où d'après le Sustainable Urban Transport Plan de 2007 [SUTP, 2007] (qui confirme celui de 2005 [Rupprecht Consult, 2005]), 45% de la consommation d'énergie fossile liée au transport concernera le transport de fret et l'augmentation des $tonnes.kilomètres$ est estimée à 63%. Enfin, d'après les grandes enquêtes TMV dans les villes de Bordeaux, Marseille et Dijon [Ambrosini *et al.*, 1997, 1999a, 1999b], le nombre moyen de livraisons-enlèvements générés est de un par employé et par semaine, ce qui laisse très vite comprendre le nombre important de mouvements résultant.

Le trafic de marchandises contribue donc d'une façon disproportionnée à la pollution et ainsi à la réduction de la qualité de vie en ville. Le trafic de marchandises participe également à une grande part des problèmes locaux de sécurité routière.

D'après Eurostat, les émissions en CO_2 de la part du transport routier ont augmenté de près de 28 points en treize années (Figure 1.4).

Des tentatives de résolution des problèmes afin de maintenir une qualité de vie et d'assurer l'attractivité de certains secteurs pour les visiteurs ont été réalisées, limitant le trafic de marchandises à certains itinéraires et/ou à certaines périodes. Ces solutions ont posé leurs propres problèmes, comme la dégradation de l'accessibilité aux magasins en ville à certains endroits et certaines périodes pour le trafic de marchandises et la congestion résultante. Ces actions font partie des leviers possibles pour une autorité organisatrice de transport afin d'améliorer le tran-

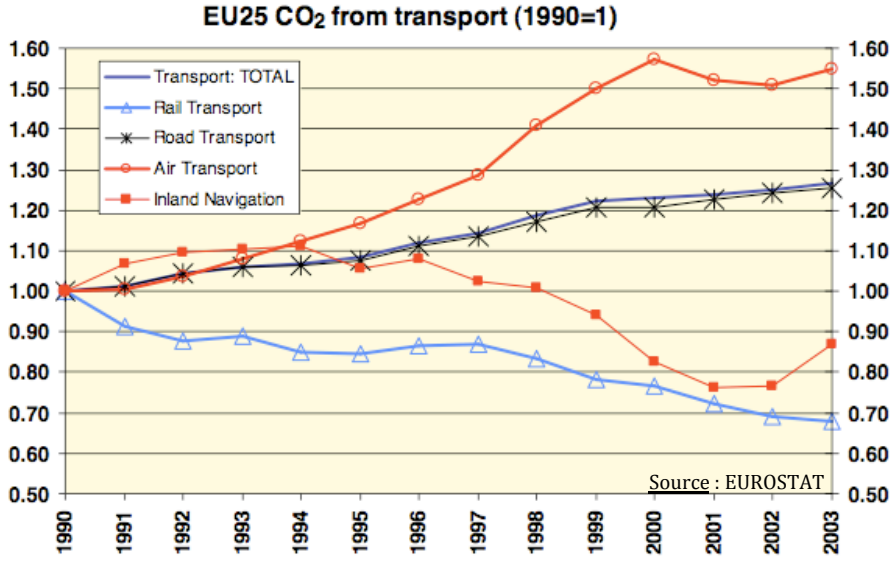


FIG. 1.4 – Évolution des émissions de CO_2 dans le transport

sit des marchandises en ville, leviers que nous développons dans le deuxième chapitre.

Cependant, la préoccupation face aux nuisances environnementales n'est pas récente. Dès que les hommes ont vécu nombreux dans un espace restreint, c'est-à-dire dans des villes, ils ont souffert, par exemple du bruit occasionné par leurs semblables et s'en sont plaint. Dès l'Antiquité, Jules César avait compris que les rues de Rome étaient impropres à la circulation, c'est pourquoi il avait interdit l'accès de la ville aux chars, du coucher au lever du soleil. Sur cette logique, la problématique du TMV pourrait être traitée en s'inspirant d'un des premiers textes de loi, si ce n'est le premier, où en 125 après Jésus Christ, a été énoncé le décret qui sera voté après sa mort :

Après le lever du soleil et jusqu'aux abords du crépuscule, il ne sera plus toléré de chariots en déplacement à l'intérieur de l'Urbs.

Une version complète latine existe avec plus ou moins d'hypothèses sur les lettres utilisées mais pour des questions de lisibilité, nous proposons dans l'encadré une version italienne qui reprend en trois paragraphes la loi en question, la *Lex Julia Municipalis*.

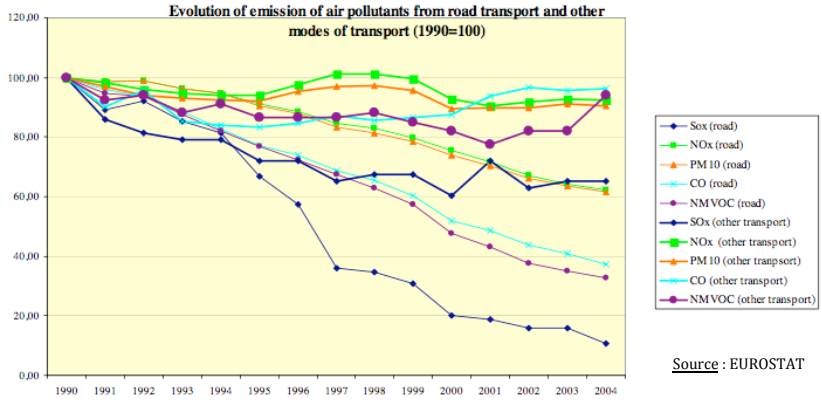


FIG. 1.5 – Évolution de la pollution du transport routier et des autres modes

Dal primo gennaio prossimo nessuno potrà più usare o condurre carri nelle vie della città di Roma dal sorgere del sole fino alla decima ora, tranne che per trasportare materiali da costruzione per i templi degli dei immortali o per altre grandi opere pubbliche, o per asportare i materiali di demolizione.

La concessione vale solo ed esclusivamente in questi casi. é permesso che circolino in città i veicoli delle vergini Vestali, del Re dei Sacrifici, dei Flamini in occasione di pubblici sacrifici, il carro del trionfatore, i carri da corsa nei giorni in cui vi sono corse in Roma e nel raggio di un miglio dalla città, e quelli delle processioni del circo.

Godono di questo privilegio i veicoli entrati in città durante la notte o quelli adibiti al trasporto delle immondizie.

Lex Julia Municipalis

SOURCE : TABULA HERACLEENSIS

Vulgo lex Iulia municipalis /The Table of Heraclea

Le problème environnemental, le plus prégnant dans la plupart des villes, reste la pollution atmosphérique locale. La Figure 1.5 montre l'évolution de ces dernières années pour chaque polluants selon le mode utilisé : la route ou autre mode. Sur cette figure, on constate notamment une tendance à la diminution des polluants en général, ce qui est encourageant. En revanche, deux polluants se distinguent par une stagnation de leurs niveaux, il s'agit des particules PM 10 et les oxydes d'azote NO_x très liés au trafic routier, mode majoritairement utilisé pour le TMV.

Concevoir une stratégie appropriée, avec des ressources limitées, pour pallier ce problème exige l'identification soigneuse des priorités, en choisissant des cibles et en choisissant des leviers possibles. De nombreux facteurs affectent la quantité de polluant émise par les véhicules motorisés. Nous retrouvons le volume de trafic, la proportion de chaque type de véhicule (voitures, camions, autobus, etc.), la vitesse, les types de carburant utilisés (essence ou diesel), le vieillissement et entretien des véhicules [Schoemaker *et al.*, 2006], [Binsbergen et Visser, 2001]. Le volume de trafic détermine majoritairement la quantité de polluants émise. Plus le volume de trafic est important, plus il y a d'émissions de polluants près des chaussées et des intersections congestionnées.

La pollution atmosphérique n'est pas le seul problème environnemental, les vibrations, les gênes physiques (pollution visuelle) et le bruit provoqués altèrent le caractère durable du TMV et plus généralement celui des secteurs urbains.

Le bruit engendré par le transport semble être considéré beaucoup moins sérieusement dans les pays en voie de développement que dans les pays développés. Des études des dommages physiques causés par l'exposition au bruit ont été menées. Les niveaux expérimentés dans des rues de pays développés approchent mais ne dépassent pas les limites inférieures au-dessus desquelles le bruit est considéré comme un risque [Binsbergen et Visser, 2001], [Geroliminis et Daganzo, 2005] et [Ang-Olson *et al.*, 2005]. Les enquêtes d'attitude ne montrent pas le bruit urbain engendré par le transport comme un risque sérieux. Les niveaux sonores ne présentent apparemment pas de risque majeur, mais il faut noter que la qualité de vie est atteinte par le niveau de bruit tel qu'il est actuellement dans nos villes. La diminution du bruit n'est donc qu'une forme de confort, ce qui diffère de la pollution qui touche la santé.

D'autres enjeux existent, notamment la sécurité. Le trafic de gros volumes sur le réseau routier peut rendre les rues dangereuses et difficiles à traverser. En Europe, le nombre de victimes sur les routes diminuent, à en constater la Figure 1.6.

Un exemple marquant est celui de Jakarta où les businessmen prennent, par habitude, des taxis juste pour traverser les voies les plus occupées. Les barrières, les passerelles ou encore les tunnels peuvent réduire le danger mais augmentent la séparation, en particulier dans les pays où ces équipements semblent être construits et localisés pour améliorer le flux de véhicules motorisés plutôt que pour aider les piétons. Enfin les accidents de circulation urbaine impliquant un utilitaire ont augmenté de manière générale, comme par exemple dans l'agglomération de

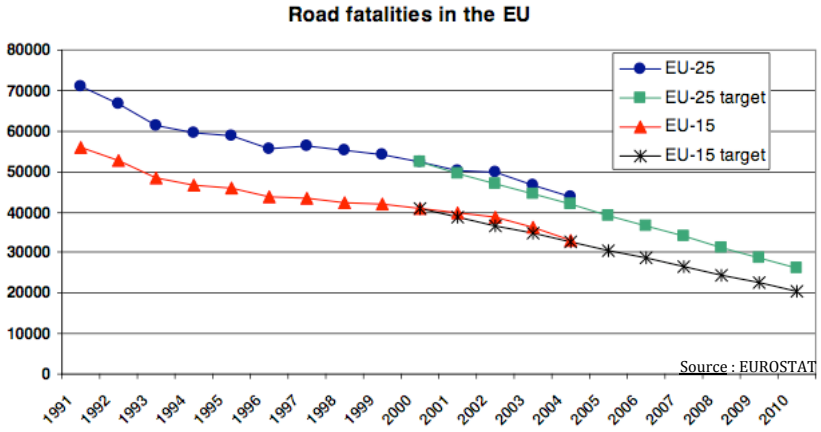


FIG. 1.6 – Évolution des victimes de la route et objectifs à 2010 de l'Europe des 15 et de l'Europe des 25

Bordeaux entre 1992 et 1995, le taux d'implication des utilitaires dans les accidents de la route est passé de 7% à 12% [Routhier, 2002].

1.3.2 Une problématique d'une grande variété

La ville, vue d'une manière agrégée, est concernée par une multitude de chaînes logistiques et l'ensemble de toutes les chaînes logistiques existantes constitue un sous-ensemble du Transport de Marchandises en Ville. Améliorer le TMV, c'est pouvoir améliorer à l'échelle d'une ville l'ensemble de toutes les chaînes logistiques. Or, le TMV dépend de la demande de marchandises à l'intérieur d'une chaîne logistique. Les tendances de cette demande sont contraintes par la réduction des stocks, une taille plus petite des envois et l'augmentation de leur fréquence. En amont, les entreprises prennent des décisions logistiques pour leur permettre de répondre à la demande de marchandises en réduisant les coûts. Ces décisions déterminent le tissu d'activités logistiques de la ville et de son environnement et se déclinent en quatre types de fonction [McKinnon, 1999] :

- fonctions **stratégiques** : déterminées par un niveau stratégique des décisions qui affectent le nombre de sites, les capacités des sites, des entrepôts et quais de chargement ;
- fonctions **commerciales** : déterminées par les décisions commerciales d'approvisionnement, de contractualisation et de distribution. Ces décisions établissent un réseau qui lie les différentes entreprises et permet le transit de marchandises entre les partenaires ;

- fonctions de **planification** : déterminées par les décisions concernant le programme de production et de distribution ;
- fonctions de **transport** : déterminées par les décisions liées aux moyens d'acheminement des marchandises comme l'utilisation d'une flotte de véhicules attitrée ou d'un opérateur de transport externe, le choix d'itinéraire, etc.. . .

Le TMV est donc, par nature, difficile à appréhender et complexe[3] puisqu'il implique une multitude de chaînes logistiques de taille et de fonctionnement différents. La variété d'organisation de chaque fonction pour toutes les chaînes logistiques est due à la grande variété de comportements et, de manière globale, tout semble désordonné face aux nombreuses relations qui existent entre chaque acteur.

1.3.3 Une problématique au centre de nombreuses contradictions

Parce que le TMV est une préoccupation encore récente des élus, notamment depuis l'apparition des PDU[4] , l'intégration des flux de marchandises avec les flux de passagers reste encore aujourd'hui très floue. Même si le volet marchandises est obligatoire dans les PDU, il demeure très souvent le parent pauvre.

Il faut faire cohabiter des marchandises et des usagers pour atteindre les objectifs liés au développement durable des villes. Mais les objectifs de la ville et les objectifs concernant le Transport de Marchandises sont très contradictoires, comme développer des systèmes de distributions « propres » sans développer les industries de distribution, compromettent les besoins de la société, de l'économie et de l'environnement. Ou encore lorsque des restrictions sur le tonnage et des horaires de livraison en ville sont effectives, les artisans et transporteurs sont de plus en plus frileux à l'idée de livrer et de travailler dans le centre, par conséquent les élus ont le souci de ne pas voir les magasins du centre partir en périphérie à long terme parce que l'accès y est plus facile et le foncier moins cher.

[3]Notion détaillée dans le chapitre 3.

[4]Les Plans de Déplacements Urbains (PDU) ont été formalisés pour la première fois grâce à la Loi d'Orientation sur les Transports Intérieurs (LOTI) en 1982. Ils prennent un caractère obligatoire avec la Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie (LAURE) en 1996. La loi relative à la Solidarité et au Renouvellement Urbains (SRU), votée en décembre 2000, renforce encore le rôle des PDU. Cependant, après 1982 très peu de PDU ont été réalisés et aucun ne comportait le volet marchandises. Les raisons sont simples, il n'y avait pas l'obligation de le faire et les personnes à l'origine de la démarche du PDU n'avaient pas la « culture marchandises ». Il faudra attendre les premiers PDU approuvés de Lyon (1997) mais surtout celui de Rouen du 11 février 2000 qui comportait le volet marchandises.

La pluralité et l'hétérogénéité des acteurs compliquent la problématique. Chaque acteur a ses objectifs, que ce soit, le transporteur, le commerçant, le citoyen ou l'élu local (qu'il soit élu municipal ou élu communautaire). Ces objectifs correspondent à des problématiques locales. Le but du transporteur est d'optimiser sa logistique en améliorant ses taux de chargement, ses itinéraires de tournées avec les contraintes et restrictions que la collectivité locale impose. Le transporteur veut minimiser la fonction coût de son entreprise. Le commerçant doit vendre ses marchandises, il veut être approvisionné de manière efficace pendant son temps de travail, qui ne correspond pas toujours aux disponibilités du transporteur ou aux horaires de livraison arrêtées par la ville. Le citoyen veut un environnement urbain idéalement sans nuisances de pollution et de congestion, ceci en commençant par l'absence de gêne visuelle des camions. Enfin, l'élu local a le rôle de chef d'orchestre et doit essayer de maintenir les commerces dans les centres, c'est-à-dire de satisfaire les commerçants et lieux économiques de ces zones et assurer une bonne desserte pour les transporteurs, tout en augmentant l'accessibilité et la mobilité pour les personnes sans compromettre la qualité de vie des citoyens.

1.3.4 Problématique pour une ville de taille moyenne

En balayant l'ensemble du TMV, on constate très rapidement que la complexité est telle qu'il est difficile de considérer les logiques des flux si différentes et de concilier des acteurs ayant des objectifs aussi antagonistes. Alors, pour rendre la situation moins complexe sans en dénaturer les pratiques du TMV, nous nous focalisons dans un contexte de ville particulier, celui des villes de taille moyenne.

Il est tout d'abord nécessaire de préciser ce qu'on entend par ville de taille moyenne. L'hypothèse de travail est de se concentrer sur une ville d'une échelle ni trop petite (perte des dynamiques et des comportements) ni trop grande (trop grand nombre d'acteurs et complexité des flux) pour pouvoir généraliser nos résultats sans se heurter à la complexité d'une grande ville. Il s'agit donc bien d'une notion d'échelle et d'une grandeur géographique et démographique, c'est pourquoi la définition d'une ville moyenne issue de la Fédération des Maires des Villes Moyennes créée en 1988 par l'ancien Ministre Jean Auroux, est une bonne manière d'appréhender notre contexte d'étude. Ainsi, une définition d'une ville de taille moyenne peut être donnée par « une ville de 20 000 à 100 000 habitants » [FMVM, 1988]. Nous retiendrons donc cette définition pour ces travaux de recherche.

S'intéresser à un type de ville peut sembler être non représentatif, or s'intéresser en particulier aux villes de taille moyenne, permet de couvrir un large panorama des villes européennes. En France, les villes adhérentes de l'association des villes de taille moyenne couvrent à elles seules $\frac{1}{5}$ de la population française et représentent 200 villes et 160 intercommunalités pour 15,6 millions d'habitants.

Les villes de taille moyenne sont, comme les grandes villes, dépendantes de la topologie, de l'organisation de la cité, de la structure urbaine et des politiques menées par les responsables, mais leurs dimensions (spatiales, sociales, économiques, normatives..) génèrent des conditions spécifiques pour le fonctionnement du TMV dont quelques exemples sont mentionnés ci-dessous [CIVITAS, 2007].

La surface plus réduite de ces entités urbaines conduit à des trajets plus courts d'une zone à une autre, effectués rapidement. Cela facilite le transit d'une zone de la ville à une autre par une distance de transport relativement courte. De ce fait, l'organisation des transporteurs se trouve facilitée tant pour le choix de véhicules que pour la planification des tournées ; en revanche, il devient plus difficile d'obtenir des gains dans ce domaine par des actions d'amélioration globale. Les autres acteurs agissent de même pour transporter leurs outils ou leurs achats, d'autant que les zones d'activités commerciales se situent généralement à courte distance des centres-villes commerçants.

De plus, chaque acteur essaye de trouver sa propre solution au problème. Dans la plupart des cas, ces solutions mènent à une situation moins optimale du point de vue social et économique. Les villes de taille moyenne offrent l'opportunité de traiter la problématique dans sa globalité parce qu'elles ont une taille « humaine », les résidents se connaissent mieux. En conséquence, l'identification des acteurs et des flux est plus simple. La mobilisation paraît plus aisée, les impacts (positifs ou négatifs) des améliorations sont vite analysés et les décisions d'ajustement peuvent être prises avec une participation active des personnes concernées.

Par ailleurs, si les volumes transportés sont évidement moins importants, ce qui rend possible une connaissance quasi exhaustive des flux de marchandises, de véritables flux industriels peuvent se trouver en centre-ville car de petites unités de production ou des zones de stockage demeurent à proximité de ces centres.

Les déplacements deviennent plus contrôlables. Mais la sensibilité aux actions normatives est également accrue. Le fait de rendre plus difficile l'accès des marchandises au centre-ville

provoque rapidement la migration des commerçants et artisans vers les périphéries. Dans beaucoup de pays développés, cela a déjà entraîné le transfert des activités exigeant de gros mouvements de marchandises dans des zones périphériques proches d'équipements portuaires ou de grands axes routiers interurbains.

Enfin, les villes de taille moyenne sont caractérisées aussi par le fait que peu de livraisons (de l'ordre de 24%) sont effectuées par l'intermédiaire d'une plateforme de distribution en ville ou dans les environs comme le montre Laetitia Dablanc et Jean-Louis Routhier dans les enquêtes ECHO [Dablanc et Routhier, XXXX]. On se retrouve en fait face à un système qui est paradoxalement moins de « proximité » mais plus clairsemé sur le territoire, par conséquent, l'identification des mouvements et surtout des itinéraires est plus facile. Ensuite, la difficulté de diagnostiquer le TMV est du au fait qu'en milieu urbain, les tournées de véhicules sont non négligeables et difficiles à caractériser et à appréhender. Et plus les flux transitent par une plateforme, plus les flux sont consolidés, déconsolidés et intégrés dans des tournées. Dans les villes moyennes, la majorité des flux ne transite pas par plateforme ce qui limite le nombre de tournées. La complexité des mouvements de marchandises est beaucoup moins importante que dans les grandes villes puisque les tournées de véhicules sont en plus faibles proportions. Les déplacements sont majoritairement en traces directes, par conséquent, la connaissance des volumes et itinéraires est possible et surtout exploitable.

1.4 Conclusion

Le Transport de Marchandises en Ville est indispensable car il participe à l'approvisionnement des villes et de ce simple constat, il est générateur d'emplois et contribue à la vie économique des villes. Mais il a des impacts néfastes directs et indirects : il utilise les ressources naturelles et l'espace public, accroît la congestion, la pollution, les émissions de GES et de bruit, influe sur la sécurité et la santé. Il s'agit alors de les minimiser tout en développant les activités économiques et en maximisant la qualité de vie des citoyens. Ce qui en fait un problème difficile à résoudre tant le TMV concerne une grande variabilité de biens, de conditionnements des biens, d'objectifs et de comportements des acteurs impliqués.

Enfin, la problématique du TMV ne peut, dans une ville moyenne, être considérée uniquement sur l'hyper centre toujours de taille modeste. Les gains apportés par des solutions « clas-

siques »[5] ne sont rentables pour aucun des acteurs et provoquent des animosités qui, vue la taille de la ville, bloquent rapidement l'efficacité du système. Se concentrer sur les villes de petite taille serait alors restrictif, contrairement aux villes de taille moyenne qui peuvent être vues comme un terrain d'expérimentation pour les grandes villes. Il s'agit toujours de trouver les meilleurs compromis entre les parties prenantes et d'identifier les "seuils d'acceptation" des différentes catégories d'activités concernées. Il convient donc d'élargir tant dans l'espace, que dans la nature des activités et dans la société, les actions d'amélioration pour envisager des solutions pérennes à l'échelle de telles agglomérations. Plusieurs actions ont été expérimentées pour répondre aux besoins de chaque acteur. Un spectre des axes d'amélioration et des types d'expérimentation se dégage allant de l'optimisation des itinéraires des tournées à l'ajout de nouveaux points de stockage. Pour détailler ces leviers à disposition des collectivités, nous consacrons le chapitre suivant à cet effet et analysons de manière qualitative si ces actions peuvent être des solutions.

[5] nous verrons des exemples dans le chapitre suivant

Chapitre 2

Expérimentations et Modèles pour le TMV

Sommaire

2.1 Introduction **26**

2.2 Les approches expérimentales **26**

2.2.1 Les projets européens 27

2.2.2 Les projets nationaux 28

2.2.3 Les initiatives locales 29

2.3 Solutions expérimentées et synthèse des résultats **31**

2.3.1 Les leviers d'action 31

2.3.2 Synthèse qualitative des résultats 45

2.4 Modèles et outils du TMV **45**

2.4.1 Spécificité de la modélisation du TMV 45

2.4.2 Rétrospective de la modélisation du TMV 49

2.4.3 Les outils d'aide à la décision pour le TMV 56

2.4.4 Conclusion sur les modèles et outils du TMV 64

2.5 Conclusion **65**

2.1 Introduction

Que ce soit en France, en Europe ou dans d'autres continents, le TMV est un point délicat à traiter comme le montre le chapitre 1. Des initiatives, des projets et des politiques de transport ont été lancés pour pallier les différents impacts négatifs du TMV depuis quelques années. Ces expériences ont permis, entre autre, une meilleure connaissance des enjeux et de la réalité et une valorisation à l'échelle nationale mais aussi européenne. Cependant, elles ont rencontré des difficultés comme le manque de financement, de dialogue entre les parties prenantes ou encore des difficultés pour définir un cadre cohérent lors des recueils de données et l'évaluation économique, environnementale et sociale.

La première partie expose les approches expérimentales les plus significatives ayant permis de construire une base de connaissances sur le transport de marchandises en ville, qu'elles soient européennes, nationales ou locales.

La deuxième partie présente la description de solutions déjà expérimentées, elle permet de porter une réflexion sur les différents leviers d'action et constitue une synthèse qualitative des enseignements retenus.

Enfin, la troisième partie fait le point sur la modélisation du TMV, explique les spécificités d'une telle modélisation et propose un état de l'art des modèles et outils existants du TMV.

2.2 Les approches expérimentales

Plusieurs expériences ont été lancées pour maintenir une qualité de vie et assurer l'attractivité de certains secteurs pour les usagers et les visiteurs, limitant le trafic de marchandises à certains itinéraires et/ou à certaines périodes. Ces expérimentations ont d'abord été à l'initiative de l'Europe lors du 5ème programme cadre de recherche et de développement. Puis, elles ont été suivies par des projets nationaux et enfin par des initiatives locales. Des projets internationaux existent notamment au Japon et aux États-Unis mais ne seront pas cités dans cette thèse car leurs contextes sont souvent différents du cadre de l'Europe. En effet, chaque ville en Europe possède un cœur historique plus ou moins important, des réseaux routiers particulièrement diversifiés (différence de capacité, de longueur et de tonnage) par rapport aux réseaux géométriques américains et une culture transport relativement différente.

2.2.1 Les projets européens

Les premières approches furent concrètes et expérimentales. Plusieurs projets « grandeur nature » ont permis de constituer une base de connaissance du TMV. Ainsi, une première liste de mesures diminuant les impacts du TMV a été élaborée par le projet COST 321 Action [COST 321 Action, 1998]. Les mesures identifiées sont au nombre de soixante environ et sont répertoriées en huit classes.

Afin de rationaliser les différents projets européens, la CE (Commission Européenne) a lancé plusieurs actions transversales aux projets dont l'objectif fut la mise en œuvre de solutions dans le domaine de la logistique urbaine. La première concerna le réseau thématique BESTUFS I (BEST Urban Freight Solutions) qui eut un rôle de catalyseur pour l'établissement de liens personnels et l'élargissement des réseaux de contacts dans le domaine du transport urbain de marchandises pour toutes les personnes intéressées sans imposer d'engagements ni de structures formelles. BESTUFS I est actif depuis 2000 et actuellement mis à jour par le financement de la CE. Puis, BESTUFS II a pour rôle de produire une série de guides des meilleures pratiques en Logistique Urbaine (CLS – City Logistics Solutions) sur la base des informations documentées dans les manuels de BESTUFS I et BESTUFS II.

Les projets se sont succédés, tous apportant la continuité d'une démarche européenne. Le projet City Freight dont le but était d'identifier et d'analyser les schémas logistiques prometteurs dans sept pays afin d'établir une liste de critères et une méthode commune pour évaluer de tels schémas et les politiques d'accompagnement [Cybernetix, 2002]. MOSCA, IDIOMA, PLUME, IEE sont autant d'initiatives européennes, dont respectivement les buts étaient d'améliorer l'efficacité de la distribution des marchandises en ville, d'explorer un large panel de solutions innovantes pour le transport de fret, de faciliter le transfert des innovations et de trouver des actions pour réduire les consommations d'énergie et encourager l'utilisation d'énergies renouvelables [MOSCA, 2001], [Emberger, 2004].

Le projet ELCIDIS (ELectric vehicle CIty DIstribution Systems) est un projet de plate-forme de livraisons de marchandises en centre-ville par des véhicules électriques co-développé par sept villes européennes et l'association européenne Citelec, dans le cadre du programme Thermie de la Commission Européenne [ELCIDIS, 2002]. Le principal héritage de ce projet est la plateforme de La Rochelle.

Enfin, le programme de recherche et de développement CIVITAS (City VITAlity Sustainability) a pour vocation de promouvoir et de développer les transports urbains propres. Plusieurs projets sont issus de ce programme, comme le projet SUCCESS (Smaller Urban Communities in Civitas for Environmentally Sustainable Solutions) qui concerne la place des transports dans le développement durable des villes moyennes ou petites agglomérations. Le programme CIVITAS pourrait même être renforcé par une meilleure coordination et intégration entre le transport de personnes et le transport de marchandises en zones urbaines ou interurbaines et s'appellerait alors « CIVITAS Freight » [Berry, 2008].

2.2.2 Les projets nationaux

Au niveau national, la majorité des initiatives sont pilotées par différents organismes, projets ou programmes, souvent publics comme l'ADEME[1] dont le rôle est de susciter, animer, coordonner, faciliter ou réaliser des opérations ayant pour objet la protection de l'environnement et la maîtrise de l'énergie et plus précisément le PREDIT[2], lancé et conduit par les ministères chargés de la recherche, des transports, de l'environnement et de l'industrie, l'ADEME et l'ANVAR (Agence Nationale de VAlorisation de la Recherche).

En relation avec le PREDIT, on distingue le véritable fer de lance de l'interêt du fret urbain en France : le programme national « Marchandises en Ville » initié par le Ministère de l'Équipement et dont certains travaux ont été conduits de façon partenariale sur le sujet, sous l'égide de la DTT (Direction des Transports Terrestres), avec le concours de la DRAST[3] et de l'ADEME. En effet, ce programme a directement mis en œuvre les enquêtes nationales TMV réalisées à Bordeaux, puis Marseille et Dijon qui établissent une large base de connaissances concernant le TMV sur ces trois agglomérations, donnent une image des comportements des acteurs et mettent en avant un certain nombre d'indicateurs relativement invariant d'une ville interrogée à une autre dont les principaux sont énoncés dans le paragraphe 2.8 [Ambrosini *et al.*, 1997, 1999a, 1999b]. L'outil Freturb© (également présenté dans le paragraphe 2.8), les expérimentations des villes françaises et l'arsenal législatif dans les années 1990 et 2000[4], sont autant d'illustrations scientifiques, juridiques et opérationnelles de ce programme.

[1] ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie. Site Internet

[2] PREDIT : Programme National de Recherche et d'Innovation dans les Transports Terrestres. Site Internet

[3] DRAST : Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques.

[4] comme la Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie (LAURE) en 1996 et la loi relative à la Solidarité et au Renouvellement Urbains (SRU) en 2000

Le CERTU[5] (Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques) et le GART[6] (Groupement des Autorités Responsables de Transport) accompagnent et encouragent les collectivités françaises à mettre en œuvre de nouvelles expériences. Le CERTU est chargé de conduire des études dans le domaine des réseaux urbains, des transports, de l'urbanisme et des constructions publiques, pour le compte de l'État ou au bénéfice des collectivités locales, établissements publics ou entreprises chargés de missions de service public ou des professions en cause. Il contribue, par ses activités de statistiques, d'enquêtes, d'études, d'expertises, d'expérimentation et d'innovation technologique, de production de logiciels, de publication d'ouvrages techniques et méthodologiques, de formation et d'information, au progrès des connaissances et des savoir-faire et à leur diffusion. Dans son champ d'activités, il contribue à l'élaboration de la normalisation et de la réglementation technique ainsi qu'à la mise en œuvre des autres actions de l'État. Le GART est le porte-parole des collectivités territoriales, auprès des institutions, du Gouvernement, du Parlement, des instances de l'Union Européenne et de la presse. Il offre à ses adhérents des conseils et expertises économiques, financières, juridiques et techniques. Il suscite et anime le débat sur les déplacements et la mobilité urbaine en proposant des solutions pragmatiques et innovantes.

2.2.3 Les initiatives locales

Dans la mesure où l'on parle de projets lorsque plusieurs partenaires mettent en commun leurs financements et leurs compétences et favorisent les synergies par un jeu de complémentarité, nous parlerons d'initiatives locales plutôt que de projets locaux lorsqu'il y a une volonté politique locale forte pour l'amélioration du fret urbain. Comme chaque agglomération est plus ou moins impliquée dans le fret urbain, il devient alors difficile d'être exhaustif.

Notons que la ville de Paris est l'une des rares villes françaises à avoir mis en place une stratégie multiforme relative au TMV, en appliquant des réglementations claires et une charte pour les livraisons, en catalysant les initiatives des entreprises comme l'expérience de Monoprix, la Petite Reine, ou encore Chronopost et en développant d'autres moyens d'acheminement des marchandises comme le mode fluvial sur la Seine.

[5]CERTU : Site Internet

[6]véritable porte-parole des autorités organisatrices de transport (qui peuvent avoir, de surcroît, des intérêts divergeant de ceux d'autres collectivités territoriales) Site Internet

Citons la ville de Toulouse, où le projet de réaménagement de la rue Alsace-Lorraine a été pensé précisément avec une culture « marchandises » comportant la problématique du dimensionnement et de localisation des aires de livraison, sans oublier, bien sûr, la mise en place d'une charte de bonnes pratiques.

Remarquons la ville de Montpellier qui a réussi à convaincre les acteurs et à contrôler l'accès des véhicules utilitaires dans le coeur historique. Le centre-ville est ainsi fermé sauf pendant les heures de livraison autorisées. Seuls les véhicules de type Goupil (avec une petite largeur) peuvent s'introduire entre les bornes d'accès, laissant ainsi une plus grande flexibilité au niveau des horaires de livraison (plage horaire commune élargie entre le transporteur et le commerçant qui ouvre à partir de dix heures). Cette action est accompagnée d'une mise à disposition d'un local pour consolider et déconsolider les marchandises, à proximité du centre-ville, assurant ainsi une certaine viabilité économique.

Bien évidemment, les exemples sont nombreux mais inégalement répartis puisque les expériences sont recensées dans les grandes villes où les problèmes sont peut-être plus importants et plus nombreux. Néanmoins, nous citons dans les paragraphes suivants quelques villes dont la volonté politique pour l'amélioration du transit du fret en ville mérite d'être soulignée.

Les initiatives locales sont, le plus souvent, à l'origine des décisions émanant des autorités organisatrices de transport proactives aux questions du fret urbain. Parmi les villes porteuses de projets locaux, nous retrouvons aussi Poitiers avec le projet « Cœur d'Agglo » qui a pour objectif de redonner toute sa dimension à la place de l'hôtel de ville et aux rues adjacentes (Magenta, Carnot, Tranchée, Victor Hugo) dans la partie sud du centre-ville et d'accentuer encore la dynamique commerciale et d'habitat dont bénéficie le centre-ville actuellement. Les problématiques de ce projet sont multiples et incluent la question de la localisation et du dimensionnement des aires de livraison.

Depuis quelques années, les élus de Langres recherchaient des solutions susceptibles de réduire la circulation, le bruit et la pollution au sein du centre historique de ville. Après réflexion et quelques visites à Bordeaux et à La Rochelle, la municipalité a décidé d'engager des actions concrètes. Les mesures retenues visent à favoriser l'utilisation de voitures électriques, à mettre en place un réseau de transport urbain à l'aide d'un bus électrique, à améliorer le stationnement et à moderniser la réglementation des livraisons en centre-ville en favorisant l'usage de véhicules « propres » [CERTU, 2006].

La ville de Rouen opte pour un schéma logistique calqué sur l'expérience des ELP de Bordeaux. La raison est semblable puisque des travaux d'aménagement de la voirie sont actuellement en cours dans le centre-ville de Rouen afin d'accueillir l'extension de la ligne de bus en site propre, TEOR (Transport Est Ouest Rouennais). Afin de limiter les gênes occasionnées par ces périodes de travaux, l'agglomération de Rouen, la ville de Rouen, la Chambre de Commerces et d'Industries de Rouen et Électricité De France expérimentent des Espaces de Livraison de Proximité (ELP) visant à faciliter la livraison des marchandises en ville pour les petits colis.

Pour conclure, il nous paraît important de souligner la différence de causalité de l'engagement de projets liés au TMV. En effet, Poitiers s'implique dans des actions d'amélioration du TMV pour aider les activités économiques et pour des raisons d'esthétique urbaine. Les causes pour Langres sont les enjeux environnementaux et Rouen affiche la volonté de gérer les flux en situation très contrainte.

2.3 Solutions expérimentées et synthèse des résultats

2.3.1 Les leviers d'action

Si aujourd'hui, les collectivités locales disposent de leviers pratiques pour réduire les nuisances du TMV, il n'en a pas toujours été le cas. Ceux-ci n'ont pu être découverts que par l'expérimentation, notamment liée aux approches expérimentales de la problématique que nous avons développées plus en détail dans la section 2.2 de ce chapitre. Les leviers utiles sont des solutions partielles qui font réduire le nombre de mouvements de chaque véhicule transportant des marchandises. Dans la littérature, les différents leviers sont assez bien explicités et classifiés par thématique, comme dans le mémoire de Courrivault, [2004] ou encore dans [Munuzuri *et al.*, 2005a] mais méritent aujourd'hui d'être complétés. Enfin, une caractérisation des solutions est proposée dans le guide des bonnes pratiques de BESTUFS (BEST Urban Freight Solutions) [BESTUFS, 2004] et [BESTUFS, 2007]. Elle se présente ainsi : Réglementations ; E-commerce ; Plateformes publiques/privées ; Transport intermodal ; Combiner le transport de marchandises et le transport de passagers ; Technologies des véhicules ; Système Intelligent de Transport (ITS) ; Politique/ Stratégie de circulation ; Espaces Logistiques Urbains (ELU). Afin de mieux cerner les types d'actions, nous préférons établir une liste de catégorie par objectif qui serait :

– mieux utiliser les infrastructures ;

- faciliter l'accès ;
- développer le stockage de proximité ;
- utiliser des véhicules appropriés ;
- réglementer ;
- établir des partenariats entre acteurs.

Parce qu'il n'existe pas de solutions miracle, et que le TMV n'est pas un domaine arrivé à maturité pour les chercheurs, des expériences sont réalisées pour tester leur efficacité avec une analyse a priori et a posteriori. Là encore, l'évaluation d'une solution expérimentée n'est pas chose aisée et mérite débat comme le montre le projet EVAL dont le but est la définition d'une méthodologie d'évaluation des innovations en matière de logistique urbaine, à la demande du PREDIT.

Pour commenter la caractérisation proposée des solutions expérimentées, nous développons des exemples significatifs pour chaque catégorie dans les paragraphes suivants, en précisant le contexte de l'expérience et les résultats obtenus.

2.3.1.1 Mieux utiliser les infrastructures

Mieux utiliser les infrastructures signifie aussi appliquer une politique et une stratégie de circulation adaptées. Lorsque l'on parle de politique de circulation, il est surtout question de choix collectifs, d'assentiments individuels, de priorités financières, de maîtrise et d'environnement, autrement dit de contradictions difficiles à résoudre tant elles concernent le quotidien des acteurs et le souci du long terme. Les actions sont de gérer le foncier, de créer des voiries adaptées ou dédiées, de gérer les zones d'accès contrôlés comme les zones piétonnes, les zones d'activités commerciales, les zones à faibles émissions (LEZ, Low Emission Zones), d'optimiser la création et l'usage des zones de livraison.

Un exemple, innovant, qui peut être donné, est celui de Barcelone avec les voies multi-usages : une expérience qui appartiendrait à une sous-catégorie « Réaménagement du réseau routier urbain ». Ce projet a été mis en œuvre dans le cadre de CIVITAS cofinancé par l'Union Européenne et concerne un concept unique : le multi-usage des voies [CIVITAS – MIRACLES, 2004]. Une voie peut être utilisée en alternance pour se garer, pour livrer ou pour le trafic. Une initiative pour lutter contre la congestion aux heures de pointes et contre le manque de places de parking.

L'expérience a été conduite sur cinq boulevards importants de la ville de Barcelone. Chaque boulevard a été aménagé de manière spécifique : les voies en bordure des routes pour automobiliste comme les voies réservées habituellement pour le stationnement de véhicules ont été aménagées pour un usage triple : pour le stationnement de longue durée pendant la nuit, pour les livraisons pendant le jour indépendamment des heures de pointe et pour le trafic de voiture pendant les heures de pointe. Le changement d'usage est annoncé par des panneaux à messages variables et un système de balises force le trafic automobile à libérer l'espace pour les activités de livraison et de stationnement. Les résultats de cette expérience sont concluants malgré un coût d'exploitation considéré comme élevé. La municipalité a observé une augmentation des vitesses de circulation suite à l'installation des voies multi-usage, et continue à prolonger ce type de mesure le long des routes primaires. La municipalité de Barcelone souhaite étendre cette initiative sur un nombre plus important de tronçons. Cette expérience a montré que les problèmes des transporteurs ont pu être réduits en raison de l'application visée. Élargir le service à un plus grand nombre de participants augmenterait de manière significative l'utilité de cet outil.

Le transport de marchandises aujourd'hui s'effectue via le réseau routier en majeure partie. Les autres modes de transport n'offrent qu'un « potentiel limité » pour les livraisons urbaines. «Potentiel limité» dans le sens où les flux sont désormais en juste à temps et impliquent davantage de flexibilité, ainsi la demande de transport n'est pas satisfaite par rapport à l'offre que les modes « non routiers » fournissent.

Des villes comme Amsterdam ont néanmoins tenté l'expérience [Chevallier, 2002]. Le 23 octobre 1997, le ministre hollandais du transport a lancé le projet « Floating Distribution Centre » d'Amsterdam. Ce projet est une initiative de DHL, un des leaders du transport express international de colis. Un bateau DHL, ressemblant à un bateau de tourisme typique, parcourt les canaux de la ville et sert de base centrale pour des coursiers en vélo équipés de systèmes de télécommunication reliés aux ordinateurs du bateau. La ville d'Amsterdam a fourni le développement du projet et DHL a financé le bateau et d'autres équipements. Les résultats sont convaincants avec la disparition de dix camions DHL chaque jour (soit « une réduction de 150 000 véhicules $\times$ kilomètres et 12 000 litres de gasoil par an »). Le projet pilote a été mené sur une période d'essai de 18 mois. Ce projet a permis de diminuer la congestion dans le centre-ville, d'augmenter la flexibilité de l'approvisionnement et de développer une image positive de la ville d'Amsterdam. Le projet n'a pas connu de freins au développement puisqu'il s'inscrivait

parfaitement dans la politique de déplacement de la ville d'Amsterdam. Mais il existe un inconvénient à ce type de procédure de livraison : pendant l'été, lorsque les canaux sont souvent beaucoup plus utilisés, notamment par des bateaux de tourisme, il est difficile de se servir des docks.

Le potentiel d'optimisation se fait bien sentir, c'est pourquoi d'autres villes essaient de profiter de leur situation pour la multi-modalité dans le transport de marchandises en ville. C'est le cas de la ville de Paris en utilisant le rail (expérience de Monoprix par exemple), de la ville de Dresde avec le tramway (expérience de Cargo-Tram) et de la ville de Rouen, où une étude de faisabilité est en cours pour la mise en œuvre d'un centre de distribution urbain où les marchandises sont acheminées par le réseau viaire ou par le réseau fluvial.

2.3.1.2 Faciliter l'accès

Les actions pour faciliter l'accès sont variées, certaines sont plus connues sous l'appellation ITS (Intelligent Transport System), d'autres sont encore plus larges dans le sens où elles comprennent également tous les aspects de signalétique et d'information aux transporteurs.

La signalétique permet de fixer de manière claire les réglementations dans l'environnement urbain. Les informations aux transporteurs peuvent être de deux types : statiques pour l'élaboration des tournées, les travaux sur voirie par l'intermédiaire de freight forum ou sites Internet, dynamiques pour toute l'information en temps réel permettant de modifier les tournées ou de contourner les goulots d'étranglement momentanés. La démarche ITS est un catalyseur de l'innovation, en ce sens que de nouveaux produits et services naissent de la mobilisation de la recherche industrielle appliquée à ces problématiques. Cependant, toute cette activité ne peut se développer que dans le cadre d'une politique des transports qui légitime le recours à telle ou telle réponse technologique à des questions sociales [Ygnace, 2007].

Il existe quelques expériences récentes sur le sujet, souvent innovantes d'un point de vue technologique mais l'expérience que nous décrivons dans ce paragraphe est l'une des premières expériences menées sur le sujet et qui a été conduite à Rouen face à la congestion grandissante du centre-ville entre 1996 et 1998 [OECD, 2003]. Elle représente l'esprit dans lequel ce levier s'inscrit. Le but de cette expérimentation était de relier des outils d'EDI (Electronic Data Interchange) aux outils d'information dynamique de l'état du trafic pour permettre aux chauffeurs-livreurs d'organiser leurs tournées en fonction de la congestion en temps réel. Elle vise à exa-

miner des outils d'échange de données électroniques en temps réel avec la mutualisation des moyens d'information entre les services gérant la circulation et les chauffeurs-livreurs. La principale phase du programme a été composée d'études et de diagnostics. Quelques expérimentations ont suivi et ont principalement fait l'objet de tests concernant la diffusion d'informations sur la fluidité du trafic avec des webcams. La faisabilité du dispositif sur le plan technique a été validée. Le projet est basé sur une coopération avec quelques compagnies de transport qui ont accepté d'analyser leurs coûts en détail (avant et après l'exécution du nouveau système). L'expérience est un succès. La précision est de 5% sur les vitesses et de 3% sur les flux. Cependant, un problème a été soulevé par l'introduction des webcams dans le centre de la ville. En effet la CNIL (la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés) a d'abord été opposée à l'expérience.

Les expériences menées dans ce champ d'investigation ont souvent été lancées séparément, revendiquant ainsi l'indépendance des systèmes mais aussi et surtout leur propre isolement. Les résultats sont partagés, l'optimisation étant faite au niveau du routage des véhicules, les gains sont marginaux dans des villes de taille moyenne. L'idée est bien évidemment de généraliser ce type d'expérience sur toute la flotte de véhicules afin d'optimiser les routes d'une manière globale mais d'autres difficultés apparaissent comme la complexité algorithmique pour trouver de « bonnes » solutions.

2.3.1.3 Développer le stockage de proximité

Parmi les leviers d'action, on note que des aménagements urbains peuvent améliorer le transit des marchandises : ce sont les ELU (Espaces Logistiques Urbains). Ici, la notion de stockage est à considérer au sens logistique du terme, i.e. le chargement/déchargement et le stockage sont pris en compte. Par conséquent, chaque ELU est concerné par un stock (chargement/déchargement également), petit ou volumineux, contrôlé ou non. Les ELU sont divers et n'ont pas la même fonction et localisation au cœur de la cité. Le schéma ci-après (Figure 2.1) retrace l'ensemble des aménagements possibles ainsi que leurs localisations dans la ville.

La Figure 2.1 se divise selon deux coupes transversales : les activités liées au B2B (Business to Business) et B2C (Business to Customers) et les activités liées au B2C et C2C (Customers to Customers). Puis cette figure se divise selon le lieu géographique : hors ville et à l'intérieur de la ville. A l'intérieur de la ville, les équipements répertoriés sont :

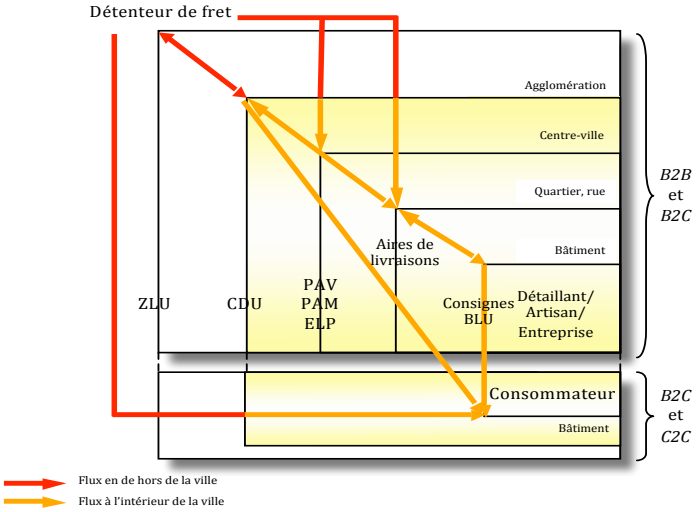


FIG. 2.1 – Caractérisation des ELU inspirée du [PREDIT, 2005] et de [Boudouin, 2006]

- la **consigne** : BLU (Boîte Logistique Urbaine) dont le but est la création d'une interface qui relie le transporteur et le client ;
- l'**aire de livraison** : un exemple particulier de PAV (Points d'Accueil des Véhicules) ;
- **PAV** : l'ELP (Espace Logistique de Proximité) et le PAM (Point d'Accueil de Marchandises) font partie des PAV. La finalité de l'ELP est de fixer des points d'accueil pour les utilitaires afin de faciliter leur stationnement lors des livraisons de marchandises. La finalité du PAM est de consolider les envois à destination ou en provenance d'une zone difficile d'accès ;
- le **CDU** : Centre de Distribution Urbaine. Cet équipement est plus important en taille, en investissement et en fonction. Le but premier des CDU est la gestion des flux qui parcourent la ville par la consolidation/déconsolidation des marchandises [ADEME, 2006a], [Interface Transport, 2004, 2006].

A l'extérieur de la ville, l'équipement logistique classé est la ZLU (Zone Logistique Urbaine), ses fonctions sont identiques aux fonctions des CDU avec une échelle géographique macroscopique. Le but est de localiser et regrouper les acteurs de la logistique urbaine à proximité de leurs clients. Plus de détails sont donnés dans le guide méthodologique présenté dans [Boudouin, 2006].

Avoir un exemple significatif pour chaque type d'ELU n'a pas d'intérêt particulier. En revanche, l'exemple de l'ELP de Bordeaux est tout à fait révélateur d'une prise de conscience des autorités locales de la nécessaire gestion des marchandises lors des réaménagements urbains.

Cette expérience est une réponse directe aux travaux pour la réalisation du tramway de la Communauté Urbaine de Bordeaux (CUB). Les entreprises de transport doivent exercer leur activité et les commerçants du centre-ville doivent être approvisionnés dans une situation perturbée. D'où l'intérêt pour faciliter la livraison de marchandises d'un Espace de Livraison de Proximité. L'ELP comprend une aire de stationnement et de manutention exclusivement destinée à la livraison de marchandises aux commerces voisins. Réglementé par un arrêté municipal, l'ELP est ouvert de 9 heures à 17 heures la semaine et de 9 heures à 11 heures le samedi. Il peut accueillir de trois à cinq camions. Une fois le véhicule stationné, deux "voltigeurs" avec des chariots aident les livreurs au déchargement et à l'acheminement des colis chez les commerçants, sans pour autant se substituer au chauffeur, seul responsable de sa marchandise jusqu'à sa livraison finale. Ces voltigeurs contrôlent aussi l'accès à cet espace et le stationnement des véhicules de livraison. Autre particularité, l'ELP, délimité au sol par une signalisation et équipé d'un poste d'accueil sécurisé pour les voltigeurs, peut se déplacer sans grande contrainte en fonction de l'avancée du chantier. Pour plus de détails, voir [Boyer, 2004].

Les stockages de proximité sont aussi des plateformes publiques/privées. Trois formes sont possibles, classées selon l'origine du projet, privée ou publique et du degré d'implication de la municipalité : des services commerciaux privés à l'initiative de transporteurs, des licences de distribution accordées par les municipalités et un service public du TMV [Dablanc, 1998].

Peu de littérature concerne ce genre d'équipement logistique pour une simple raison : les plateformes urbaines sont aujourd'hui un produit final dont la recette reste encore à établir même si Dablanc et Bossin ont été les précurseurs concernant le montage juridique des CDU, [2002]. L'exemple de Paris souligne aussi le manque d'endroits dédiés aux sites logistiques et notamment l'augmentation des trajets résultante [Levifve, 2008]. Puis, le rapport [BESTUFS, 2005] établit quelques recommandations sur ce qui peut être fait mais surtout sur ce qu'il ne faut pas faire lors de la mise en place d'un tel équipement. Enfin, une excellente référence est le rapport final de Browne *et al.*, [2005] où les « urban freight consolidation centres » sont détaillés et classés selon leur définition, les produits qui y transitent, les acteurs impliqués et les structures concernées, et propose des méthodes d'évaluation de la mise en œuvre d'un tel équipement logistique.

Les expériences menées n'appartiennent pas uniquement à un groupe de solutions, mais peuvent parfois appartenir à plusieurs comme nous le montre l'exemple du Centre de Distribution Urbaine de La Rochelle : le projet ELCIDIS a été déployé en coopération entre sept

villes européennes et CITELEC, l'association européenne des villes intéressées à l'utilisation des véhicules électriques, et veut montrer les possibilités d'un système plus efficace de distribution de ville fonctionnant avec les véhicules électriques (hybrides) dits « véhicules propres ». Le projet a été mis en pratique pour répondre à cette question : comment pouvons-nous réduire la perturbation provoquée par ces véhicules de livraison de manière englobante (congestion, bruit, pollution, gênes physiques, détérioration des rues et des trottoirs, etc.) ? A La Rochelle, le projet s'est traduit par l'installation d'un Centre de Distribution Urbaine muni de véhicules électriques. Mis en place en 2001, le CDU de la Rochelle se situe en bordure du centre historique. Les véhicules électriques sont tout à fait adaptés aux rues piétonnes et appréciés pour leur silence et leur respect environnemental. Le fonctionnement est simple : les colis et les palettes arrivent par transporteurs et sont déchargés sur la surface de stockage de la plateforme près du centre-ville. Ils sont regroupés par secteurs et sont livrés aux destinataires grâce aux utilitaires électriques (ex : berlingo Citroën). La distance entre la plateforme et le premier point des livraisons est très faible, moins d'un kilomètre. L'exploitation de la plateforme a d'abord été assurée par une entreprise privée nommée Transports Genty. Les résultats ont été positifs : 58% des entreprises situées dans le secteur restreint ont reçu les livraisons par l'intermédiaire d'ELCIDIS. La qualité du service a été très satisfaisante, une réduction notable du bruit a été mesurée dans le centre-ville et la réduction des obstructions liées aux livraisons est significative, mais les véhicules ne sont pas toujours adaptés pour le transport de certaines marchandises (marchandises trop volumineuses comme les meubles). ELCIDIS a prolongé son offre en proposant d'autres services comme le stockage des marchandises, des livraisons rapides, des livraisons des entreprises comme des particuliers [Interface Transport, 2003].

Améliorer le stockage de proximité apparaît comme une solution de bon augure. Cependant, en tirant partie des expériences sur ce sujet, il convient de rappeler que les coûts supplémentaires, l'espace en ville utilisé à cet effet et la nouvelle organisation logistique chez les utilisateurs, sont des freins considérables voire de véritables barrières au succès de la mise en œuvre d'espace de stockage de proximité.

2.3.1.4 Utiliser des véhicules appropriés

Nous entendons par véhicule approprié tout véhicule ayant le moins d'impacts négatifs, maniable et adapté aux transports des différents flux (unité logistique : cartons, palettes...) et

types de marchandises (des produits frais aux déchets). Sur le marché actuel, peu de véhicules utilitaires homologués existent, ce qui n'empêche pas d'analyser la relation entre les types de véhicules et les types d'organisations logistiques comme le propose la plaquette du CERTU, [2007].

À Paris, les véhicules de distribution représentent en moyenne 20% de l'occupation de la voirie. Dans l'environnement urbain, les opérations finales des livraisons des marchandises saturent les axes de circulation, encombrent les trottoirs, engendrent de la pollution considérable (les émissions des polluants, des bruits, du gaz comme le CO_2...) et sont responsables d'environ 46% de la consommation de gasoil en ville [Mairie de Paris, 2003]. Dans le contexte du PDU (Plan de Déplacements Urbains), la mairie de Paris a lancé une opération basée sur l'expérimentation d'une flotte de triporteurs électriques pour l'acheminement final des marchandises. Cette expérience a été reconnue par le PREDIT et a obtenu pour cette raison un financement de l'ADEME à hauteur de 50% pour l'évaluation et le suivi, études de faisabilité et de 15% pour l'investissement en triporteurs. La ville de Paris a accompagné la Petite Reine pendant deux années et a fourni un local faisant office d'ELU (Espace Logistique Urbain) dans le parking de la rue Germain l'Auxerrois. La société « La Petite Reine » a été désignée pour exploiter le service « livraison à domicile dans les arrondissements centraux de Paris à l'aide de vélos triporteurs électriques » par un comité technique d'experts. Plus de détails sont fournis par Gilles Manuelle, le gérant de La Petite Reine dans [Manuelle, 2006] et [Mairie de Paris, 2003]. Les résultats sont là, d'autres sites sont implantés, notamment des agences à Bordeaux en 2005 où le nombre de livraisons par jour oscille autour de 600, ce qui permet une quasi indépendance de l'entreprise[7].

L'utilisation croissante de la technologie de l'information et de communication dans la logistique améliore la consolidation des cargaisons et diminue donc le nombre de livraisons des secteurs urbains. Mais cette technologie rend aussi les choix du client plus contraignants encore pour l'opérateur, pouvant conduire à une augmentation du nombre de livraisons qui s'avèrent de plus en plus petites. Même si le e-commerce est une forme de jonction entre les compagnies « Business to Business » (B2B) ce qui rend encore possible la massification des flux, de grands impacts sur la distribution urbaine sont produits par ce « Business to Customers » (B2C). L'augmentation du B2C exige de nouvelles dispositions logistiques (dans et hors de la ville), comme

[7] En effet, l'entreprise La Petite Reine reçoit toujours des subventions de la ville où l'entreprise est implantée, soit par une subvention financière, soit par une subvention foncière.

des espaces de réception, de nouveaux terminaux assurant les opérations logistiques et conçus en fonction des besoins du e-commerce. Mais la mise en place de ces nouveaux arrangements logistiques est un problème en ville notamment dû au manque de place ou aux caractéristiques intrinsèques de la ville (ex : centre-ville historique). D'un point de vue transport, le e-commerce semble conduire à une hausse du volume tonne-kilomètre transporté et à une partition toujours plus fine des marchandises à livrer. Par conséquent, les livraisons du e-commerce font l'objet d'un certain nombre d'innovations (relais livraison, consignes automatiques eBox, etc).

La nécessité de nouveaux concepts logistiques est au contraire bénéfique à un système de distribution avancé, comme l'apparition de schémas logistiques innovants : la e-logistique et le e-fleet management. Ces schémas peuvent être utilisés pour la consolidation des flux de marchandises à l'intérieur et à l'extérieur des villes. Ainsi, ils engendreraient une hausse de la qualité des services et une fiabilité des livraisons plus importante.

Natoora est un service national en ligne de produits frais. Le principe est simple, un site internet permet d'acheter des produits provenant de fermes tels que des fruits, des légumes, des œufs, du lait, de la viande ou encore du poisson des artisans-pêcheurs. Les produits, variant selon les saisons, sont récoltés, cueillis, pêchés dans un délai très court avant la livraison. Cette entreprise a donc misé sur des plateformes dimensionnées en fonction du nombre de clients et non pas en fonction du nombre de produits. Le côté ludique du site Internet propose même aux consommateurs de choisir leurs producteurs « personnels » de produits frais et peuvent entrer directement en contact avec les exploitations. Le site donne accès à une information précise et abondante sur chaque producteur et chaque produit comme :

- les produits de saison disponibles chez les producteurs ;
- le goût des produits, en qualifiant et sélectionnant chaque producteur présent ;
- la traçabilité transparente et nominative de chaque produit livré, ainsi que la logistique de livraison nationale.

Les livraisons ne peuvent pas être efficaces sans une excellente logistique amont, un certain nombre d'innovations ont été nécessaires pour obtenir une distribution efficace mais surtout efficiente puisque l'atout majeur est la fraîcheur des produits en supprimant tout stock et tout intermédiaire :

- une boite rigide respectant la chaîne du froid ;
- un emballage banalisé, au lieu d'un emballage dédié ce qui permet de transporter les colis par Chronopost entre les producteurs et la plateforme parisienne ;

– le recourt à un triporteur électrique équipé d'un caisson réfrigéré et dont le changement de batterie s'effectue en une minute.

En réalité il existe cinq plateformes permettant de garantir la livraison dans le quart d'heure qui suit l'heure choisie par le client. Les produits frais sont donc acheminés vers la plateforme la plus proche de l'adresse de livraison. Les livraisons se font en trace directe (le livreur ne prend en charge qu'un colis à la fois, le livre et rentre à vide).

L'utilisation de l'énergie électrique est pointée du doigt du fait de son autonomie restreinte et des coûts supplémentaires pour s'équiper de matériel électrique. Mais au regard de cette entreprise, on aurait plutôt tendance à retenir une citation de J-P. Quenedey, directeur technique de Natoora :

« Si nous avons choisi l'électrique, ce n'est pas pour des raisons écologico-idéalistes, non, non, nous sommes une entreprise à but lucratif !, c'est tout simplement parce que c'est ce qui est le plus rentable pour nous. »[8]

L'énergie électrique est en effet plus rentable pour des livraisons en trace directe, le matériel est également plus fiable et plus durable [Ministère, 2003], mais ces propos sont tout de même à relativiser.

Pour résumer, l'utilisation de véhicules appropriés est un concept qui tient du bon sens. Mais la principale difficulté est effectivement de trouver ce genre de véhicule. Les définitions d'un véhicule approprié ne sont pas homogènes et se concentrent parfois sur des critères différents comme le gabarit ou le type de motorisation. Aujourd'hui, tous sont critiqués, que ce soient les véhicules de faible gabarit pour une autonomie de tournée limitée ou les véhicules électriques pour le traitement des batteries en fin de vie.

2.3.1.5 Partenariats entre acteurs

Les partenariats peuvent revêtir plusieurs formes : le partage des ressources, des risques financiers, de l'information et de la connaissance ou encore l'organisation en réseau des différents acteurs. Ils reposent principalement sur les systèmes d'information, les stockages de proximité et les réglementations.

[8] Propos recueillis lors du colloque du 24 novembre 2004 organisé par la DRAST « Centre-ville en mouvement : pour une meilleure qualité de vie ». Un compte-rendu complet de cette journée, rédigé par Éléonore Dubois, est disponible sur le site Internet de Transponts. Rapport consultable sur Internet

Le projet décrit ci-après regroupe les principaux distributeurs de fret pour effectuer leurs livraisons de manière commune. Ce projet est, de par sa réalisation, un peu particulier dans la mesure où il est à l'origine d'une initiative privée (de distributeurs). Le cas d'Amsterdam illustre cette catégorie. A Amsterdam, les livraisons sont souvent effectuées par des camions de tonnage conséquent presque vides car la situation géographique de la ville fait que ce sont les dernières livraisons internationales de fret. Ces camions sont inadéquats à la taille, à la capacité et à l'architecture historique et culturelle des rues du centre de la ville.

Les transporteurs devaient trouver une solution face au règlement municipal sur les gabarits et aux mesures d'incitation au regroupement des transporteurs. Puis les réglementations se sont vues durcies avec notamment l'arrivée d'une réglementation sur les émissions de GES. Un camion peut atteindre la zone d'accès limité s'il répond aux trois conditions suivantes : motorisation aux normes de l'émission Euro 2, longueur maximale de neuf mètres et au moins 80% du chargement doit être fourni ou enlevé dans le périmètre central. Ces réglementations ont engendré une réaction des principaux transporteurs. Face à la difficulté de répondre individuellement aux critères d'entrée (notamment le taux de charge de 80%), les distributeurs ont changé leur stratégie de livraison en optant pour un regroupement afin d'effectuer des livraisons communes. Un directeur est payé par la ville d'Amsterdam et joue le rôle de coordonnateur. Ainsi, près de 9 centres de distribution (plateformes existantes des transporteurs) sont mis à contribution. Les clients du système peuvent choisir parmi les neuf plateformes.

A la suite des réglementations, la ville d'Amsterdam a noté une réduction du nombre de camions en centre-ville. En 1997, 50% des habitants ont remarqué une réduction de gêne des camions dans le centre et l'ensemble des habitants souhaitent qu'il y ait encore plus de durcissement afin d'interdire les plus gros tonnages. Les détaillants n'ont noté aucun effet pervers sur l'approvisionnement ou l'accessibilité. Les distributeurs participants sont satisfaits puisqu'ils travaillent sur un degré d'efficacité plus élevé et diminuent le nombre de trajets vers le centre. Les réglementations ont influencé les transporteurs à modifier leur stratégie de livraison pour se diriger vers une collaboration, mais certains ont changé leur stratégie en laissant les livraisons pour le centre à la charge de la plateforme de distribution existante en bordure de ville. Désormais, l'approche de mutualisation des livraisons fait l'objet de recherches puisque l'organisation mutualisée relève d'un nombre limité de transporteurs, l'objectif étant de massifier les réponses favorables pour ce genre de partenariat.

Une forme intéressante de partenariat est de combiner le transport de marchandises et le

transport de passagers ce qui reste encore difficile à réaliser pour différentes raisons [Bous, 2001]. Les marchandises sont totalement passives tandis que les passagers agissent selon leurs besoins et envies. De plus, les passagers n'ont pas forcément envie d'attendre les opérations de chargement et de déchargement.

Des tentatives ont eu lieu notamment à Amsterdam quant à l'utilisation du tramway avec l'expérience du Cargo-tram dont l'investissement a été conséquent. Nous nous intéressons toutefois à une expérience, peut-être plus riche en enseignements puisqu'elle n'a pas donné lieu à expérimentation, celle de l'utilisation du métro pour effectuer les livraisons en ville [Robinson et Mortimer, 2004]. Les trois différents scénarios possibles étaient :

- utiliser uniquement le métro pour les livraisons de nuit ;
- utiliser uniquement le métro pour les livraisons de jour ;
- utiliser le métro le jour avec les passagers et les marchandises.

Les livraisons de nuit sont largement perturbées par les processus de nettoyage et d'entretien des rames. Mais globalement, la capacité reste alors très importante ce qui offre un potentiel certain.

Utiliser uniquement le métro pour les livraisons de jour implique une diminution nette des rames disponibles puisque la quasi-totalité des rames sont attribuées au transport de passagers. La capacité de transport est clairement moins importante que celle disponible la nuit.

Ainsi, il reste le dernier scénario mais les priorités entre transport de passagers et de marchandises ne sont pas définies et parfois difficiles à déterminer. Entre également en ligne de compte le problème de chargement/déchargement des rames : les passagers ne souhaitent pas être arrêtés plus longtemps aux stations, il faut donc pouvoir charger/décharger dans le temps imparti, c'est-à-dire environ vingt secondes. Il est donc nécessaire d'utiliser du matériel performant. Mais le concept reste prometteur puisqu'il propose une solution à long terme. Faute de matériel, les résultats restent insuffisants et la mise en place a été incomplète.

Les partenariats semblent être une source d'optimisation des coûts pour les transporteurs diminuant souvent l'occupation de la voirie. Mais les jeux de concurrence sont un frein considérable notamment pour le partage de données.

2.3.1.6 Réglementer

Les catégories de réglementations ne manquent pas, comme les horaires de livraisons, les restrictions sur le tonnage, le gabarit, le bruit, les émissions ou encore les groupes d'acteurs et les taxes. Alors, même si le but premier est la diminution des nuisances, il n'en est pas toujours ainsi, notamment à cause de l'apparition de nouvelles problématiques comme par exemple, les restrictions des véhicules en temps et/ou en espace qui affectent le potentiel de développement de solutions beaucoup plus efficaces que les réglementations [Browne *et al.*, 2007]. L'intervention publique sur le fret relève de deux domaines principaux : la réglementation (ou « police » au sens juridique de la circulation), incluant stationnement et organisation des livraisons, et l'urbanisme, qui agit sur la localisation des activités et des infrastructures de transport, et fixe les règles d'aménagement des aires de livraisons des véhicules utilitaires pour les futurs bâtiments [Dablanc, 1997].

L'expérience « Taxes pour le centre de Londres » illustre la sous-catégorie « taxes ». En juillet 2001, le maire Ken Livingstone a édité sa stratégie de transport pour la capitale qui incluait un projet de taxes pour le cœur central pour commencer à résorber le problème des embouteillages. Ainsi, le « Congestion Charging » ou l'installation de taxes pour accéder au centre a été mis en application le 17 février 2003. La priorité de cette mesure est de réduire la congestion du centre de Londres avec la volonté d'investir dans le transport à Londres pendant au moins dix années grâce aux revenus produits. Pour commencer, les automobilistes devaient payer £5 à la journée (approximativement 7,50€) pour utiliser la zone centrale entre 7 heures et 18 heures seulement du lundi au vendredi. Le tarif a été revu à la hausse pour atteindre £8 (approximativement 12€). Il n'y a aucune taxe pendant les week-ends et jours fériés. Plusieurs exemptions et tarifs spéciaux sont disponibles pour les véhicules « spéciaux » de transport tels que les taxis autorisés, les véhicules portant les personnes handicapées, les véhicules de service de secours, les motocyclettes et les véhicules dits propres (hybrides, électriques... atteignant des normes strictes d'émission). Les habitants de la zone centrale ne payent que 10% de la taxe. Les plaques d'immatriculation des véhicules entrants dans la zone centrale sont repérées par des caméras et sont enregistrées dans une base de données. Il n'y a pas de délimitation comme des barrières ou autres, les vérifications se font uniquement par les plaques d'immatriculation. Depuis l'introduction de cette taxe, le volume du trafic entrant dans la zone de remplissage pendant la plage horaire payante a baissé approximativement de 18%. Les résultats suggèrent que la taxe n'a pas eu d'impact économique sur les centres d'activité de la zone centrale concernée par ce

nouveau mode d'accès. Cependant, quelques commerçants n'en sont pas aussi persuadés. Plus de détails sont livrés dans le document fourni par le Victoria Transport Policy Institute dans [Victoria Transport Policy Institute, 2006], mais aussi dans [TFL, 2007] et [FTA, 2007].

Ces réglementations se révèlent être un outil flexible, peu coûteux et dont les conséquences se mesurent rapidement. Enfin, elles forcent les transporteurs à revaloriser leurs flottes de véhicules anciens [Dablanc, 2007a]. Cependant, elles peuvent braquer les différents acteurs qui privilégient alors les activités en périphérie moins contraignantes, comme les chantiers de rénovation[9], souvent faciles d'accès et où une surface de stockage sécurisée est possible.

2.3.2 Synthèse qualitative des résultats

Les tableaux suivants (issus des Figure 2.2 et Figure 2.3) proposent un récapitulatif des avantages et des inconvénients des principaux types d'expériences de chaque catégorie d'expérimentation.

La lecture de ces tableaux indique clairement qu'il n'y a pas de meilleures solutions et le choix d'un levier en particulier n'est pas évident. Certaines solutions paraissent intéressantes notamment lorsqu'elles sont regroupées, comme l'utilisation de véhicules de petits gabarits et une réglementation qui porterait sur la restriction d'un certain tonnage. D'autres au contraire, sont véritablement en opposition. Cette pluralité de solutions ajoute une autre dimension à la problématique car toutes les solutions n'ont pas été testées, et celles qui l'ont été ne sont pas forcément compatibles entre elles.

2.4 Modèles et outils du TMV

2.4.1 Spécificité de la modélisation du TMV

Les modèles de demande de transport sont une des composantes clés pour la planification du transport aux niveaux stratégique, tactique et opérationnel. Les services techniques de transport et de déplacement doivent prévoir les futurs besoins de transport de personnes et de marchandises afin de fournir l'infrastructure et les ressources humaines qui rendent de

[9] terme employé pour désigner un lieu, une habitation, un bâtiment à rénover

Leviers	Exemples	Avantages	Inconvénients
Mieux utiliser les infrastructures	Contrôle d'accès dans certaines zones	Transit stoppé Création d'emplois	Problème juridique Coût d'installation et de fonctionnement
	Harmonisation des réglementations au sein d'une conurbation	Réglementation claire	Mettre d'accord tous les responsables sur une même réglementation
	Utilisation des fleuves	Moyen discret Diminue la congestion du réseau routier	Lieu de livraison limité Nécessite un système de transport de marchandises "léger" pour finaliser les livraisons
	Utilisation du Métro ou/et Tram	Diminue le nombre de véhicules sur le réseau Optimise les moyens de transports existants	Nécessite des moyens lourds de chargement/déchargement Nécessite un réseau existant (sinon prix trop important)
	Plan d'aires de livraison	Permet de ne pas ralentir les flux de circulation Accroît la sécurité	Evolution des commerces à prendre en compte
Faciliter l'accès	Routage en zone congestionnée	Evite de surenchérir sur une congestion déjà existante	Gain pour une entreprise Coût du matériel et de personnel
	Freight Forum	Tous les acteurs sont informés Normalisation de l'information Facilité d'utilisation	Disposer des moyens pour la mise à jour
	Signalétique	Peu onéreux Réglementation claire	Détérioration, lisibilité, cohérence
Développer les stockages de proximité	Plateforme logistique	Diminution significative du nombre de véhicules de livraison sur le réseau	Type en fonction des produits ? Coûts additifs Problèmes juridiques et de rentabilité
	Relais de livraison	Baisse de l'encombrement licite ou illicite Création d'emplois	Concurrence entre transporteurs ne facilite pas la mutualisation Problème pour les destinataires pour la récupération de la livraison au relais Quelle technologie adopter? Coût de gestion du relais
	Consignes	Inclus la livraison des particuliers Livraisons plus rapides car ne nécessitent pas la présence du destinataire	Ne permet pas de gros volumes Ne permet pas la réception de tous les types de marchandises

Source : Auteur

FIG. 2.2 – Avantages-Inconvénients et exemples des trois premiers leviers

Leviers	Exemples	Avantages	Inconvénients
Utiliser des véhicules appropriés	Véhicules de petits gabarits	Accessibilité accrue	Congestion potentiellement plus importante car le nombre de mouvements de ces véhicules de livraison est plus important en ville
	Utilisation de véhicules propres	Diminution des émissions de polluants	Coûts additifs pour le transporteur sans retour de recettes supplémentaires
		Baisse des nuisances sonores	Est-ce vraiment une solution économiquement viable pour un transporteur ?
Etablir des partenariats entre acteurs	Mise en commun des organisations de tournées	Diminue le nombre de véhicules	Problèmes d'interopérabilité Problèmes de confidentialité Concurrence
Réglementer	Restriction de gabarit	Retire les véhicules de grands gabarits	Peut ajouter des mouvements supplémentaires
	Horaire de livraison	Peut étaler les mouvements de camions dans le temps	N'est pas toujours en phase avec tous les acteurs comme les commerçants qui ouvrent dans la matinée

Source : Auteur

FIG. 2.3 – Avantages-Inconvénients et exemples des deux derniers leviers

tels mouvements possibles. Or, la difficulté est d'appréhender les marchandises, non seulement dans le contexte de la ville mais surtout par le cadre de décision industriel à l'origine du transit des marchandises. En effet, le transport de marchandises ne peut pas être modélisé de la même manière que le transport de passagers pour une raison intuitive dans un premier temps : les marchandises ne se déplacent pas seules mais nécessitent une ressource pour être manipulées et transportées à l'inverse des personnes.

Même si aucune définition commune de la Logistique Urbaine (City Logistic) et du Transport de Marchandises en Ville n'est envisagée aujourd'hui, il existe néanmoins certains concepts communs qui justifient le développement d'autres approches (autres que les approches de transport de passagers) pour lutter contre les problèmes engendrés par le TMV. Dans [Ogden, 1992], Ogden donne quelques critères non triviaux, dont la liste figure ci-dessous, pour montrer que les problèmes du TMV n'ont pas la même dimension que les problèmes du transport de passagers :

- **les flux de marchandises considérées**. La diversité et les différentes manières de conditionner les marchandises imposent leurs modes de transport. Les moyens de manutention ne sont pas les mêmes en fonction du type de marchandises et influent également sur les modes de transport utilisés ;
- **l'unité d'analyse**. L'unité d'analyse pour le TMV peut être focalisée sur la marchandise ou sur le véhicule. Dans chacune des deux catégories, il existe encore une subdivision, comme les unités logistiques pour la marchandise (notion d'unité logistique standard, non standard, homogène, hétérogène). D'autres unités d'œuvre ont été étudiées notamment le temps de regroupement pour le transport dit capillaire dans [Ballot et Molet, 2003] ;
- **l'inclusion ou non des services de transport**. Pour les personnes, avoir plusieurs modes de transport à disposition et notamment tous les services associés (information, correspondance...) sont acquis depuis longtemps. Les marchandises n'ont pas ou peu ce genre de services ;
- **l'inclusion ou non des déplacements d'achats**. Les flux industriels et les flux des ménages sont deux grands types de flux de marchandises et ont des dynamiques complètement différentes ;
- **le mode considéré**. Les marchandises en ville ont le plus souvent un seul mode de transport : le transport par véhicule motorisé sur voirie ;
- **la géographie et l'espace de la zone d'étude**. La manière dont les marchandises sont

livrées et enlevées dépend des contraintes physiques et réglementaires de la ville. Un centre-ville historique avec des rues étroites ne peut pas accueillir des véhicules de gros gabarits ;

- **l'analyse des opérations du transport.** Les opérations de livraisons et d'enlèvements n'ont pas d'équivalent dans le transport de passagers ;
- **les acteurs considérés**. Le jeu d'acteurs influence beaucoup les flux de marchandises, selon les acteurs présents, le transport des marchandises varient en conséquence (tourisme, services, industriels...).

Ces dimensions donnent autant de raisons de bien distinguer les approches existantes du transport de personnes des approches spécifiques du TMV. Par exemple, l'unité d'analyse pourrait varier entre deux modèles, l'un considérant les véhicules comme unité, l'autre considérant les marchandises comme unité [Ogden, 1992], [Taniguchi et Thomson, 2002], [Paglione, 2006], [Allen *et al.*, 2003].

Enfin, une dernière argumentation consiste à décrire les rythmes urbains des marchandises et des personnes. Effectivement, les transports de marchandises en ville ont leurs rythmes propres par rapport au transport des personnes. La différence essentielle entre la mobilité urbaine des personnes et celle des marchandises est que les variations d'une ville à une autre sont faibles pour le TMV (pour chaque secteur d'activité) et parfois fortes pour les personnes [Dablanc et Patier, 2001].

2.4.2 Rétrospective de la modélisation du TMV

Différentes approches pour la modélisation du TMV sont possibles et ont déjà été proposées. On constate, par ailleurs, que la plupart des approches par les enquêtes ont souvent été poursuivies par la construction d'un modèle. Ambrosini et Routhier, [2004] proposent un excellent panorama international des différentes méthodes employées pour cerner le TMV et précisent le contexte et les raisons des choix effectués pour chaque cas étudié. La modélisation est une étape indispensable, puisqu'elle évite des coûts d'enquêtes supplémentaires. En effet, un premier jeu de données est nécessaire pour le calibrage d'un modèle, et les estimations suivantes sont faites à partir du modèle, évitant ainsi de répéter les opérations lourdes d'enquêtes, surtout dans ce domaine particulièrement difficile à sonder [Patier *et al.*, 2004].

Le transport de marchandises en ville, considéré comme un « mal nécessaire » par la plu-

part des citoyens, est une composante non négligeable et de plus en plus concurrentielle pour l'économie locale d'une ville. Avant 1970, la planification du transport de marchandises en ville n'a pas connu de grand développement, bien au contraire [Button et Pearman, 1981]. Il faut attendre 1974 pour que les premiers modèles dédiés aux mouvements de marchandises en ville soient proposés [Hutchinson, 1974]. Relativement simples, ils estiment les trajets des camions pour quelques types de marchandises. Puis, Slavin propose, dans sa thèse de doctorat, un modèle de génération et de distribution des trajets [Slavin, 1979]. Une classification des modèles de transport de marchandises en ville est établie par [Ogden, 1992]. Les modèles listés ont été récemment développés pour chaque catégorie de marchandises (alimentaire, produits frais, matériaux de construction, etc.). Les modèles alors créés sont des modèles à plusieurs étapes ou *multi-step*, largement utilisés dans la modélisation du transport de passagers (notamment un des plus courants, le modèle à quatre étapes). Ogden propose des modèles pour l'estimation de quantités de marchandises et pour l'estimation directe de camions. Ces modèles traitent d'attraction/génération et de distribution (modèles gravitaires) [Ogden, 1978] et ni la répartition modale, ni le chargement des véhicules, ni l'affectation des véhicules n'y sont étudiés en profondeur. Par la suite, List et Turnquist, [1994], Taylor, [1997], He et Crainic, [1998], Gorys et Hausmanis, [1999], Harris et Liu, [1998] et enfin Holguín-Veras et Thorson, [2000] reprennent ces idées et développent le spectre de modélisation en proposant des modèles gravitaires et d'entrées/sorties. Oppenheim [1993, 1994] tente d'agréger un modèle de transport de passagers avec un modèle de transport de marchandises. Pour cela, il considère que les flux de marchandises sont générés par le besoin d'une activité urbaine générique donnée et entreprise par différents voyageurs, qui comporte la consommation d'un produit donné. Les passagers sont supposés maximiser leurs utilités, par leur choix d'une destination (où ils trouveront une offre d'activités) et d'un itinéraire. Les lieux d'activité maximisent également leurs utilités par leur choix des fournisseurs de produits et des itinéraires du fret. Les tentatives de modélisation se tournent vers la construction de modèles liant le transport à l'utilisation de la voirie, comme le montre l'état de l'art technique de Southworth, [1995] qui propose une liste exhaustive des approches utilisées. Plus récemment, Munuzuri *et al.*, [2004] ont proposé une méthodologie fondée sur la maximisation d'entropie dans le but de construire une matrice Origine-Destination (OD) pour le transport de fret tenant compte des livraisons à domicile et de plusieurs secteurs de l'industrie.

D'autres types de modèles ont vu le jour, notamment ceux qui visent à optimiser la taille

et l'emplacement des plateformes logistiques publiques, comme le proposent Taniguchi *et al.*, [1999] ou plus récemment Crainic *et al.*, [2004]. L'intérêt de la recherche opérationnelle pour le routage des véhicules croît du fait d'ordinateurs toujours plus puissants et de technologies ITS (Intelligent Transport System) en plein développement [Thompson et Taniguchi, 1999], [Munuzuri *et al.*, 2005b]. Tous ces modèles prennent en compte les flux de marchandises en provenance des entreprises et à destination des commerçants. Pour leur part, Russo et Comi, [2004b] poussent le niveau de détail jusqu'au consommateur en considérant deux types de flux : ceux à destination du consommateur final et les flux dits logistiques, à vocation de restockage (comme les flux à destination des commerces).

Enfin, pour générer des scénarios de TMV et mesurer leur évolution, des outils de simulation ont été développés. Yannis *et al.*, [2006] étudient, dans le contexte urbain d'Athènes, les effets sur les mouvements de véhicules de restrictions imposées en matière de livraisons. Ces travaux reposent sur la méthodologie proposée CORINAIR [Eggleston *et al.*, 1993].

La classification des types de modélisation peut être faite selon des macrocatégories i.e. modèles économétriques et statistiques, modèles de demande, modèles d'équilibre et les modèles empiriques. Paglione, [2006] donne une excellente classification basée sur ces macrocatégories. Nous enrichissons cette classification et présentons le Tableau de la Figure 2.4 en mentionnant les avantages et inconvénients de chaque type de modélisation du transport de marchandises. Toutes ces catégories sont focalisées sur la marchandise et sont donc appelées « Commodity-Based » (décrites dans le paragraphe 2.4.2.3), sauf les cases grisées qui indiquent que ce sont des catégories « Trip-Based » (développées dans le paragraphe 2.4.2.2).

Aujourd'hui quelques modèles spécifiques de transport de marchandises se démarquent, mais la plupart sont créés à partir de la construction communément utilisée des modèles de transports classiques. Sur la base des enquêtes réalisées dans le cadre de l'action BESTUFS II, WP3, Meimbresse et Sonntag, [2007] ont détaillé douze modèles, qu'ils ont classés dans les trois catégories suivantes :

- les modèles économétriques qui ne prennent pas en compte la distribution spatiale (c'est-à-dire que les résultats sont générés globalement pour la ville) ;
- les modèles de demande de transport pour calculer le volume de trafic par zone (représente l'équivalent des lignes et des colonnes des matrices OD) ;
- les modèles de distribution de transport pour calculer les matrices OD complètes.

De plus, ils ont trouvé deux autres outils, à savoir CityGoods© [Gentile *et al.*, 2007] et

Macro-catégories	Catégories	Sous-catégories	Caractéristiques	Avantages	Inconvénients
Econométrique et statistique	Série temporelle	-	Analyse longitudinale des données	Facile d'implémentation, ne requiert pas beaucoup de données, capable de prédire les tendances futures	Analyse agrégée, ne permet pas l'analyse de la demande en transport
	Elasticité	-	Analyse des variables qui influencent la demande de transport	Approche multi modale, résultats rapides	Ne peut pas considérer les influences croisées
Spatial	Flux	*Equilibre des flux*	Optimisation mathématique des flux pour un coût minimum sur le réseau	Analyse de l'offre, de la demande et des interactions des flux sur le réseau	Complexe et difficile d'implémentation parce que demande beaucoup de données
	Equilibre des prix	*Equilibre des prix*	Cherche le point d'équilibre des prix entre l'offre et la demande		
	Entropie	*Equilibre statistique*	Cherche les flux qui maximisent l'entropie de la ville		
	Equilibre	*Equilibre économique global*	Combinaison des deux premiers		
Demande	Demande agrégée	*4-étapes*	Application du modèle en 4 étapes sur les flux de marchandises	Connaissance approfondie car beaucoup d'expérience sur ce domaine en transport de passagers	La demande en fret est beaucoup plus complexe que la demande des passagers, cette catégorie n'est pas toujours pertinente
		Entrées sorties	Utilisation des coefficients d'entrées/sorties pour déterminer la génération de la demande	Facile d'implémentation, une fois les coefficients déterminés	Même remarque que pour les séries temporelles
	Demande désagrégée	*Choix de mode*	Analyse des choix de mode	Utilisation des modèles discrets	Limité dans un contexte urbain
		Routage	Optimisation du routage des véhicules selon diverses contraintes	Utilisation des technologies ITS	Les résultats sont parfois durs à interpréter. Simplification des contraintes à des fins algorithmiques
Empirique	-	-	Estimation empirique par rapport à une situation de référence	Prend en compte les spécificités de la situation de référence	Ne prend pas en compte les spécificités de la ville en question (contexte)
Dynamiques des systèmes	-	-	Analyse les rétroactions du système. Modèle de structure du système	Analyse des événements imprévisibles. Evolution temporelle du système via des équations différentielles	Beaucoup de variables sont nécessaires. Quantification des liens entre les variables peut être floue

FIG. 2.4 – Classification des types de modèles de TMV inspiré de [Paglione, 2006]

le modèle de l'Université de Séville [Munuzuri *et al.*, 2004]. Ce dernier est construit avec un modèle mathématique d'entropie et génère la matrice OD de l'heure de pointe. CityGoods©, quant à lui, est un modèle fondé sur la codification NACE, qui est constituée de cinq chiffres, chacun représentant une branche d'entreprise selon une structure hiérarchique.

Pour plus de détails sur les modèles et les outils développés, on se reportera à [Russo et Comi, 2004a, 2005], excellent état de l'art à l'échelle européenne sur la distribution de marchandises en milieu urbain. Les travaux de Regan et Garrido, [2000] représentent également une base de connaissance appréciable, puisque ces auteurs ont répertorié les recherches sur la demande de marchandises et la modélisation du comportement des détenteurs de fret. Les revues de questions les plus récentes ont été publiées par Ambrosini *et al.*, [2007a, 2007b].

La plupart des modèles peuvent être classifiés en trois groupes et déclinés selon leur niveau d'agrégation formalisé par Meimbresse et Sonntag : les modèles en 4 étapes, Trip-based et Commodity-based.

2.4.2.1 Approche par le modèle traditionnel en 4 étapes

Une première approche de modélisation consiste à développer ou adapter l'approche traditionnelle de modélisation à quatre phases des modèles dits « à 4 étapes » fréquemment utilisée pour le transport de passagers [Ortúzar et Willumsen, 1994]. La Figure 2.5 illustre le schéma de principe de la modélisation en 4 étapes.

Après un traitement de l'information et des données, la génération des trajets, la distribution des trajets zone à zone et la répartition modale du transport consistent en la construction d'une matrice Origine Destination (OD) souvent établie sur des modèles de Bell, [1983] pour chaque mode de transport.

Le transport des marchandises sur le réseau est alors estimé comme un pourcentage du trafic habituel (déplacements de personnes). Cette démarche se heurte à la difficulté d'introduire une marchandise fractionnée dans des tournées complexes où la variété des conditionnements, les contraintes d'accessibilité et de flux tendus sont des critères plus déterminants que le poids de la marchandise. De plus, le modèle traditionnel en 4 étapes a pour unité la personne, un agent actif et tous les agents agissent potentiellement de la même manière sur le système de transport. Une des adaptations du modèle à 4 étapes pour les marchandises est la considération des

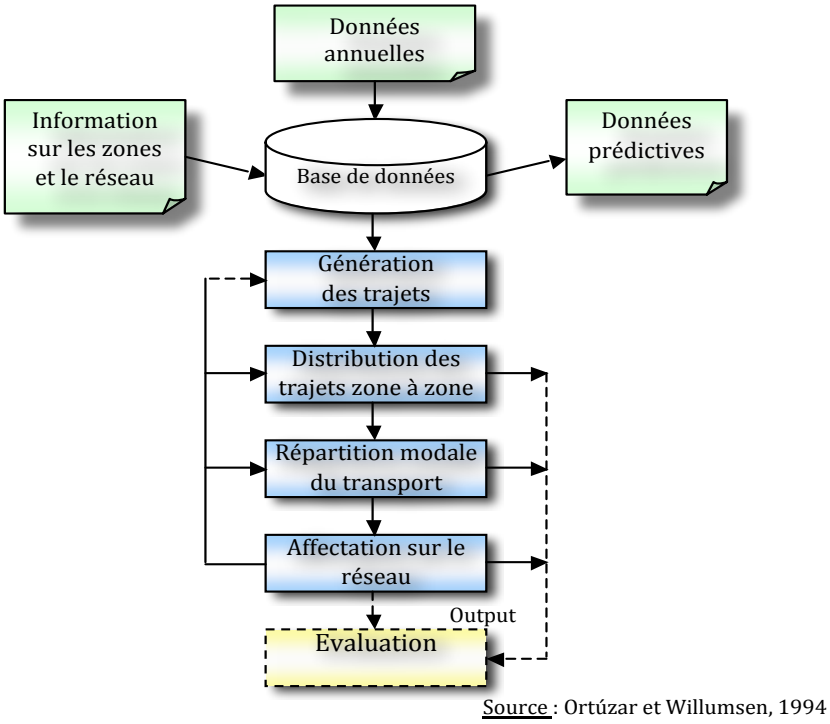


FIG. 2.5 – Schéma de principe de la modélisation en 4 étapes

marchandises (à la place des personnes). Or, ces marchandises sont passives et dépendent des agents économiques qui interviennent sur le système de transport. Ces agents actifs influencent le système de transport selon une rationalité différente des autres : par exemple, les opérateurs de transports en compte propre ne raisonnent pas de la même façon que les opérateurs de transports en compte d'autrui. Dans ce type de modèle, la distinction entre transport de fret et transport de personnes est floue et le choix du véhicule, le mode d'organisation et l'itinéraire ne peuvent être déterminés par les procédures classiques de répartition modale et d'affectation. Par conséquent, ces modèles peuvent à peine calculer l'effet des mesures ou des développements liés au transport de fret.

C'est pourquoi d'autres approches ont été développées, les approches « Trip-Based » et « Commodity-Based » décrites dans les deux prochains paragraphes.

2.4.2.2 Les approches de modélisation « Trip-Based »

Le deuxième groupe de modèles est dit « Trip-Based », c'est-à-dire que l'unité d'observation est le flux de véhicules qui est alors estimé en utilisant des indicateurs de génération de trajets. Ces indicateurs émanent du nombre de livraisons, de la surface des entreprises (en m^2) ou encore du nombre d'employés. Une fois l'affectation des trajets sur les voies d'accès d'une ville effectuée, le trafic de fret urbain peut être estimé. Eriksson, [1996] propose une approche empirique qui distingue les différents secteurs industriels, types de trajets, types d'opérateurs, types d'origines et destinations et variations de circulation en termes de flux suivant les années, les mois et les jours. La contribution française au groupe de travail européen du COST 321 sur la distribution urbaine de marchandises [Dufour et Patier, 1997] consiste principalement en trois enquêtes de grande envergure sur le trafic de marchandises urbain dans les villes de Marseille, Dijon et Bordeaux. Les résultats obtenus ont fourni une base solide pour établir un modèle qui calcule l'utilisation de l'infrastructure par le transport de fret (prenant en compte l'utilisation du réseau et les stationnements) et la distance parcourue par un véhicule. Le LET (Laboratoire d'Économie des Transports) propose le modèle appelé Freturb© qui fait partie de ce groupe de modèles. Malheureusement, ce type de modèles ne peut pas évaluer de nouveaux systèmes de transport parce que les indicateurs de génération des trajets sont obtenus à partir de données empiriques. Nous pouvons également retenir les contributions de Munuzuri dans [Munuzuri *et al.*, 2004] qui propose un modèle construit à partir de la maximisation d'entropie prenant en

compte dans son dernier développement les livraisons à domicile.

2.4.2.3 Les approches de modélisation « Commodity-Based »

Le troisième groupe de modèles regroupe des modèles de simulation de flux de marchandises dit « Commodity-Based ». Ce type de modèle est basé sur l'assimilation du système de fret par les mouvements des marchandises et non des véhicules (« Trip-Based »), c'est-à-dire que la circulation des marchandises est modélisée directement. Les flux de marchandises sont générés par des indicateurs de consommation (des magasins ou des consommateurs). Un modèle pour le chargement des véhicules assigne alors les flux de marchandises aux tournées des véhicules, après quoi les tournées sont assignées au réseau du trafic. Dans ce groupe de modèles, on retrouve les modèles multi-étapes d'Ogden [Ogden, 1992], les modèles d'entrées/sorties (Input/Output) de Harris et Liu [Harris et Liu, 1998] et les modèles d'équilibre spatial des prix [Oppenheim, 1994]. Enfin, Boerkamps et Binsbergen proposent une approche pour la modélisation et l'évaluation de la distribution urbaine de fret nommée GoodTrip© qui fait partie de ce groupe de modèles [Boerkamps et Binsbergen, 1999] et sera décrit ultérieurement.

2.4.3 Les outils d'aide à la décision pour le TMV

Dans cette section, nous nous concentrons sur les modèles Wiver© [Meimbresse et Sonntag, 2000] à présent relayé par VISEVA, instrument d'enquête développé par l'université de Dresde et PTV, GoodTrip© [Boerkamps et Van Binsbergen, 1999], à présent abandonné faute de données disponibles et Freturb© sont présentés pour comprendre les types d'outils pour l'aide à la décision dans le domaine du TMV. Enfin, on peut noter l'apport de Distra© en Suède [Inregia, 2003] et le travail de [Debauche et Duchateau, 1998] pour avoir tenté de simuler des scénarios de prospectives pour en analyser les conséquences sur l'environnement, l'économie et la congestion.

2.4.3.1 Wiver©

Le modèle Wiver© a été développé sur la base d'enquêtes menées à Berlin, Munich et Hambourg et d'analyses de données. Il a pour but de prévoir et de calculer le trafic à caractère commercial dans une ville. Il est construit selon deux grandes catégories de données. La première

catégorie de données regroupe les données traduisant le comportement, données brutes par secteur d'activité issues principalement des enquêtes effectuées :

- nombre de tournées, distribution des destinations par véhicule et par jour ;
- objectif du trajet ;
- distance et paramètres pour la modélisation des interactions Origine/Destination ;
- degré d'efficacité des tournées par secteur d'activité et par type de véhicule (appelé « level of savings ») ;
- distribution des tournées en fonction du temps.

La deuxième catégorie de données regroupe les données statistiques (données remaniées ou calculées à partir des données des enquêtes). Ces données s'expriment par zone :

- distances dans une zone de recherche jusqu'aux autres zones ;
- calcul pour qu'une zone soit potentiellement une origine (calculé à partir du nombre d'employés et d'employés relatifs au trafic par secteur d'activité) ;
- calcul pour qu'une zone soit potentiellement une destination.

La Figure 2.6 montre la structure du modèle Wiver©.

Wiver© est un modèle de simulation orienté sur le comportement, qui reconnaît la complexité des chaînes de trajets pour le trafic de fret commercial. En effet, Wiver© différencie dix secteurs d'affaires et quatre types de véhicule :

- véhicules privés ;
- utilitaires de moins de 2,8 tonnes ;
- camions entre 2,8 et 7,5 tonnes ;
- camions de plus de 7,5 tonnes.

Les calculs rendent compte d'informations sur les zones d'origine et de destination. La matrice de trafic de fret référence le nombre de véhicules ou le poids du fret (en tonnes). Des résultats peuvent être différenciés par secteur d'activités, type de véhicule et heure. Plus de détails sont présentés, ainsi que plusieurs résultats du modèle, dans [Meimbresse et Sonntag, 2000].

En 2003, l'approche Wiver© a été généralisée par la théorie des systèmes dans [Boyce *et al.*, 2002] et le programme informatique VISEVA de l'université de Dresde [Friedrich et *al.*, 2003] a été développé et relègue aujourd'hui Wiver©.

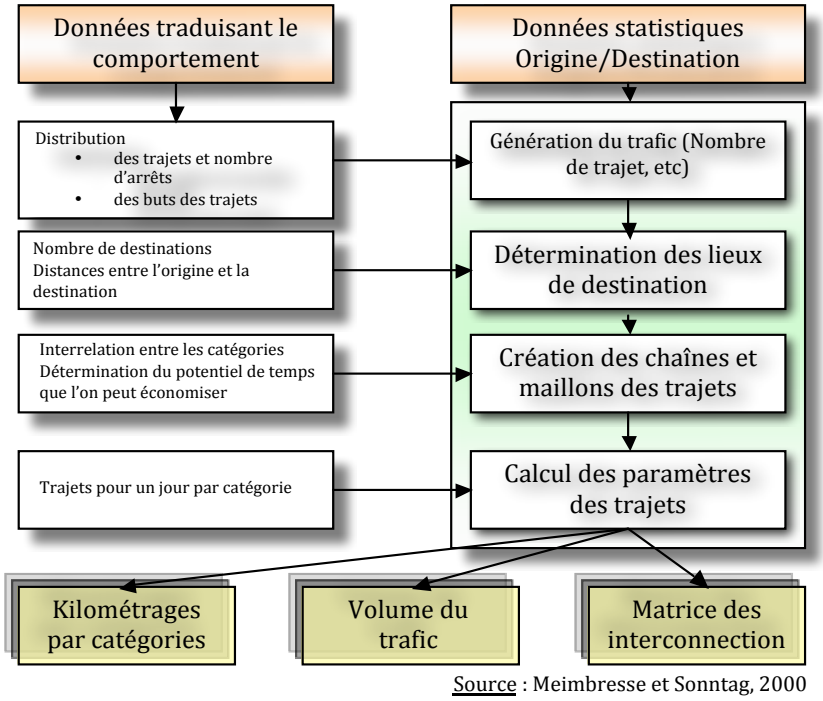
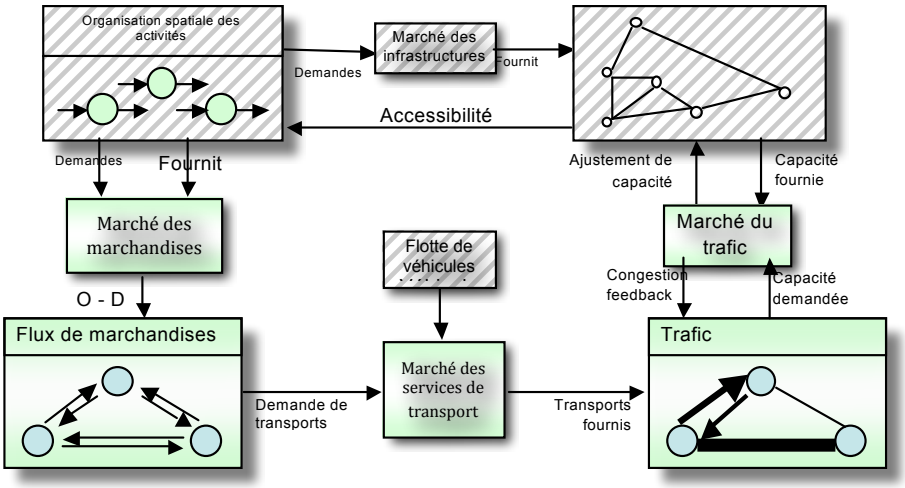


FIG. 2.6 – Structure du modèle Wiver©



Source : Boerkamps et Van Binsbergen, 1999

FIG. 2.7 – Structure du modèle GoodTrip©

2.4.3.2 GoodTrip©

L'outil GoodTrip© a été développé pour évaluer les mouvements de marchandises en ville. Il fonctionne étape par étape, chacune correspondant à la distribution du fret selon des données géographiques, économiques et logistiques. Il est basé sur la chaîne logistique et estime les flux de marchandises, le trafic du fret en ville et ses impacts.

Cet outil a été déployé sur la ville de Gröningen pour estimer les impacts des différentes mesures [Boerkamps et Binsbergen, 1999]. La Figure 2.7 met en évidence les étapes spatiales, économiques et logistiques de la modélisation et la partie traitée par le modèle qui est en vert (non hachurée).

L'organisation spatiale décrit le lieu où les gens vivent et travaillent, où les équipements sont localisés et où les marchandises sont produites et consommées. L'organisation spatiale et l'activité ont comme conséquence une demande du transport de personnes et des marchandises. L'infrastructure est le moyen élémentaire pour fournir cette demande. Elle se compose de rues (arcs) et de carrefours (nœuds), dont chacun possède ses propres caractéristiques comme la vitesse et la capacité.

La demande de marchandises est dérivée de l'organisation spatiale, de la qualité de l'accessibilité et des résultats quant aux demandes de transport. Le marché des transports lie la demande et l'approvisionnement en services de transport. Les fréquences, les coûts, la fiabilité et la flexibilité de la livraison sont des aspects importants de demande, alors que la flotte de véhicule, les ressources humaines et les dispositions d'infrastructure sont des aspects importants d'approvisionnement. Les décisions sur le marché des transports ont comme conséquence la circulation par mode, celle-ci peut être mesurée en tournées de véhicule par unité de temps. Les tournées de véhicule sont faites sur le réseau multimodal d'infrastructure.

Basé sur la demande du consommateur, le modèle GoodTrip© calcule le volume par type de marchandise en m^3 dans chaque zone. L'équation **(2.1)** suivante donne l'estimation de la demande en prenant des caractéristiques de distribution :

$$Q^r_{G'} = \sum_{p=1}^{P} \sum_{g=1}^{G} q^r_{g,p}.F^r_{g,p} \tag{2.1}$$

Avec :

- $Q^r_{G'}$: demande pour une destination r (établissement r) pour les marchandises globales G' ;
- $q^r_{g,p}$: volume q d'une livraison distincte d'un établissement r pour un type de marchandise g par unité de temps p ;
- $F^r_{g,p}$: nombre de livraisons par unité de temps p pour le type de marchandise g.

Les flux de marchandises de la chaîne logistique sont déterminés par la distribution spatiale des activités, de l'attractivité et les parts de marché de chaque activité. Ce calcul de concentration de marchandises commence par les consommateurs et se termine par les producteurs ou la frontière de la ville. Un modèle Logit multinomial est utilisé pour décrire les décisions à partir de variables d'attractivité, que sont la production et le nombre d'établissements du même type pour un établissement donné. Les détails des équations **(2.2)** et **(2.3)** et de leurs constructions sont donnés et développés dans [Wisetjindawat et Sano, 2003] :

$$P(C) = \frac{\exp(V_C)}{\sum_{C' \in C} \exp(V_{C'})} \tag{2.2}$$

$$V_C = f(x_{1C}, x_{2C}, ..., x_{kC}) \tag{2.3}$$

Avec :

- $P(C)$: proportion de marchandises achetées à l'établissement de type C ;
- V_C : fonction d'utilité de l'établissement de type C ;

– x_{kC} : attributs représentants l'attractivité de l'établissement de type C, comme la production totale ou le nombre d'établissements d'entreprises.

Ensuite, les flux de marchandises de chaque type sont combinés en employant des probabilités de regroupement (combinaisons, permutations). Chaque combinaison de types de marchandises est considérée comme un flux différent. Puis, les flux combinés de marchandises sont assignés aux tournées des véhicules. La conversion est faite en termes d'origine destination (OD). Le type d'activité de l'origine détermine le mode de transport, la capacité du véhicule, le chargement maximum et le nombre maximum des arrêts par tournée. L'activité de la destination détermine la fréquence minimale de la livraison. La conversion a comme conséquence des matrices OD et une liste de tournées par mode.

Les tournées par mode sont assignées à leurs réseaux d'infrastructure, ayant pour résultat des charges de réseau, par mode sur chaque réseau. Les charges de réseau sont alors employées pour déterminer la distance parcourue des véhicules par mode.

Finalement les émissions et l'utilisation d'énergie par mode sont calculées selon les distances parcourues et les charges de réseau. Le processus pour la modélisation est séquentiel : il n'y a aucune rétroaction aux phases précédentes ce qui ne rend pas compte du caractère dynamique de ce que l'on modélise.

2.4.3.3 Freturb©

L'un des axes du programme national piloté par la DRAST et l'ADEME a consisté en la mise au point d'un outil d'aide à la décision qui permette d'établir un diagnostic et de simuler l'impact de diverses politiques présenté dans [LET, 2001], largement développé depuis, comme récemment [Routhier et Toilier, 2007]. La démarche de modélisation Freturb© s'appuie sur les travaux d'analyses et d'enquêtes menées dans trois villes : Marseille, Bordeaux et Dijon. Ces enquêtes concernent les échanges de biens et de produits entre les établissements industriels, commerciaux et tertiaires. Après diverses analyses de ces enquêtes, il en ressort des tendances fortes [Patier *et al.*, 2000] :

– le nombre hebdomadaire moyen d'opérations de livraison ou d'enlèvement par emploi est fortement lié au type d'activité et à la taille des établissements ;
– en milieu urbain, le nombre de livraisons est nettement supérieur au nombre d'enlèvements ;

- le compte propre est prédominant ;
- près de la moitié des livraisons ou enlèvements d'une agglomération est réalisée par le commerce ;
- les trois quarts des parcours sont réalisés en traces directes mais n'assurent que le quart des livraisons.

Et des liens fonctionnels remarquables :

- le nombre d'arrêts d'un parcours dépend du mode de gestion (i.e compte propre, compte d'autrui) ;
- le mode de gestion est lié à l'activité ;
- le mode d'organisation (tournées, traces directes) et le mode de gestion sont liés ;
- le type de véhicule utilisé dépend du mode de gestion ;
- la distance parcourue entre chaque arrêt dépend de la taille de la tournée ;
- plus la tournée est longue, plus le temps de chargement/déchargement est court.

Le modèle Freturb© est construit suivant quatre modules décrits dans les sous sections suivantes.

2.4.3.3.1 La génération des livraisons et enlèvements et des déplacements d'achat

Le nombre de livraisons ou enlèvements sur une zone z, $Nbmvt(z)$, est la somme sur tous les types d'établissements pondérée par le nombre d'établissements de la zone, du nombre $nbmvt(i)$ de mouvements i dans la zone z avec :

$$Nbmvt(z) = \sum_i (nbetab(i, z) \times nbmvt(i))$$

où pour chaque type i décrit par un type d'activité et une classe de taille d'établissements $nbmvt(i)$ désigne le nombre de mouvements générés par un établissement de type i et $nbetab(i, z)$ représente le nombre d'établissements de type i dans la zone z.

Ce module s'appuie sur deux invariants essentiels : l'effet de l'activité et celui de la taille des établissements.

2.4.3.3.2 La simulation d'une occupation de la voirie par les véhicules de livraison en stationnement illicite et par les véhicules de livraison en circulation

Cette partie concerne implicitement deux modules de l'outil. La part du stationnement sur voirie dépend de l'environnement de chaque établissement. Elle est calculée pour chaque zone z, par la quantité $\%stat(z)$. Si j désigne le type d'activité et v le type de véhicule (voiture particulière ou fourgonnette, camionnette de moins de 3,5 t, camion porteur, camion articulé), la durée moyenne de stationnement sur voirie est calculée pour chaque type d'activité et chaque type de véhicule : $duréeMoy(j, v)$. L'emprise au sol de chaque type de véhicule (mesurée en unité voitures particulières) est notée $emprise(v)$. Sa valeur est de 1 pour une voiture particulière (VP), 1,5 pour un véhicule utilitaire de moins de 3,5 t. La durée d'occupation de la voirie par les véhicules de livraison à l'arrêt dans une zone z (pour des raisons de livraison ou d'enlèvement) est obtenue ainsi :

$$DureeArret(z) = \%stat(z) \times \sum_n (\sum_j (nbetab(z, j, v).nbmvt(j, v).dureeMoy(j, v).emprise(v)))$$

Cette durée est calculée sur chaque zone en heures $\times$ unité VP sur une semaine. La principale relation fonctionnelle utilisée dans ce module met en relation le nombre d'arrêts dans la tournée et la durée moyenne d'un arrêt de cette tournée.

Les flux de transport de marchandises en ville ainsi que leurs caractéristiques (occupation de la voirie en kilomètres parcourus et en durée) sont expliqués par trois principaux facteurs :

- le type d'activité desservie ;
- le mode de gestion (compte d'autrui, compte propre destinataire et expéditeur) ;
- le mode d'organisation des parcours, taille des tournées, distance entre deux arrêts, vitesse des trajets) ;

L'occupation de la voirie est exprimée par zone en $véhicules.km$- équivalents VP, ainsi qu'une occupation de la voirie en heures équivalents VP. Deux types de trafics sont calculés : le trafic généré et le transit de zone.

2.4.3.3.3 La mesure d'une occupation instantanée de la voirie par ces mêmes véhicules

En intégrant les rythmes journaliers et saisonniers, on obtient une occupation instantanée de la voirie par les véhicules en stationnement et en circulation. Celle-ci est exprimée en nombre moyen d'unités VP en stationnement et en circulation sur la période considérée.

La Figure 2.8 montre les liens entre ces quatre modules et la structure générale du modèle.

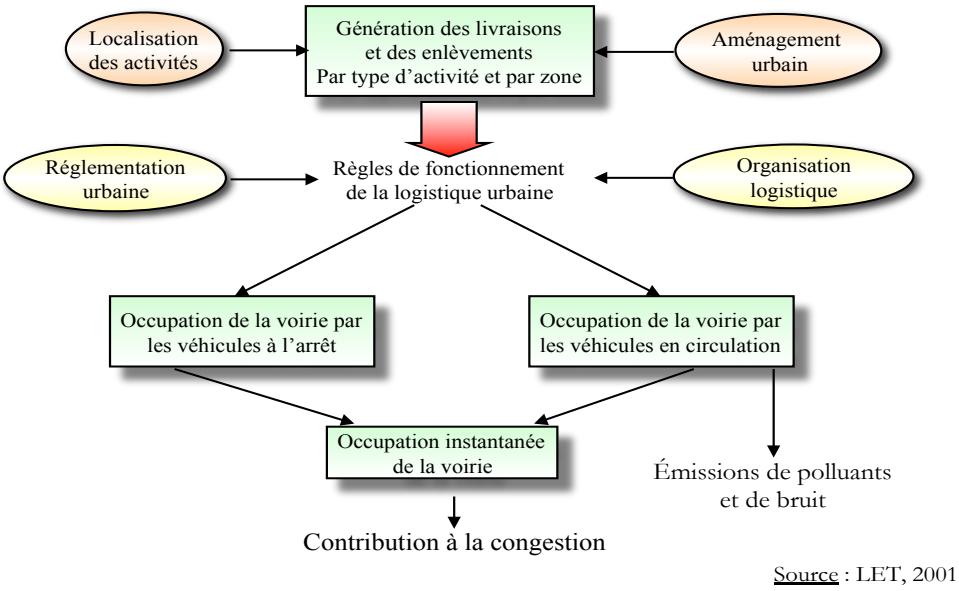


FIG. 2.8 – Structure modulaire de Freturb©

2.4.4 Conclusion sur les modèles et outils du TMV

Même si les modèles semblent complets, le manque de statistiques freine le développement des outils ou contraint le modélisateur à revoir à la baisse la finesse des variables impliquées. De plus, la fiabilité des statistiques lorsqu'elles existent est souvent remise en cause [Tavasszy, 2006], notamment lorsqu'elles sont utilisées pendant plusieurs années comme c'est le cas pour l'outil Freturb©. Au niveau national, des ensembles de données d'une qualité raisonnable, estimant le trafic et les performances de transport, peuvent être disponibles. Malheureusement, ce genre de données est inutile pour estimer des paramètres et le calibrage des modèles urbains de trafic de marchandises. Mais ce problème commun a néanmoins été positif dans la mesure où il a été la source du développement de plusieurs approches différentes.

Outre les différents modèles concernant le transport de marchandises en ville, des outils d'aide à la décision sont venus appuyer certaines volontés en termes de politique de circulation et de réglementation. Dans la plupart des cas, ces outils d'aide à la décision sont le développement informatique des quelques modèles précédents.

La modélisation du TMV est encore une activité trop récente pour aboutir à un domaine à maturité. Cependant, il existe de très nombreux modèles et outils de simulation pour le trans-

port de marchandises mais qui malheureusement ne prennent pas en compte les spécificités urbaines (comme les réglementations, les caractéristiques des réseaux, de l'agencement spatial des entreprises et des ménages ou encore la localisation de la ville à l'échelle nationale).

Les outils donnant le plus de résultats sont développés à des fins d'optimisation, comme le chargement et le routage de véhicules, mais ne constituent pas une approche conceptuelle du TMV car ils sont en effet basés sur des algorithmes.

Si on constate aujourd'hui que peu de modèles considèrent les caractéristiques de la chaîne logistique, c'est aussi parce que les premières démarches de modélisation ont été lancées par des modélisateurs dont la culture est l'économie des transports. Ainsi, une vision orientée plus Supply Chain permettrait de considérer le TMV par rapport à la structure même des multiples chaînes logistiques qui le constituent.

Les outils ne permettent pas le développement de scénarios vis-à-vis de toutes actions possibles pour améliorer le TMV, ce qui manque de pertinence lorsqu'il s'agit d'améliorer le TMV au sens large. Il s'agit donc de définir une approche de modélisation assez générique pour intégrer tous les leviers et leurs déclinaisons possibles.

Enfin, le manque de rétroactions impose des outils statiques. Ainsi, la dynamique des comportements des acteurs et leurs effets sur le TMV ne sont pas pris en compte en fonction du temps, ce qui paraît contradictoire avec les différents horizons[10] dans le TMV.

2.5 Conclusion

L'optimisation du transport de marchandises en ville offre un grand nombre d'applications pour les nouvelles technologies et les nouveaux concepts. La préoccupation pour le transport de fret est encore récente et les solutions actuelles, qu'elles soient techniques et/ou organisationnelles, ne sont que des améliorations de l'existant, le plus souvent dans une continuité technologique. Afin de développer des centres-villes attractifs et de ne plus gaspiller les ressources d'énergie fossile, la conception de nouveaux systèmes de fret urbain doit être faite de manière à ce que les marchandises soient acheminées, les petites entreprises et artisans travaillent facilement et les magasins de détails et restaurateurs soient approvisionnés de façon efficace et

[10] Notions détaillées dans le chapitre 3

efficiente.

Les modèles de transport de fret sont généralement décrits en employant deux termes : « Commodity-Based » (CB), et « Trip-Based » (TB). Les modèles CB sont représentés par une matrice Origine -Destination (OD) et la quantité de marchandises déplacées. Les modèles TB sont représentés par la circulation dans différents modes et en mettant l'accent sur le véhicule et ses opérations. À partir d'une perspective économique, la demande de transport de fret constitue une demande dérivée, signifiant que son existence est dérivée de la nécessité de déplacer des marchandises entre différents points dans l'espace. En conséquence, les premières études ont porté sur les modèles CB parce qu'ils sont motivés par la consommation de marchandises par la communauté, représentant la demande réelle. Néanmoins, les modèles TB sont orientés vers le résultat des décisions logistiques prises par les transporteurs et sont donc utiles à l'identification des paradigmes d'affectation requis pour les modèles. Ainsi, les deux types de considération sont nécessaires pour les modèles de demande de fret car ils seront employés pour différents buts.

Les approches utilisées diffèrent selon le contexte de la ville, la situation géographique et bien évidemment le point de vue du chercheur sur les aspects technique et économique. Mais toutes s'accordent à atteindre un objectif : celui d'optimiser les activités de transport et de logistique des acteurs privés et publics à l'intérieur de la cité en minimisant les effets néfastes (environnement, congestion, consommation d'énergie) [Taniguchi et Thomson, 2002].

Grâce aux éléments présentés dans ce chapitre, nous pouvons mettre en avant une orientation possible pour la modélisation du TMV. Il s'agit donc d'intégrer les deux aspects transport de marchandises et déplacements de véhicules. Le modèle doit être évolutif, i.e. il doit se fonder sur la structure même du TMV et proposer une approche à la fois statique pour la relative simplicité de développement et dynamique pour considérer l'évolution des comportements et les effets contre intuitifs générés par rétroaction. Ce type de modèle est entièrement détaillé dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Modèle conceptuel du TMV pour l'aide à la décision

Sommaire

3.1 Introduction **68**

3.2 Problématique **69**

3.2.1 Un besoin des autorités locales 69

3.2.2 La logistique en ville : un système complexe 70

3.2.3 L'acquisition de la connaissance pour la décision 72

3.3 Modèle conceptuel **74**

3.3.1 Méthodologie de modélisation 74

3.3.2 Analyse causale 75

3.3.3 Le modèle conceptuel 83

3.4 Conclusion **91**

3.1 Introduction

L'évolution de la société moderne façonne le contexte de la gestion de la mobilité à tous les niveaux d'horizon, long, moyen et court termes. Les styles et modes de vie des citoyens, l'évolution des processus industriels de production et de distribution et l'amélioration des moyens techniques du transport apportent en permanence un nouveau cadre de travail pour les collectivités locales dont le rôle et les objectifs sont multiples. Au-delà du développement d'une stratégie d'adaptation consistant à réduire les conséquences néfastes sur le changement climatique mené par le MEEDDAT (Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire), de la gestion de l'espace public, de la préoccupation du développement de l'économie locale, l'un des rôles phares des collectivités est d'accompagner les porteurs de projet dans leur démarche. Parmi le nombre important d'expériences que l'on peut tester, les autorités organisatrices de transport ont à faire un choix. L'évaluation de toutes les possibilités, de tous les leviers d'action, devient une priorité pour le décideur. Or, les travaux de recherche montrent que les méthodologies d'évaluation sont difficiles à déterminer et demeurent souvent incomplètes [Albergel *et al.*, 2006]. Par conséquent, l'évaluation elle-même est naturellement élevée à l'état d'utopie. Plus que le manque d'outils d'aide à la décision, le cadre décisionnel pour chaque horizon et chaque fonction du système n'est pas formalisé, ce qui est pourtant indispensable à la prise de décision.

Dans ce chapitre, nous proposons un modèle conceptuel pour représenter et surtout pour expliciter la structure du système TMV ainsi que les influences croisées entre les variables de ce système. Cette représentation du système permet de poser un cadre décisionnel pour le développement d'outils d'aide à la décision au profit des autorités locales afin d'être capable de proposer des jeux de scénarios faisant varier les paramètres et variables de décision du système. Grâce à une analyse causale, nous pouvons considérer les relations entre les variables, leurs influences croisées et leurs liens avec les autres types de flux liés au transport de passagers et mettre en avant les conséquences lors de modifications possibles dans la distribution des flux.

Dans la première partie, nous explicitons les besoins des autorités locales, faisons le lien entre ces derniers et la complexité du système considéré qui est le TMV et argumentons sur la difficulté d'accumuler la connaissance pour la décision dans ce domaine.

La deuxième partie décrit le modèle conceptuel du TMV en explicitant les sous-ensembles et leurs interactions par une analyse causale de la problématique générale du chapitre 1 et la

représentation du système TMV par une méthode de modélisation d'entreprise nommée GRAI.

3.2 Problématique

3.2.1 Un besoin des autorités locales

Les expériences pour optimiser le transport de marchandises en ville ne manquent pas comme le montre le chapitre 2. Beaucoup portent sur les marchandises de type messagerie, sans se préoccuper d'un domaine d'activité en particulier, d'autres au contraire sont ciblées sur un secteur précis (produits frais, pièces de rechange,...). Toutes ces expériences sont menées de façon indépendante sans qu'il y ait un réel souci d'organisation globale du transport de marchandises à l'intérieur de la cité.

Bien évidemment la collectivité possède plusieurs leviers de mesures règlementaires pour mettre en œuvre sa politique dans ce domaine mais elle peut employer d'autres types d'actions et d'autres types d'outils dans une approche concertée avec l'ensemble des parties prenantes participant aux flux de marchandises.

Les collectivités locales ont besoin de nouvelles formes de dialogue et de processus de décision, et ce, d'autant plus que le nombre de parties prenantes est important. Notre société attache une importance croissante à certaines valeurs comme la santé, la protection de l'environnement et la sécurité, d'où la nécessité de nouvelles formes de gestion du risque. Alors que l'approvisionnement des marchandises peut être une barrière à ces valeurs, les autorités organisatrices de transport ont intérêt à planifier les transports de marchandises. Aujourd'hui, on constate un manque de visibilité en termes de TMV issu d'un non-intérêt des marchandises dans la planification des transports avant même la mise en place des PDU. Les autorités locales ont besoin de nouveaux outils pour permettre le diagnostic et de nouveaux outils d'aide à la décision pour générer une vision des conséquences des décisions potentielles. Prendre une décision pour le TMV est une expérience complexe puisque de nombreux paramètres sont à prendre en compte et il existe peu de moyens de mesure et d'éléments de comparaison. Vouloir mettre en place un CDU, plutôt qu'un ELP, favoriser les modes doux (bicyclette, marche à pied...), diminuer la place de l'automobile en ville, arbitrer entre le transport de passagers et de marchandises sont autant d'actions, de solutions à trouver que de décisions à prendre. Or,

le décideur n'a aucune vision des conséquences des décisions qu'il va prendre pour plusieurs raisons :

- le manque d'information sur le comportement de chaque acteur. Le diagnostic du TMV n'est pas immédiat et fait l'objet de longues et onéreuses séries d'enquêtes pour cerner les habitudes de chaque acteur ;
- le manque d'intégration du transport de marchandises aux stratégies de transport de la ville. Par conséquent les liens entre les différents modes et types de transport sont mal connus ;
- le manque d'outils dû à la relative jeunesse du domaine.

Enfin, les outils sont nécessaires aux collectivités locales face aux acteurs déjà confrontés (à juste titre ou non) à de nombreuses contraintes et qui sont donc réticents aux changements.

3.2.2 La logistique en ville : un système complexe

La logistique urbaine est la conséquence d'une multitude de comportements. Il s'agit de décrire le système et les interactions entre ses éléments et non de les résumer ou de les synthétiser par des indicateurs. Ainsi, plutôt que d'accumuler les données, le but est de rassembler la connaissance, ce que Jay Forrester, créateur de la dynamique des systèmes, appelle la mise en place d'un « modèle verbal » [Forrester, 1961]. Pour cela, l'inclusion et la compréhension de tout ce qui se passe dans le système est nécessaire, ce qui implique de se consacrer à une analyse causale. A partir de ce moment, la modélisation de l'évolution passe de la description de l'apparence des choses (surface des choses) à la description de leur structure.

La complexité a été débattue, sa caractérisation et sa définition ont été largement étudiées et le sont encore aujourd'hui, mais la définition la plus adéquate pour le TMV, selon nous, est celle de Simon dans [Simon, 1976] :

« Les systèmes dont le comportement est considéré comme «indécidables» peuvent être considérés comme complexes comparés à ceux dont le comportement est tenu pour déterminable. »

Par cette définition, le système du transport de marchandises en ville, mais aussi plus généralement celui de la logistique urbaine, peut être assimilé à un système dit « complexe ». Afin de préciser nos propos basés sur une définition, nous faisons le parallèle avec les travaux de Sterman dans [Sterman, 2006] qui décrit les caractéristiques des systèmes complexes. Les caractéristiques du système de TMV peuvent être définies par les qualificatifs suivants :

- **constamment en mutation**. En raison du très grand nombre d'acteurs et de colis/palettes distribués ; ce qui semble constant dans le temps est en réalité variable. Même si le nombre de véhicules de transport de marchandises en ville ne varie pas de façon significative d'un mois à l'autre, sur une plus longue période, la demande est variable, les parts de marché ne cessent d'évoluer pour une entreprise, de nouvelles entreprises apparaissent et d'autres ferment ;
- **fortement couplé**. Les acteurs du TMV interagissent fortement les uns avec les autres et avec l'environnement comme les émissions de gaz à effet de serre qui affectent d'une façon globale l'environnement de la ville ;
- **régi par rétroaction**. Les comportements des acteurs sont façonnés par un cadre que fournissent les autorités locales. Chaque action et chaque comportement sont considérés comme une cause, et les comportements changent selon les boucles de rétroactions et ainsi de suite ;
- **non linéaire**. Les relations de causes à effets ne sont pas linéaires pour le TMV, comme par exemple l'effet des restrictions des livraisons sur le trafic [Yannis *et al.*, 2006]. Un autre effet, plus subjectif est celui des pressions de la part des résidents sur les autorités locales pour l'amélioration de la congestion par exemple ;
- **adaptatif et évolutif**. La mise en œuvre d'une restriction sur les gabarits dans le centre-ville a une influence sur les comportements, et dans ce cas précis, les acteurs adaptent leur flotte de véhicules pour en obtenir une aux tonnages plus faibles ;
- **caractérisé par des compromis**. Les autorités locales souhaitent améliorer les conditions de vie en ville sans pénaliser les acteurs, certaines ont proposé la mise en place d'un Centre de Distribution Urbaine (CDU). Cette solution provoque des temps additionnels et des ruptures de charge mais permet de réorganiser les tournées de manière plus optimale. Toutes les solutions proposées, à ce jour, ne favorisent pas une catégorie d'acteurs en particulier mais sont des réponses visant le « juste » milieu entre les contraintes et les objectifs de chacun (cette notion de juste est là aussi discutable).
- **contre-intuitif.** Les résultats ne sont pas toujours les résultats escomptés. Par exemple, le fait de remplacer les camions de gros gabarits par des petits véhicules n'est pas nécessairement une solution parce que les plus petits tonnages ont besoin de plus de voyages pour livrer le même volume de marchandises et provoquent ainsi plus de trajets et donc de véhicule $\times$ kilomètre. Ainsi, il s'agit de faire attention à se concentrer sur les causes et non pas les événements que nous cherchons à expliquer ;

– **résistant**. La complexité du système joue sur notre capacité à comprendre le système, ainsi des solutions qui nous sembleraient potentiellement acceptables ne le sont pas obligatoirement en réalité. Par exemple, certaines collectivités ont voulu insérer des véhicules électriques pour réduire la pollution, mais l'autonomie encore trop faible de ce genre de véhicules impose la multiplication des véhicules ce qui aggrave la situation en augmentant le nombre total de véhicules sur le réseau et, par conséquent, la congestion.

3.2.3 L'acquisition de la connaissance pour la décision

L'approche économétrique traditionnelle rencontre plusieurs limites, essentiellement parce que les (seules) données disponibles (enquêtes des flux observés) ne traduisent que l'état final qui apparaît comme un équilibre (vu de manière agrégée) : tous les jours, $x\%$ des aires de livraisons sont occupées en permanence pendant les horaires de livraisons associées, il y a une pointe de trafic entre telle heure et telle heure, etc. Avec ces données traduisant une demande exprimée, la modélisation économétrique essaie de reproduire tant bien que mal cet équilibre final. Or, cette stabilité vue d'une manière agrégée recouvre une grande variabilité des comportements industriels pris individuellement. De plus, ces changements de comportement en réponse à des stimuli divers ne se font pas instantanément mais avec retard : un transporteur habitué à livrer le client en utilitaire devra s'adapter quand les possibilités de stationnement et de circulation se dégradent fortement (par exemple lors de la mise en place d'une zone environnementale). Et cette phase d'adaptation passera par plusieurs stades (depuis le changement de l'heure de déplacement jusqu'à l'abandon du type de véhicule pour cette livraison et peut-être même un changement de lieu de travail) correspondant à des horizons différents. Ces phases transitoires se trouvent dans les valeurs d'élasticité empiriques, différentes entre le court et le long terme. Pour cela, il importe de développer des approches dynamiques de la modélisation des comportements.

Dans la modélisation traditionnelle à quatre étapes, des rétroactions existent théoriquement mais sont souvent ignorées à cause de la lourdeur des calculs et de la complexité que cela entraîne. Or, la prise en compte de la multiplicité de ces rétroactions est nécessaire si l'on veut modéliser correctement l'évolution du système de transports de marchandises en ville. En outre, les relations entre variables sont souvent non linéaires ou, du moins, leur linéarité ne devrait pas être imposée par des nécessités de simplification analytique. A ce titre, la simulation peut

être une alternative aux limites de la résolution analytique. Les considérations des interactions entre boucles de rétroaction, de la complexité des mécanismes de réaction, des délais dans ces réactions et des liens non linéaires entre variables justifient l'utilisation d'outils de simulation de la dynamique des systèmes. Enfin pour témoigner de ce choix, nous pourrons retenir les quelques phrases de Patrice Salini, [2000] :

« Confronté à un problème, l'économétricien part en quête de données quantitatives, si possible sur une longue période, pour établir des relations statistiques entre indicateurs (niveaux d'échanges, production, consommation, indices des prix, ...), relations souvent limitées, genre « log-log », assurant aux élasticités une belle constance qui revient à vouloir prévoir l'avenir en nous contentant de prendre en compte ce qu'il y a de stable (induction statistique) dans les relations mathématiques entre variables.(...) Plutôt qu'une aide à la compréhension, l'économétrie vérifie des corrélations et en tire des conséquences.(...) La Dynamique des Systèmes procède d'une logique différente. Il s'agit de décrire les systèmes et les interrelations entre les éléments, non de chercher à les résumer, à les synthétiser par un indicateur. Autrement dit, ce que l'on demande au dynamicien des systèmes est radicalement opposé aux habitudes des économétriciens,(...) en particulier leur quête du chiffre, obsession légitime, qui va laisser la place à la quête de la connaissance, à ce que Jay Forrester appelle la construction d'un « modèle verbal ». »

Nous proposons une analyse du système TMV particulièrement adaptée au contexte puisque l'analyse de système(s) a pour but de modéliser des situations complexes et interactives. Elle s'efforce de rendre compte des relations qui existent entre les éléments d'un même ensemble isolable dénommé système. Elle se caractérise par le mélange du quantitatif (mesurable) et du qualitatif (c'est-à-dire des valeurs subjectives qui servent à apprécier et à mesurer). En cela, l'analyse de système n'est pas une technique scientifique puisqu'elle dépend étroitement de ceux qui la mettent en œuvre et des valeurs et opinions auxquelles ils se réfèrent. Elle est donc considérée avec méfiance, voire dédain, par les scientifiques orthodoxes. Elle constitue pour la raison symétrique un outil particulièrement bien adapté à l'analyse politique, c'est-à-dire à l'analyse des rapports de force entre hommes ou institutions.

Dans ce cadre, il paraît pertinent de vouloir construire un cadre décisionnel pour le système TMV basé sur une telle analyse afin de se concentrer uniquement sur les interactions des éléments du système. La structure du système sera alors plus claire et son évolution dans le temps pourra être appréhendée en faisant varier les éléments de cette structure.

3.3 Modèle conceptuel

Dans cette section, nous construisons le modèle conceptuel. L'objectif est de situer la finalité de l'outil que nous proposons dans le chapitre 4. Nous détaillons l'élaboration du modèle en exposant la méthodologie utilisée, l'analyse causale et le modèle lui-même.

3.3.1 Méthodologie de modélisation

Le modèle repose sur l'interconnexion des variables entre elles. Ainsi, les interconnexions créent des boucles de rétroaction qui rendent le comportement du TMV difficile à analyser et surtout difficile à comprendre, ce qui justifie la réalisation et l'utilisation d'un modèle d'outil de simulation. Le modèle a donc deux fonctions primaires : celle d'aide à la compréhension et celle d'aide à la décision.

La Figure 3.1 montre les différentes étapes de la réalisation du modèle et résume les étapes habituelles du processus d'analyse d'un système complexe [ATN, 2001]. Les différentes étapes sont :

- l'analyse causale identifie pour chaque problème l'ensemble des causes qui participent à son apparition. Sa principale contribution rend compte de la perception que l'on peut établir de la réalité ;
- la modélisation permet la formalisation de l'analyse causale et la compréhension structurelle du système ;
- la simulation où l'application du modèle permet, par un jeu de boucles de rétroaction d'accumuler la compréhension et la connaissance détaillées du système pour y apporter les modifications et ainsi de suite.

Le modèle, ici, est pris au sens large. Par conséquent, la méthodologie est assez générique pour permettre au modélisateur de formaliser d'une autre manière (que celle proposée dans la suite) sa représentation mentale de la réalité. Le modèle que nous proposons dans les paragraphes suivants, provient du constat des lacunes et des avantages des modélisations possibles vues dans le chapitre précédent.

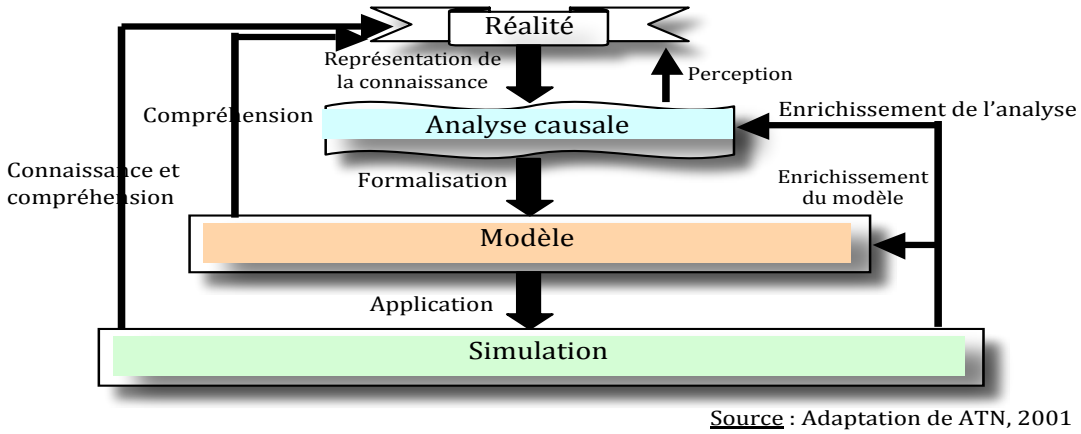


FIG. 3.1 – Méthodologie de modélisation

3.3.2 Analyse causale

D'une manière générale, la Dynamique des Systèmes est utilisée lorsqu'on devient conscient qu'une structure, un problème, deviennent trop complexes pour en comprendre facilement les comportements passés, présents, et surtout à venir. On se rend compte que l'intuition hésite, que les risques d'erreur de jugement deviennent importants, que les données disponibles et surtout utiles sont insuffisantes. On cherche à mettre à plat l'ensemble des variables du problème (ce que nous appelons les éléments du système). C'est l'étape d'analyse causale, ou d'analyse structurelle (structure des relations d'influence entre variables, paramètres et données) du problème posé, analyse dont l'apport essentiel est de permettre une perception et une représentation ordonnées du système.

A ce stade, quelques remarques pratiques pourront faciliter la réalisation de ces diagrammes causaux et éviter des blocages ou certaines erreurs.

L'analyse causale, première étape de toute analyse systémique, permet donc de structurer un problème, mais aussi de le décomposer en sous-ensembles, en éléments simples destinés à être analysés individuellement. C'est une phase indispensable qui enrichit énormément la perception globale du système étudié, tout en générant une impression de plus en plus forte, parfois inquiétante et même déstabilisante, de complexité des phénomènes [Donnadieu et Karsky, 2002]. Plus on développe l'analyse structurelle, forcément qualitative (les chiffres qui caractérisent la connaissance sont absents d'une telle analyse qui reste par essence qualitative), plus on se rend

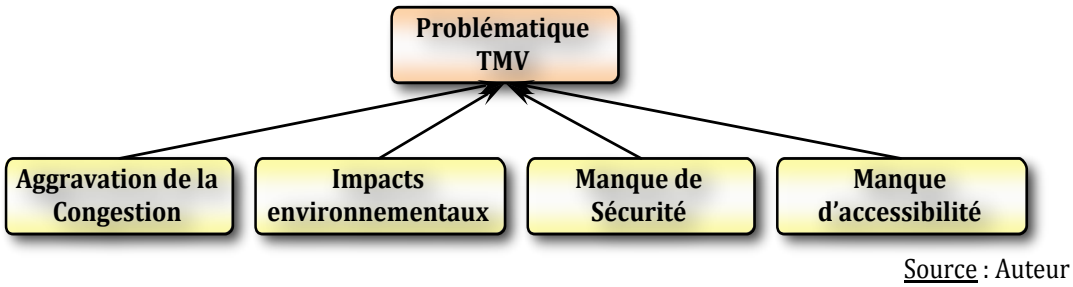


FIG. 3.2 – Causes de la problématique TMV

compte de la complexité des choses et des comportements. Pour aborder l'analyse d'un sous-système spécifique d'un système urbain comme celui du transport de marchandises en ville, les schémas suivants constituent un cadre général tenant compte des principales causalités internes et externes [Morin, 1981] i.e. les rapports de causes à effets parmi les éléments du système qui permettent son auto-organisation et les causalités avec l'environnement qui l'entoure et qui s'impose à lui.

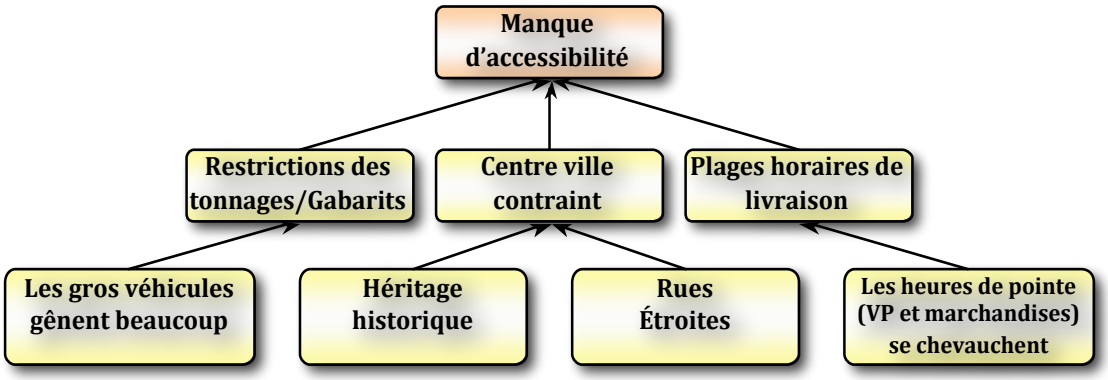
3.3.2.1 Analyse causale globale

Dans le cadre du système TMV vu dans sa globalité, les « outputs » généraux (ou constats) de la problématique, présentés dans le chapitre 1 de cette thèse s'avèrent être la congestion, la sécurité, l'accessibilité et les impacts environnementaux comme le montre la Figure 3.2. Cette analyse doit être aussi fine que possible sans entrer dans les spécificités d'une ville donnée (comme le fait d'être en bord de mer). C'est pourquoi, nous proposons une telle analyse où les feuilles des différentes arborescences sont terminales pour conserver un caractère générique de la démarche. Autrement dit, si l'on pousse davantage l'analyse causale, il sera nécessaire de prendre en compte les qualités intrinsèques de la ville d'étude.

Il s'agit alors de détailler les causes à l'origine de ces quatre constats. La Figure 3.3 décrit l'analyse causale du manque d'accessibilité.

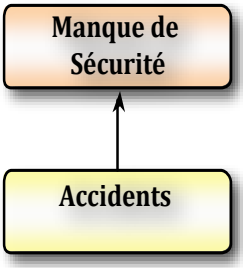
La Figure 3.4 décrit l'analyse causale du manque de sécurité. Elle est simple et courte. Le manque de sécurité est effectif parce qu'il survient des accidents de la route, mais aussi des accidents de manutention.

Puis, la Figure 3.5 constitue l'arbre causal des impacts environnementaux.



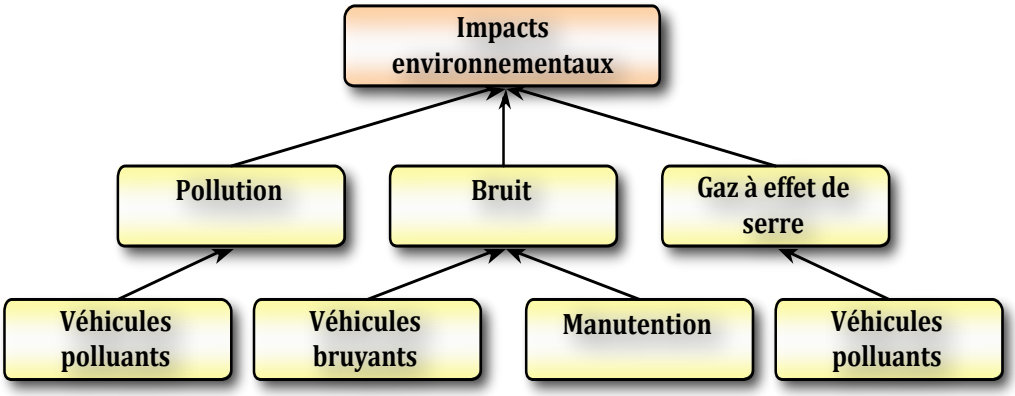
Source : Auteur

FIG. 3.3 – Causes du manque d'accessibilité



Source : Auteur

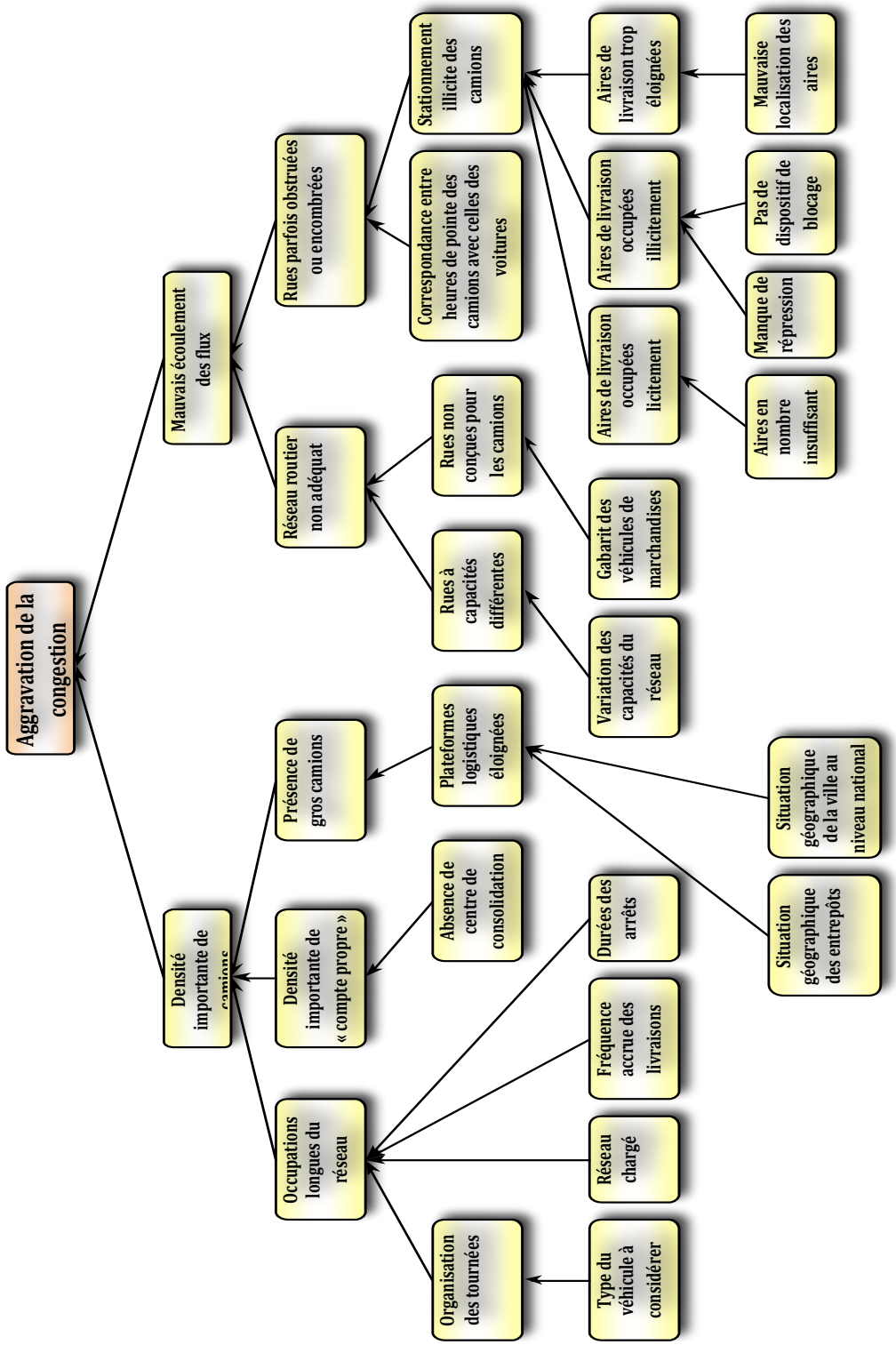
FIG. 3.4 – Causes du manque de sécurité



Source : Auteur

FIG. 3.5 – Causes des impacts environnementaux

Le dernier arbre de causalité est celui développé par les problèmes de congestion. Il est par nature très complexe et nous essayons de formuler, au moins d'une manière synthétique, les causes de la contribution à la congestion par le transport de marchandises en ville (Figure 3.6).



Source : Auteur

FIG. 3.6 – Causes de la contribution à la congestion

Les feuilles de chacun des arbres se regroupent par catégories de causes suivantes :

- **les facteurs industriels** : nous retrouvons dans cette catégorie, tous les paramètres liés à l'organisation des tournées comme les ressources disponibles (humaines et matérielles), et la stratégie de gestion (compte propre ou d'autrui) ;
- **la structure urbaine** : la situation géographique des aires de livraison, la présence ou non d'équipements logistiques tels que CDU, ELP..., le réseau viaire forment le contexte pour le transit des marchandises ;
- **la demande de marchandises** : la demande de marchandises conditionne les flux de marchandises. Par exemple, les fréquences de livraisons sont de plus en plus importantes et le volume des livraisons devient de plus en plus petit ;
- **les flux de trafic** : les causes qui touchent les flux de trafic comme les niveaux de flux, les affectations des flux dans les zones denses, la correspondance entre les heures de pointe des véhicules particuliers et des camions ;
- **les pressions** : les pressions possibles entre les acteurs, comme les pressions des habitants sur le responsable politique pour l'amélioration de la qualité de vie, ou la pression d'un dispositif de contrôle des fraudes pour le stationnement ;
- **la qualité de vie** : la qualité de vie est transversale, allant du nombre d'accidents à la qualité de la desserte en termes d'émissions de bruit, de polluants et de gaz à effet de serre ;
- **l'offre de transport** : concerne principalement les caractéristiques du réseau viaire. L'offre de transport est également liée aux véhicules sur le marché, développés par les constructeurs.

3.3.2.2 Élaboration d'un schéma causal

Dans ce paragraphe, nous voulons développer, en restant cohérent avec les schémas de référence de la ville [Fusco, 2003] (i.e. modèles très agrégés donnant un cadre général pour l'analyse de système), un schéma systémique approprié à l'étude de l'amélioration du transport de marchandises en ville. Ce schéma doit fournir une vision synthétique des principales interactions existantes dans le fonctionnement du système TMV, pour dépasser la vision linéaire des schémas couramment utilisés.

A cet effet, nous allons faire coïncider les activités urbaines du schéma général de la ville

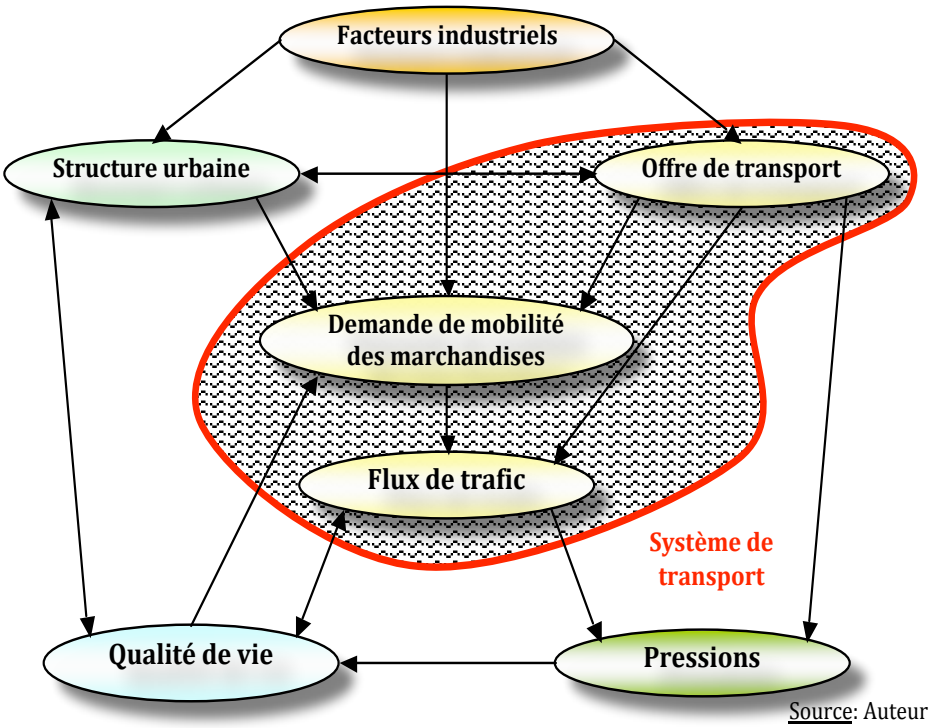


FIG. 3.7 – Schéma causal pour le système TMV

avec celles répertoriées dans le paragraphe suivant issues de l'analyse causale. Traditionnellement, les études sectorielles identifient trois éléments clés des systèmes de transport de marchandises : la demande de mobilité de marchandises, l'offre de transport (infrastructures, services) et les flux de trafic, qui correspondent au véritable transport de marchandises à l'intérieur de la ville. En amont de ces trois éléments on considérera la structure urbaine, comme la localisation des activités, et les facteurs industriels (concernant notamment les caractéristiques des activités). En considérant également les pressions exercées par les transports urbains et les aspects de la qualité de vie qui peuvent être mis en relation avec le transport de marchandises en ville (accessibilité, qualité de l'air, sécurité, etc.), on obtient le schéma causal systémique de référence illustré par la Figure 3.7.

Le schéma proposé contient un certain nombre d'hypothèses quant aux liens de causes à effets entre les différents éléments, qui permettent de saisir le fonctionnement général du système TMV et ses spécificités par rapport à d'autres activités urbaines. Ces liens causaux ne doivent cependant pas être interprétés de façon strictement déterministe. Il s'agit, plus généralement,

d'hypothèses concernant l'influence que chaque élément peut jouer sur les autres. En ce qui concerne les facteurs industriels, par exemple, ils sont susceptibles d'influencer à la fois la structure urbaine, la demande de mobilité de marchandises et l'offre de transport.

En revanche, la structure urbaine est un élément en forte interaction avec les autres éléments du système : elle est probablement influencée par les facteurs industriels, par l'offre de transport et par les niveaux d'accessibilité dans l'espace urbain. De même, elle influence l'offre de transport, la demande de mobilité de marchandises et plusieurs aspects de la qualité de vie (les niveaux d'accessibilité, la qualité de l'air, etc.). En particulier, le lien entre structure urbaine et offre de transport est susceptible d'exister dans les deux sens. D'une part, certaines infrastructures et services n'existent qu'en présence de structures urbaines particulières (la mise en place d'un Espace Logistique Urbain, par exemple, nécessite une certaine concentration d'activités en rapport avec la demande de mobilité de marchandises autour de la zone d'implantation). De l'autre, l'existence de certaines infrastructures peut conditionner le développement urbain, comme le montre l'exemple, présenté par Merlin, [1991], des divers espacements entre échangeurs des autoroutes parisiennes sud et nord.

L'offre de transport, à son tour, est susceptible d'influencer à la fois la demande de mobilité de marchandises, les flux de trafic et détermine, à elle seule, un certain nombre de pressions économiques et environnementales, indépendamment des flux de trafic produits (par exemple, les coûts financiers et la consommation d'espace urbain nécessaires à la réalisation des infrastructures). En poursuivant la lecture du schéma, la demande de mobilité de marchandises est susceptible d'être influencée à la fois par l'offre des infrastructures et des services de transports, par les facteurs industriels, par la structure urbaine et par les niveaux d'accessibilité. Enfin, les pressions des transports dépendent des flux de trafic produits et de l'offre mise en place, tandis que l'ensemble des aspects de la qualité de vie (niveaux d'accessibilité, sécurité, qualité environnementale) dépendent de façon complexe des caractéristiques des flux (les vitesses, les niveaux de trafic), de la structure urbaine (la localisation des activités) et des pressions (les émissions polluantes). Nous soulignons également que les pressions produites localement par les transports urbains peuvent également affecter les écosystèmes régionaux et globaux, extérieurement au système TMV (c'est le cas, notamment, des émissions de gaz à effet de serre, des consommations énergétiques, etc.).

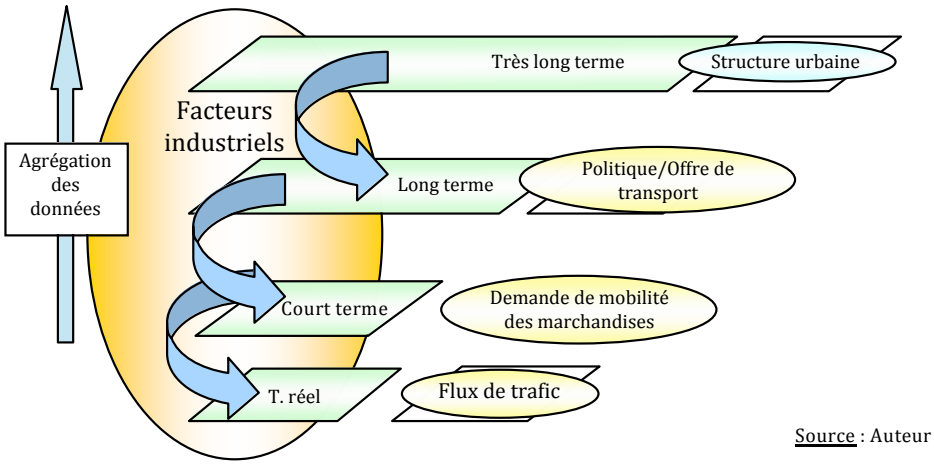


FIG. 3.8 – Modélisation sur quatre horizons

3.3.3 Le modèle conceptuel

Après la phase qualitative d'analyse de causalité structurelle, vient la phase de modélisation. Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à la construction du modèle conceptuel du TMV.

3.3.3.1 Construire le modèle

Un aspect qui caractérise le système TMV ainsi défini est la diversité des temporalités en jeu dans les différentes relations causales. La production de flux de trafic à partir des caractéristiques déterminées de l'offre, de la demande et de la structure urbaine est presque immédiate. La détermination de la demande de mobilité de marchandises à partir des caractéristiques de l'offre de transport, de la structure urbaine, etc., a lieu normalement sur les moyen et long termes. En revanche, la détermination des structures urbaines se produit sur le très long terme, l'inertie du système physique des localisations étant largement supérieure à celle des comportements des acteurs.

Dans ce cadre, la modélisation se situe sur quatre niveaux et peut être schématisée par la Figure 3.8.

Ce genre de système se caractérise par deux spécificités :

– sa **dynamique « chaotique »** : la dynamique du TMV est difficile à maîtriser, souvent

contre-intuitive, et peut s'assimiler, toute proportion gardée, à l'effet papillon. Par conséquent, la sensibilité des inputs est relativement importante ;
- sa **différence de temporalité** : ce système met en jeu plusieurs temporalités, ce qui rend encore plus délicat la modélisation.

La proposition d'un modèle conceptuel doit considérer ces deux caractéristiques du TMV.

3.3.3.2 Environnement du TMV

La représentation du TMV sous forme d'un modèle doit rendre compte des liens entre les différents composants de manière à identifier les variables de décisions sur lesquelles s'appuieront les collectivités locales.

Le schéma causal pour le système TMV (Figure 3.7) montre bien que les impacts du TMV sont directement issus du flux de trafic des véhicules, lui-même influencé par deux leviers à disposition des collectivités que sont la structure urbaine et l'offre de transport (et implicitement les réglementations qui participent à l'offre de transport).

Afin de modéliser le système TMV, il faut désormais replacer le schéma causal dans son environnement, par conséquent, il est nécessaire d'identifier tous les paramètres liant le système à son environnement. Nous dressons une liste de facteurs, qui ne se veut pas exhaustive mais générique. Nous retenons :
- les facteurs politiques qui influent sur les stratégies de développement de la mobilité urbaine ;
- les facteurs de marché qui caractérisent l'environnement économique de la ville ;
- les facteurs d'innovation et d'expérimentation dans le TMV qui permettent aux villes de se distinguer ;
- les facteurs juridiques, institutionnels et normatifs qui déterminent les règles et normes à respecter pour tout acteur ;
- les facteurs géographiques qui peuvent avoir une influence sur les stratégies logistiques des entreprises et donc ont un impact sur le TMV ;

3.3.3.3 Modèle

La modélisation est la représentation d'un système réel dans un langage approprié, par la formalisation et la capitalisation de connaissances sous une forme compréhensible et utilisable par diverses personnes ou logiciels, telle qu'elle puisse reproduire un fonctionnement ou prédire un comportement dans d'autres conditions [Claver *et al.*, 1997].

La modélisation est la première étape de l'aide à la décision. Sans modèle, pas d'analyse possible de la situation, pas de simulation pour évaluer les solutions et prendre une décision. Le modèle permet de connaître les conséquences des décisions avant de les appliquer. Par conséquent, nous retiendrons dans cette thèse que le modèle conceptuel est une représentation théorique des différentes décisions pour le TMV.

Parmi toutes les méthodes de modélisation, la méthode GRAI (Graphe de Résultats et Activités Interreliés) est particulièrement intéressante pour le système TMV. En effet, elle est une méthodologie de modélisation et d'analyse des systèmes de décision qui s'appuie sur deux outils principaux dont la grille GRAI permettant l'expression d'une vision globale et macroscopique de la structure du système étudié [Doumeingts, 1984], [Roboam, 1993]. Elle situe les différents centres de décision les uns par rapport aux autres et les principaux liens décisionnels de l'organisation. La grille montre les décisions prises par les différentes fonctions du système avec quel horizon et quelle période, ainsi que les transmissions d'informations (liaison informationnelle : flèche fine) ou d'objectifs (liaison décisionnelle : flèche épaisse) entre ces centres.

La Figure 3.9 donne la modélisation du TMV grâce à la méthode GRAI.

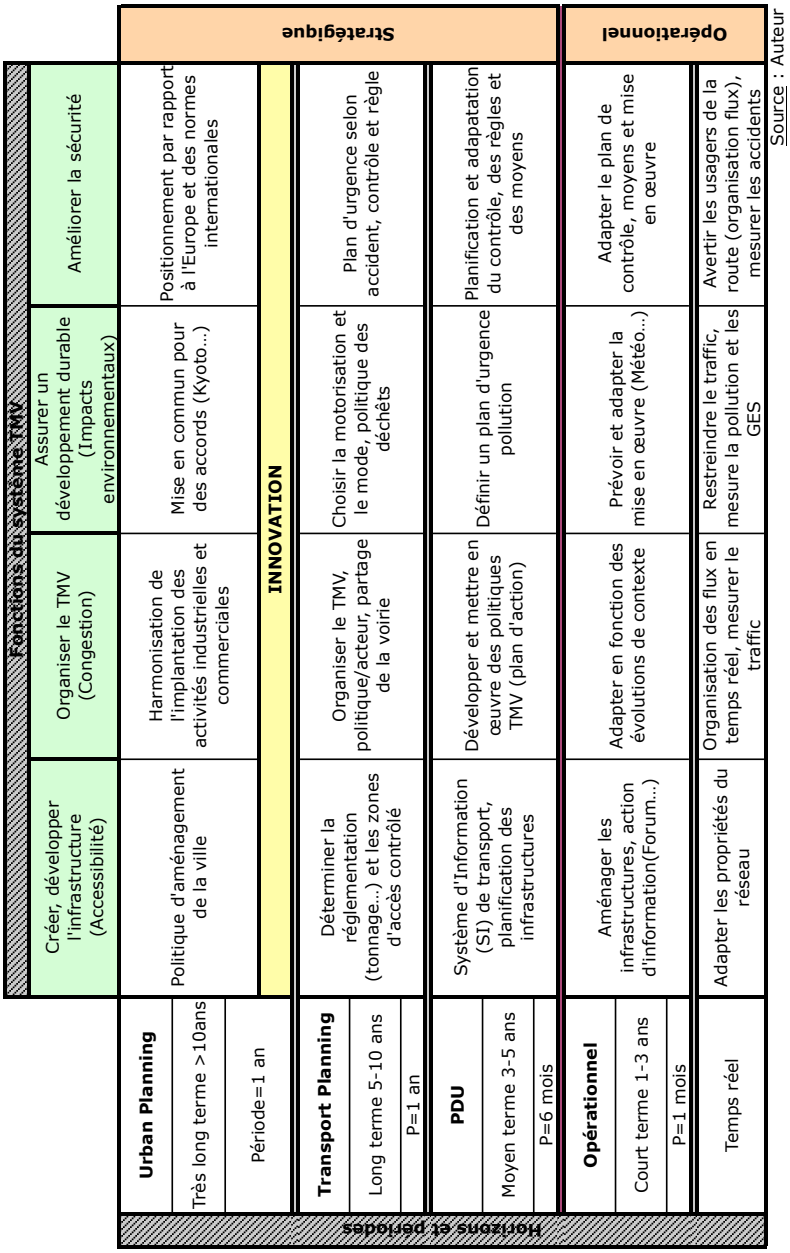


FIG. 3.9 – Le système TMV représenté par une grille GRAI

Le système TMV s'articule autour de quatre fonctions comme vu précédemment : créer et développer l'infrastructure, organiser, assurer le développement durable et améliorer la sécurité et sont liées à l'accessibilité, la congestion, les impacts environnementaux et la sécurité respectivement. Pour chaque fonction du système, la grille se décompose en deux grandes parties : « Stratégique » et « Organisationnel ». Nous détaillons chaque fonction dans les paragraphes suivants.

3.3.3.3.1 Créer et développer l'infrastructure

A très long terme (i.e. au delà de dix ans), cette fonction est assurée par la politique d'aménagement de la ville. La planification est dite « pour faciliter » : les collectivités sont proactives et fournissent la struture urbaine et l'offre de transport adéquats pour dégager des axes d'améliorations potentielles et ainsi impliquer les acteurs dans une action publique. Les thématiques concernées sont le plus souvent le développement du réseau en termes de capacité d'accueil de véhicules, de la construction de nouveaux tronçons et de rénovation de l'existant. Le caractère innovant est prépondérant à cet horizon puisqu'il implique le fond de la politique d'aménagement et aura alors le plus d'impact possible.

A long terme (i.e. de cinq à dix ans), les réglementations déterminent le développement des infrastructures. Il est question d'appliquer des règles de conduite sur le réseau et d'optimiser au mieux les caractéristiques existantes comme le nombre maximum de véhicules par tronçon, les dimensions physiques des rues et la qualité historique du réseau. Il s'agit de définir les restrictions sur les tonnages, environnementales (Euro n minimum, etc) et horaires et les zones d'accès contrôlé.

Le système d'information de transport et la planification des infrastructures garantissent le développement de l'infrastructure à moyen terme (i.e. de trois à cinq ans). Le but est de fournir les informations aux acteurs appropriés pour les laisser résoudre les problèmes eux-mêmes, comme les informations sur les aménagements de voirie pour que les transporteurs puissent prévoir et adapter leurs organisations logistiques.

A court terme (i.e. de un à trois ans), il ne s'agit plus de prévisions mais les fonctions du système, d'une manière générale, sont assurées par l'adaptation du prévisionnel. Ainsi, la fonction créer et développer l'infrastructure est concernée par l'aménagement des infrastructures et les actions d'informations telles que les freight forums pour indiquer les travaux à venir ou en

cours par exemple.

Enfin, en temps réel, l'infrastructure est adaptée aux besoins de l'utilisateur (comme les voies multi-usages à Barcelone). Les autorités organisatrices de transport peuvent faire varier les caractéristiques du réseau pour optimiser de façon temporaire les flux de véhicules.

3.3.3.3.2 Organiser le TMV

Cette fonction est liée à la maîtrise des flux et plus généralement à la congestion urbaine. A très long terme la maîtrise des flux commence par une harmonisation de l'implantation des activités industrielles et commerciales. En fonction de l'aménagement de la ville et du réseau existant, l'objectif est de garantir un équilibre entre l'offre et la demande de transport de marchandises. Il est indispensable de canaliser les activités concernées par de nombreux et importants mouvements autour d'un réseau de transport adéquat et d'équipements optimisant les opérations de livraisons (quais, etc). L'innovation est un facteur clé de succès car elle peut jouer un rôle important dans l'implantation des futures activités, comme la création d'une zone industrielle complètement alimentée en marchandises par des voies souterraines.

A long terme, organiser le TMV consiste à organiser l'adéquation entre les politiques de transport et les comportements des acteurs et partager la voirie parmi tous les usagers. Réfléchir par groupes cible[1] pour construire des politiques de transport adaptées aux besoins et aux contraintes des acteurs. Celles-ci seront ensuite développées et mises en œuvre à moyen terme correspondant aux plans d'action comme le PDU pour le volet marchandises.

Au niveau opérationnel à court terme, l'organisation du TMV relève de l'adaptation aux évolutions du contexte de la ville et peut impliquer de nouveaux équipements facilitant le transit pendant des périodes de grands travaux comme le cas du tramway de Bordeaux, où les ELP ont été mis en œuvre.

Enfin, l'organisation des flux en temps réel et la mesure du trafic constituent les moyens d'organiser le TMV en temps réel. Les GPS, et tous les outils de routage dynamique des véhicules font partie des solutions pour cet horizon.

[1] Les groupes cible sont un ensemble d'acteurs ayant une même dynamique de comportement, plus de détails sont donnés dans le chapitre 5 de cette thèse.

3.3.3.3.3 Assurer le développement durable

Les lignes directrices pour assurer un développement durable reposent sur la définition des objectifs à très long terme pour avoir une cible et certifier que les impacts environnementaux diminuent effectivement. Les accords de Kyoto pour le transport, par exemple, constitue une situation quantifiée à laquelle les pays ayant signé s'engagent.

A long terme, cette fonction est assurée par le choix des motorisations et le mode de transport (report modal sur les modes doux) et par une politique de la logistique inverse (déchêts, etc).

De la même manière, à moyen terme, le PDU établit le plan d'action pour les mesures environnementales souvent liées aux problèmes de congestion.

Les facteurs climatiques affectent de manière significative les impacts environnementaux, par conséquent, à court terme il est question de prévoir et adapter la mise en œuvre du plan d'action.

Enfin, ponctuellement, des mesures peuvent être prises en temps réel pour restreindre les impacts environnementaux en diminuant le nombre de véhicules ou les vitesses. Il est alors nécessaire de mesurer l'état du système et plus précisément les niveaux de polluants et de GES.

3.3.3.3.4 Améliorer la sécurité

Dans le contexte actuel de la France, fixer des objectifs liés à la sécurité routière, en se basant sur les prévisions de l'Europe et en accord avec les normes internationales, permet de représenter la trame générale de l'évolution de la sécurité routière à très long terme. Pour atteindre les objectifs définis, il est nécessaire d'établir un plan d'urgence ou de mettre à jour le plan tous les ans selon l'évolution du nombre d'accidents, des contrôles et des règles de conduite. Il convient aussi d'utiliser l'ensemble des forces de l'ordre (police nationale, gendarmerie, polices municipales) afin de renforcer les contrôles de vitesse et de comportement routier en agglomération. Les collectivités locales réfléchissent aux actions sur le stationnement, la répartition des espaces de voirie et la réglementation des horaires de livraison, des gabarits et tonnages des véhicules, dans le cadre du PDU.

Enfin, améliorer la sécurité à plus court terme se traduit par l'apport d'information aux usagers (ce qui est lié à l'organisation des flux), et par la mesure des indicateurs pour connaître la situation réelle (contrôles...).

3.3.3.3.5 La réalité et le modèle

Le premier constat est clair, les planifications de la structure urbaine et de l'offre de transport sont fondamentales pour la maîtrise des flux et donc pour assurer toutes les fonctions du système.

En raison de l'interaction avec l'occupation des sols, le transport de marchandises en ville doit être soigneusement intégré à la planification de la structure urbaine et du financement de la zone métropolitaine dans le cadre d'un plan d'urbanisme à long terme. Le secteur public doit définir la stratégie, identifier les projets d'infrastructure avec un certain degré de détail, y compris les tracés en plan, et s'assurer de l'acceptabilité de l'impact environnemental, de la tarification et de toutes modifications du système de transport en place. Il doit acquérir les terrains et les emprises nécessaires, veiller à l'obtention des autorisations voulues, engager les fonds requis et fournir certaines garanties indispensables. La coordination physique (pour promouvoir l'intermodalité) et la coordination de la tarification doivent faire l'objet d'un plan global de déplacements urbains de marchandises reflétant une bonne compréhension de la relation entre les transports routiers motorisés et d'autres modes de transport.

La gestion de l'exécution doit être intégrée et des mesures doivent être prises pour faciliter la coordination entre les intervenants publics et privés. Il faut également calculer les coûts d'infrastructure et d'exploitation à la charge du secteur public et garantir la disponibilité des ressources nécessaires par un plan de financement global.

La planification à moyen et long termes est l'élaboration d'une stratégie de transport. Il faut traiter les transports urbains comme un système intégré regroupant de multiples composantes, et les replacer systématiquement dans le cadre des stratégies de développement économique. Pareille intégration exige de reconnaître que la stratégie de transport urbain opère à trois niveaux :

- la **stratégie pour la ville** met en jeu les administrations nationales et régionales auxquelles il incombe de définir la politique de développement régional, de décider de l'affectation des transferts financiers inter-administrations et de mettre en place le cadre juridique applicable aux administrations et organismes de niveaux inférieurs ;
- la **stratégie de la ville** met en jeu les autorités communales auxquelles il incombe de définir leurs propres priorités internes, de mobiliser localement des ressources complémentaires et d'affecter les ressources à leur disposition de manière à atteindre les objectifs de leur ville. Elle concerne également les citoyens, dont la voix n'est pas toujours bien enten-

due ou qui peuvent être insuffisamment représentés dans les processus politiques locaux.

– la **stratégie dans la ville** met en jeu les organismes d'exécution, tant publics que privés, auxquels il incombe d'accomplir les tâches, ou de fournir les services, qui leur ont été assignés, mais qui peuvent disposer d'une certaine autonomie technique dans l'exercice de ces responsabilités.

Même si la représentation que nous proposons du TMV semble parfois éloignée de la réalité, le but est de formaliser le cadre décisionnel pour chaque fonction et pour tous les horizons. Très utilisés en milieu industriel, les outils d'aide à la décision sont adaptés aux contextes et problématiques des entreprises même si leurs pertinences ont parfois été discutées [Ballot, 1997]. Hors de ce contexte industriel, ces outils ne sont que partiellement adaptables pour le décideur d'une collectivité locale. L'aide à la décision pour une collectivité locale paraît plus difficile à appréhender tant la mixité des objectifs est importante (impacts sociaux, environnementaux, économiques...). Le modèle proposé donne une image du système vers laquelle le cadre décisionnel devrait tendre et permet de construire des outils d'aide à la décision pour les collectivités locales.

3.4 Conclusion

Ce chapitre aide à identifier les éléments structurants du système TMV et leurs interactions grâce à une analyse causale globale des conséquences et des impacts du TMV sur son environnement et la modélisation du système TMV par une grille GRAI. Quatre fonctions du système TMV ont été identifiées, il s'agit de créer et développer l'infrastructure, d'organiser les flux, d'assurer un développement durable et d'améliorer la sécurité. Pour chaque horizon, très long, long, moyen et court termes et temps réel, et pour chaque fonction, nous avons associé les variables de décisions. Cette grille repose sur un schéma causal composé des éléments suivants : les facteurs industriels, la structure urbaine, l'offre de transport, la demande de mobilité des marchandises, les flux de trafic, la qualité de vie et les pressions.

Pour donner de bons résultats, la mise au point et l'application de la stratégie exigent une action cohérente et coordonnée à tous les niveaux temporels. La majorité des solutions existantes est, malgré tout, mise en place entre deux et cinq ans, i.e. à moyen terme. Il s'agit alors de développer des outils d'aide à la décision à moyen terme dans un premier temps. Sur la base du modèle conceptuel et du cadre décisionnel qu'il fournit, nous proposons un outil d'aide à

la décision, que nous présentons dans le prochain chapitre, pour les décisions à moyen terme, i.e. les décisions impliquant les systèmes d'information des usagers, la définition et la mise en œuvre des plans d'action pour pallier la congestion, les impacts environnementaux et l'insécurité.

Chapitre 4

Approche et outil de simulation pour le TMV

Sommaire

4.1 Introduction **95**

4.2 Nécessité d'une approche globale de l'outil **96**

4.2.1 La transversalité 96

4.2.2 Les dimensions nécessaires 98

4.3 L'approche de simulation CILOSA **99**

4.3.1 Outil de simulation 99

4.3.2 CILOSA : CIty-LOgistics-Simulation-Approach 120

4.4 Simulation des aires de livraison **142**

4.4.1 Problématique 142

4.4.2 Le stationnement gênant pris en compte 144

4.4.3 Principes 146

4.4.4 Simulation d'une aire de livraison 147

4.4.5 Simulation de la propagation de la gêne occasionnée 149

4.4.6 Relations entre les deux modules 153

4.5 L'utilité pour les collectivités locales **154**

4.5.1 Un outil pour le diagnostic 154

4.5.2 Un outil pour l'aide à la décision 154

4.5.3 Un outil formalisé pour la concertation et le dialogue 156
4.5.4 Les limites de l'outil 157
4.6 Conclusion 158

4.1 Introduction

Le premier objectif de ce chapitre est de proposer une approche générique de simulation appelée CILOSA (CIty-LOgistics-scenarios-Simulation-Approach) basée sur une composition d'approches de modélisation que sont la Recherche Opérationnelle et la Dynamique des Systèmes. Puis, le deuxième objectif de ce chapitre est d'appliquer l'approche de simulation proposée sur un exemple qui est la problématique fondamentale de la position et du dimensionnement des aires de livraison. Un outil de simulation est développé, appelé DALSIM (Delivery Areas and Logistics SIMulation) et permet le diagnostic d'un plan d'aires de livraison en prenant en compte leurs impacts sur les flux globaux de circulation.

La première partie justifie l'approche utilisée pour le développement de l'outil. Elle souligne la prise en compte d'une approche globale pour aborder le TMV dans les villes de taille moyenne, de manière à appréhender la transversalité et le caractère multidimensionnel du TMV.

La deuxième partie décrit l'approche de simulation CILOSA, issue d'une hybridation[1] de Recherche Opérationnelle et de Dynamique des Systèmes, en décomposant chaque élément et en expliquant leur lien. Elle formalise les concepts développés du deuxième chapitre en proposant un outil de simulation.

La troisième partie décrit l'outil de simulation DALSIM pour la simulation numérique de scénarios imaginables sur la conception et/ou modification d'un plan d'aires de livraison. Elle détaille les deux modules qui composent l'outil : le module de simulation des aires de livraison basé sur la théorie des files d'attente et le module qui met en évidence la propagation de la gêne sur le trafic global basé sur la dynamique des systèmes.

La quatrième partie concerne une réflexion sur l'utilité de l'outil pour les collectivités. Elle établit le lien entre l'outil et la compréhension du système, argumente sur l'apport d'un formalisme dans la problématique des aires de livraison et détaille les limites de l'outil.

[1] Nous retenons dans cette thèse la notion d'hybridation dont une définition est donnée par le Petit Robert, ed juin 1996 comme étant « la composition de deux éléments de nature différente anormalement réunis ».

4.2 Nécessité d'une approche globale de l'outil

La problématique du TMV se décompose selon plusieurs axes (économie, fonction, accessibilité et mobilité, environnement), comme le présente le chapitre 1. Ainsi des outils peuvent être développés pour chacun d'eux. Un développement indépendant pourrait nous interpeller quant à leur validité au niveau global. Dans cette section, nous décrivons la nécessité qu'une approche d'optimisation du TMV soit élaborée au niveau global.

4.2.1 La transversalité

La pluralité des points de vue nous oblige à repenser la manière d'aborder la logistique urbaine. Qu'il s'agisse de l'environnement et des sciences sociales pour les collectivités, ou de la rentabilité et de l'optimisation pour les acteurs industriels, les approches sectorielles ont un attrait trop limité vis-à-vis de la transversalité du TMV dans un système plus global qui est le système urbain. Le système TMV influence la vie dans la cité, le développement des commerces, de l'artisanat et des industries, la gestion de la ville et le système de transport urbain. Chacun de ses effets relève de disciplines et de domaines variés : la vie dans la cité relève de l'environnement, le développement des activités de l'économie. La Figure 4.1 détaille la position centrale du TMV et représente ainsi la transversalité du TMV dans le système urbain. On retrouve les points de vue de chaque acteur : la volonté d'optimiser les tournées pour le transporteur, améliorer les conditions de vie du citadin, répondre à la demande en marchandises et à la demande de mobilité des marchandises en aménageant le réseau, en gérant la mobilité, en réglementant pour développer les activités économiques.

Pour l'aide à la décision, toutes ses facettes multi-disciplinaires doivent être prises en compte sous peine d'être taxé de naïveté sur les conséquences des actions qu'il s'agira de mettre en place. L'outil d'aide à la décision doit donc être basé sur une approche globale qui permette d'appréhender de façon simultanée plusieurs vues comme l'économie, les sciences sociales, l'environnement en analysant leurs interactions. Ainsi, une transversalité s'impose pour pouvoir identifier les interdépendances et éviter les contradictions qui surviennent lors d'analyses parallèles dans chaque domaine.

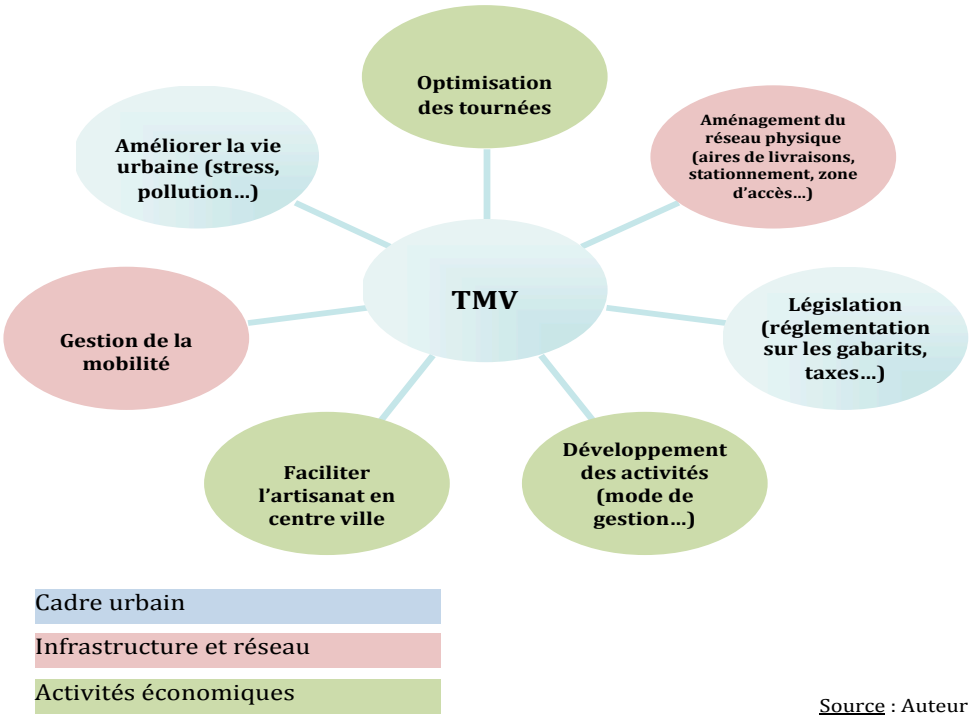


FIG. 4.1 – Place centrale du TMV

4.2.2 Les dimensions nécessaires

Le développement d'un outil d'aide à la décision pour l'optimisation du TMV doit être pluridisciplinaire et prendre en compte les impacts financiers, sociaux, énergétiques, économiques et environnementaux. Mais il doit également considérer les différents types d'acteurs (fournisseurs, transporteurs, habitants, collectivités locales) et les niveaux du contexte spatial (rue, zone, ville entière).

Même si l'outil d'aide à la décision est destiné aux collectivités organisatrices de transport dans les villes, la considération de tous les types d'acteurs est importante, si bien qu'elle permet d'élargir le spectre des scénarios possibles. Par exemple, prendre en considération les transporteurs, permet de construire des scénarios sur les partenariats possibles entre eux, indépendamment de la collectivité locale. Ainsi une solution consisterait en la promotion de partenariats par des aides financières ou foncières par exemple.

La considération des frontières géographiques permet d'une part d'envisager les interactions entre les différents niveaux spatiaux de la ville (aussi appelés pôles de proximité) : les aires de livraison, les rues, les zones et la ville. D'autre part, elle formalise les répercussions des activités locales à l'échelle globale de la ville en cascade (Figure 4.2).

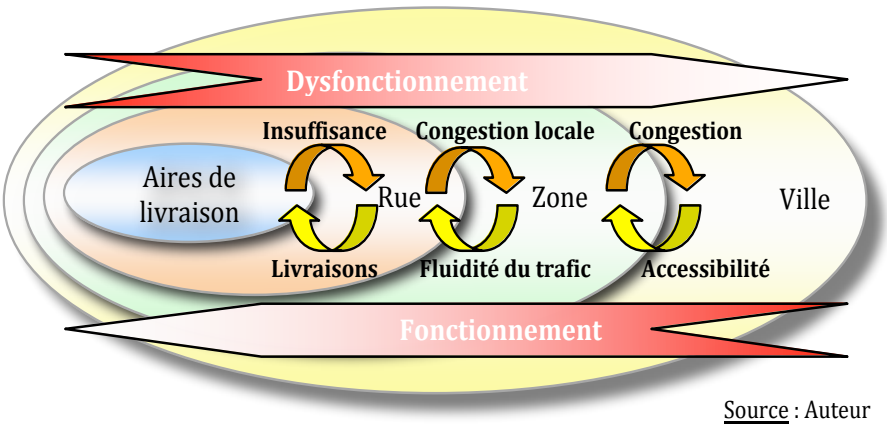


FIG. 4.2 – Interactions spatiales dans le TMV

Considérons que chaque partie de la ville soit sous la contrainte de réglementations et de restrictions. Si, toutefois, une partie de la ville n'est pas soumise à d'éventuelles restrictions, on dira que la réglementation est nulle. Les interactions spatiales sont de deux types : fonc-

tionnement ou dysfonctionnement. Les interactions de type fonctionnement sont issues des processus logistiques qui influencent les conditions de circulation de la ville, on retrouve les opérations de livraisons et le transport ; les fréquences de livraison n'étant qu'une conséquence des conditions de stockage et de la demande. Les interactions de type dysfonctionnement sont les conséquences d'une mauvaise offre par rapport à la demande pour chaque niveau. Par exemple, au niveau des aires de livraison, si le nombre, le dimensionnement et la localisation des aires ne correspondent pas à la demande en stationnement des véhicules pour livrer, un dysfonctionnement apparaît : les chauffeurs livreurs n'ont pas d'autres choix que de stationner leur véhicule de manière illicite [Cholez, 2001], ce qui a des répercussions au niveau des conditions de circulation de la rue en question.

4.3 L'approche de simulation CILOSA

L'approche de simulation CILOSA (CIty LOgistics scenarios Simulation Approach) tente de formaliser les éléments du système TMV et leurs interactions afin d'évaluer des scénarios et permettre l'aide à la décision par un jeu de comparaison entre eux. Dans cette section, nous présentons l'outil de simulation du TMV et la manière dont on l'utilise.

4.3.1 Outil de simulation

4.3.1.1 Hybridation RODS (Recherche Opérationnelle/Dynamique des Systèmes)

Traditionnellement, les approches systémiques ont donné lieu à des expériences de modélisation par la Dynamique du Système [Lepetit et Pumain, 1993] et [Wegener 1998], principalement dans les domaines industriel et urbain, mais finalement peu se concentrent sur le domaine du transport. Les systèmes d'équations différentielles, utilisés normalement dans ce type de modèle, permettent d'évaluer directement l'évolution temporelle du comportement des systèmes et fournissent un outil très puissant de simulation et de prévision, grâce au caractère déterministe des équations utilisées. Toutefois, elles exigent au préalable un cadre théorique pour générer les lois régissant les phénomènes étudiés et les paramètres impliqués. Les cadres sont généralement établis par des données pour quantifier, de manière réaliste, les relations entre variables. Le caractère continu de cette approche n'est pas essentiel et on trouve dans la

littérature la modélisation des systèmes dynamiques à événements discrets [Cohen *et al.*, 1985] [Ho, 1992]. Nous avons préféré l'approche continue pour une évolution continue dans le temps même si on peut, en fait, toujours associer une (ou plusieurs) dynamique(s) discrète(s) à une dynamique continue donnée en échantillonnant l'état du système à une suite d'instants.

Les données d'entrée du modèle peuvent être générées en fonction de leurs évolutions. Il existe deux avantages à la génération des données : le contrôle de l'ensemble complet de données et la gestion de leur évolution. L'analyse causale du TMV, que ce soit sur les problématiques de congestion, de pollution ou de bruit, révèle une quantité de problèmes d'optimisation. Par exemple, le taux de chargement est une simplification du problème du chargement de véhicule, bien connu en Recherche Opérationnelle. D'autres apparaissent, notamment le routage des véhicules et les problèmes combinatoires tels que les problèmes de file d'attente. Cependant, même s'il est très séduisant de formaliser la réalité par des modèles de Recherche Opérationnelle, leur pertinence n'est pas toujours démontrée, bien au contraire. En effet, les hypothèses requises par la modélisation mathématique sont relativement restrictives par rapport à la complexité de la réalité. Par exemple, les hypothèses de linéarité pour utiliser l'algorithme du Simplexe en programmation linéaire ne sont que très rarement vérifiées. Il n'est donc pas intéressant d'utiliser une telle approche pour un problème d'optimisation où la nature et l'existence d'un optimal seraient connues mais n'auraient aucun sens pour le décideur. Doit-on vraiment parler d'optimal pour un système aussi complexe ? Peut-on vraiment obtenir plus d'informations lorsqu'un point dans la ville est désigné comme le point optimal pour un CDU ? Évidemment non, la réalité est tout autre, la faisabilité d'un CDU repose aussi sur un lieu disponible en ville et les réflexions se font à partir de ce point de départ, non l'inverse.

Ainsi, il ne s'agit pas de trouver un optimal clair et précis, mais d'engager une réflexion sur la cohérence des règles et des influences entre les variables du système.

Un modèle hybride de Dynamique des Systèmes et de Recherche Opérationnelle est intéressant pour combler les lacunes d'un modèle construit avec une seule de ces stratégies de modélisation. Comme la Dynamique des Systèmes (DS) n'a pas pour but de quantifier d'une manière significative les relations entre variables, la Recherche Opérationnelle (RO) donne un solide cadre scientifique pour la quantification des relations entre variables. Par ailleurs, la DS est capable de considérer l'effet dynamique des comportements en prenant en compte les boucles de rétroaction que les algorithmes de la RO ne peuvent envisager par le temps de calcul trop long pour la simulation. Le Tableau 4.1 récapitule les avantages et les inconvénients de chacune des

Approche	Avantages	Inconvénients
Recherche opérationnelle	Cadre théorique important	Ne peut pas prendre les boucles de rétroactions si le système modélisé est trop complexe. Demande des hypothèses souvent restrictives
Dynamique des Systèmes	Peut prendre en compte les rétroactions même si le système est complexe	Nécessite un cadre théorique pour quantifier les lois. Les lois quantifiées entre les variables sont souvent très discutables car souvent qualitatives
Hybridation RODS	Permet la considération des boucles de rétroaction tout en conservant des temps de calcul raisonnables	Mettre en place des liens de compatibilité tant sur la logique de fonctionnement que sur les données

TAB. 4.1 – Avantages-Inconvénients de l'approche de modélisation RODS

approches citées, ainsi que de l'approche hybride proposée.

4.3.1.2 Structure générale de l'outil

L'objectif de l'outil est de simuler le fonctionnement du TMV. Il se base sur le processus de livraison inspiré de [Delaître *et al.*, 2008b]. La Figure 4.3 illustre les étapes clés du processus de livraison sur un exemple particulier et significatif de toutes les autres problématiques traitées, que sont le chargement, le transport et la livraison des marchandises. Dans la Figure 4.3, le chargement des marchandises s'effectue sur une plateforme logistique, a priori à l'extérieur de la ville (il est bien évident que cette opération peut s'effectuer dans la ville, nous pensons notamment au CDU), le transport s'effectue en grande partie à l'extérieur de la ville, et la livraison est faite via une aire de livraison (ce qui sous-entend que le destinataire n'a pas de quai personnel de déchargement) et à destination d'un magasin en ville. De manière analogue, nous pouvons

développer le processus d'enlèvement où les étapes de chargement et de livraison deviennent des étapes de déchargement et d'enlèvement (Figure 4.3).

Ainsi le fonctionnement de l'outil s'inspire de ces processus pour modéliser les véhicules dans chaque état possible, il repose donc sur trois étapes de l'établissement des tournées que sont le chargement, le routage et le stationnement. Le schéma de principe de l'outil est donné par la Figure 4.4.

Les trois modules sont successifs et chacun nécessite des entrées et génère des sorties. Le module de chargement de véhicules prend les données d'entrées suivantes :

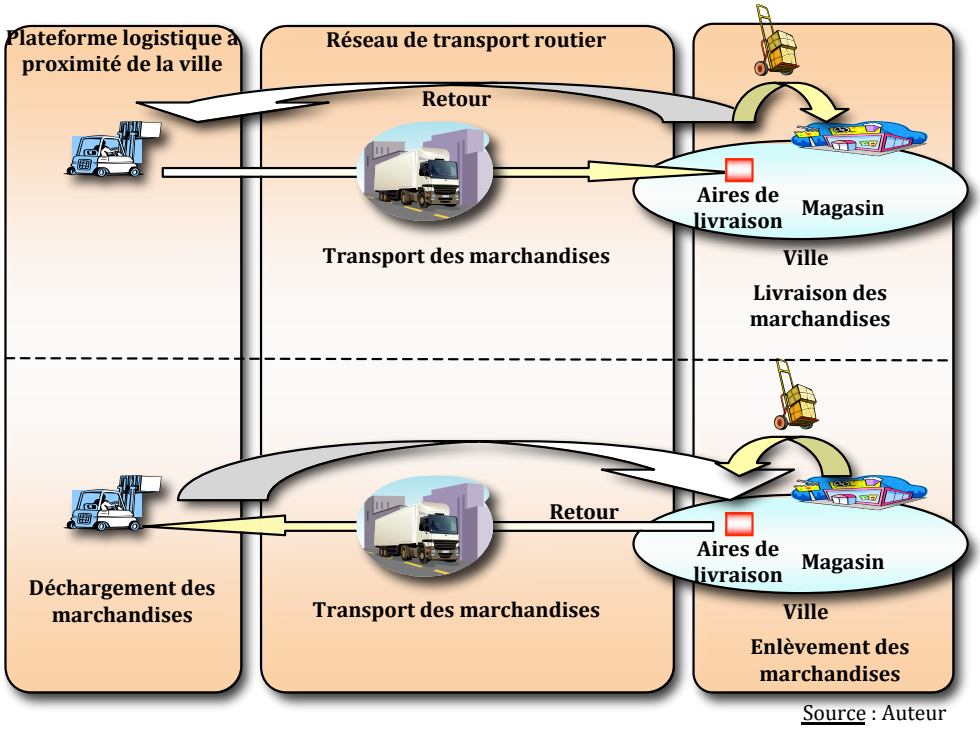
- volume et type de marchandises ;
- flotte de véhicules (nombre, type, capacité des véhicules) ;
- lieux et plages horaires de livraison (time windows) ;
- durée estimée des livraisons.

Et il génère deux types de sorties : les sorties temporaires qui serviront de données d'entrées pour le module de routage des véhicules (plans de route, séquence de clients à livrer), et les sorties pour l'évaluation qui sont les taux de chargement des véhicules et le nombre de véhicules s'apprêtant à livrer. Le module de routage nécessite les données de trafic qu'elles soient historiques ou en temps réel pour optimiser les tournées puis va ensuite générer les sorties temporaires comme le taux d'arrivées sur les aires de livraison (ce qui constitue les entrées du module de stationnement) et les sorties pour l'évaluation que sont l'occupation de la voirie, impacts au niveau de la circulation, de la pollution, des GES et du bruit. Enfin, le dernier module de l'outil considère en entrées les plans des équipements logistiques facilitant le transit de marchandises tels que les aires de livraison, CDU et ELP (et qui offrent des possibilités de stationnement), avec respectivement leur capacité en termes de véhicules et génère uniquement des sorties pour l'évaluation que sont le nombre de stationnements gênants, la durée de la gêne et les impacts sur la circulation.

Chaque module est détaillé dans un paragraphe dédié.

4.3.1.3 Module de chargement de véhicules

Dans ce paragraphe, nous nous concentrons sur le premier module de l'outil. Ce module traite le problème du chargement des colis et/ou des palettes dans les véhicules pour la livraison de marchandises. Le problème consiste à placer des colis rectangulaires de diverses



Source : Auteur

FIG. 4.3 – Étapes clés des processus de livraison et d'enlèvement sur un exemple significatif

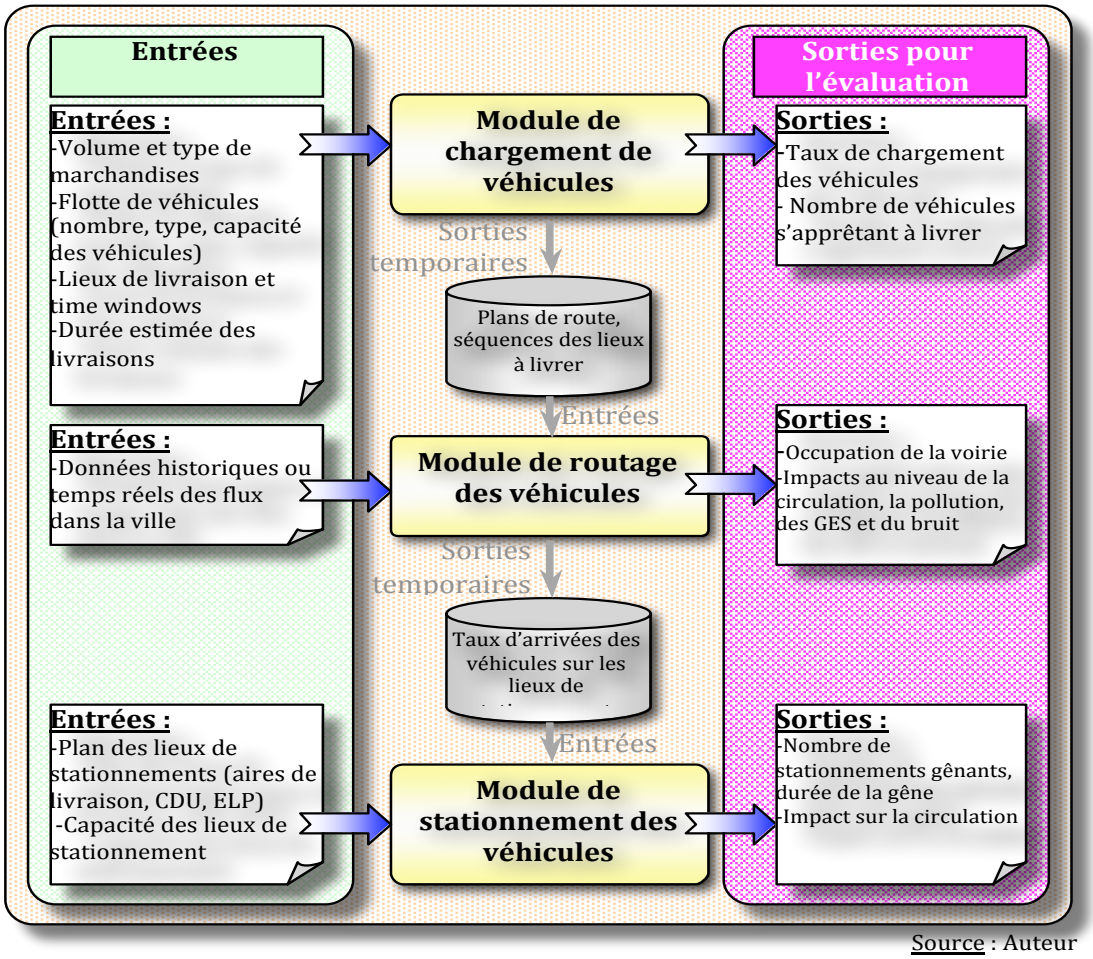


FIG. 4.4 – Structure de l'outil de simulation

tailles dans des véhicules disponibles de diverses capacités en termes de taille et de poids de façon à minimiser l'espace vide de chaque véhicule. En utilisant la classification [Dyckhoff, 1990], le problème considéré est de type 3/V/D/C. 3 signifie tridimensionnel, V correspond à la sélection des objets (véhicules) et la considération de tous les articles (colis), D impose différentes tailles et C représente des formes homogènes (parallélépipèdes rectangles). Réduire l'espace vide dans chaque véhicule peut être vu comme une concaténation de deux problèmes connus en recherche opérationnelle qui sont le problème du sac à dos en 3D et le problème de chargement de containers multiples. Les approches heuristiques les plus communes peuvent être classifiées par les algorithmes *wall-building*, *stack-building*, *guillotine-cutting* et *cuboïd-arrangement* [Juraitis *et al.*, 2006]. Pour résoudre les problèmes de chargement de contai-

ners, plusieurs heuristiques ont été développées ces dernières années et établies principalement pour le problème du container unique. Parmi les algorithmes *wall-building*, nous pouvons retenir ceux de [Pisinger, 2002], de [Bischoff *et al.*, 1995] basés sur une approche gloutonne et ceux de [Bortfeldt et Gehring, 1998] construits sur le concept de la recherche Taboue. L'algorithme génétique proposé par [Gehring et Bortfeldt, 1997], qui appartient à la catégorie *stack-building*, résoud le problème en rangeant les éléments par piles. Dans un autre esprit de raisonnement, Eley propose un algorithme de rangement par bloc pour résoudre le problème d'un container unique [Eley, 2002]. Puis Bischoff développe une nouvelle heuristique pour considérer une variante du problème en y ajoutant des contraintes permettant un chargement stable i.e. les éléments sont disposés de telle manière à ce qu'il n'y ait pas de contradiction avec la réalité au niveau des caractéristiques physiques de notre environnement comme la gravité [Bischoff, 2006]. Enfin, Gendreau met en avant six heuristiques utilisées pour résoudre l'incompatibilité dans un problème avec conflits comme les restrictions [Gendreau *et al.*, 2004]. Ces heuristiques sont basées sur le coloriage de graphe.

Afin de réduire la durée des calculs des algorithmes, la plupart des approches produisent des solutions en suivant une disposition spécifique comme par exemple les couches ou les tranches.

Dans le cas considéré, l'affectation des marchandises est effectuée selon plusieurs contraintes. La première est la compatibilité des produits, elle est traduite par une matrice de compatibilité. Dans cette matrice, nous vérifions la configuration des produits compatibles entre eux qui peuvent être dans un même véhicule. Une autre contrainte considérée est la livraison des colis à un moment donné ou durant un time window. Cette contrainte rend le problème plus difficile et de ce fait l'affectation des colis doit être faite dans l'ordre des livraisons des marchandises. Dans ce contexte, le premier colis à livrer ne doit pas être mis au fond du véhicule.

Par nature, aucune méthode algorithmique rapide ne permet une résolution exacte du problème lorsque la taille devient trop importante. Par conséquent, nous nous limiterons à l'élaboration d'une méthode efficace pour déterminer une bonne solution (optimum local).

4.3.1.3.1 Description des éléments du problème

Les véhicules et colis à affecter sont représentés par leurs propriétés physiques, énumérées dans le Tableau 4.2. Pour gérer la contrainte de compatibilité des produits, nous employons une re-

Véhicule j	**Colis** i
m : Nombre de véhicules	n : Nombre de colis
L_j : Longueur	l_i : Longueur
H_j : Hauteur	h_i : Hauteur
D_j : Profondeur	d_i : Profondeur
W_j : Capacité (poids)	t_i : Time Window
N_j : Nombre de tranches	k_i : Type de marchandises
	w_i : Poids

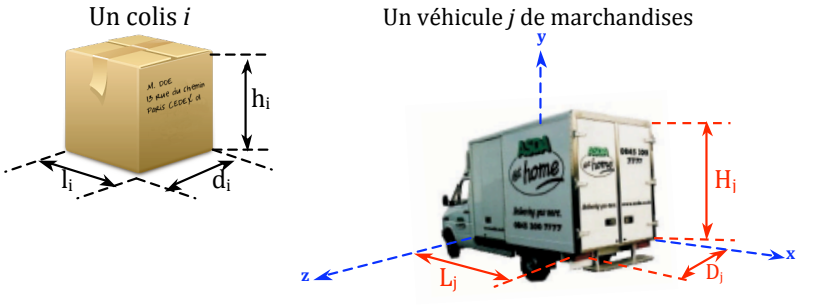
TAB. 4.2 – Description des variables considérées

lation de compatibilité de marchandises notée C. Cette relation est une relation d'équivalence puisqu'elle est réflexive, symétrique et transitive. Soit $E = 1...q$, où q est le nombre de catégories de marchandises considérées.

- **Réflexive** : $\forall i \in \mathbb{E} \quad iCi$ se traduit par le fait que chaque catégorie de marchandises est compatible avec elle-même.
- **Symétrique** : $\forall (i,j) \in \mathbb{E}^2 \quad iCj \Longrightarrow jCi$. Si une catégorie de marchandises i est compatible avec une catégorie j alors la catégorie j est compatible avec la catégorie i.
- **Transitive** : $\forall (i,j,k) \in \mathbb{E}^3 \quad iCj$ et $jCk \Longrightarrow iCk$ stipule que si une catégorie i est compatible avec la catégorie j et que j est compatible avec une catégorie k alors i est compatible avec k.

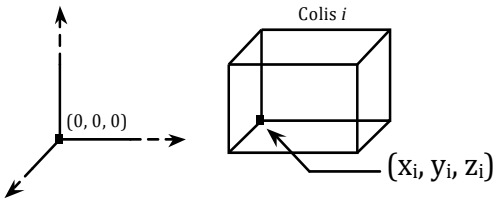
Dans ce cadre, la compatibilité est traduite par une matrice de compatibilité (détaillée dans la section suivante) de taille $q \times q$ notée Z, où q est un nombre entier à définir.

Le time window est souvent caractérisé par un intervalle de temps en pratique, mais dans notre formulation, le time window t_i est une heure et représente tout l'intervalle. Dans ce cadre, nous choisissons de représenter un intervalle par un réel parmi les possibilités (valeur maximum ou minimum, ou encore la moyenne de l'intervalle). Nous choisissons la valeur minimum, car un chauffeur veut livrer au plus tôt pour avoir une certaine marge lorsque des imprévus s'imposent. Les caractéristiques géométriques des colis et des véhicules du Tableau 4.2 sont détaillées dans la Figure 4.5.



Source : Auteur

FIG. 4.5 – Caractéristiques d'un colis i et d'un véhicule j



Source : Auteur

FIG. 4.6 – Représentation des coordonnées d'un colis dans l'espace

De plus, nous introduisons la notation suivante :

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{Si le colis } i \text{ est affecté à la tranche } k \text{ du vehicule } j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

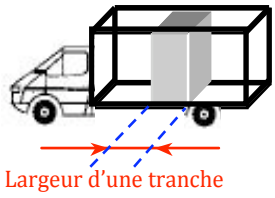
Puis, nous nommons par (x_i, y_i, z_i) les coordonnées du coin le plus proche de l'origine du colis i du repère orthonormé décrit dans la Figure 4.6.

Ensuite, nous définissons $\mathbb{E}_{ij}$ comme une partie de l'espace d'un véhicule j pour un colis donné i par :

$$\mathbb{E}_{ij} = \{(x, y, z) \in [0; L_j] \times [0; H_j] \times [0; D_j] \text{ où } \quad x > x_i + l_i \text{ ou } y > y_i + h_i \text{ ou } z > z_i + d_i\}$$

Chaque véhicule j est composé de tranches, N_j est le nombre de tranches d'un véhicule j dont la représentation géométrique est donnée par la Figure 4.7.

Avec ces notations, le problème de chargement des colis de tailles diverses dans des véhicules de marchandises de capacités et de tailles différentes de manière à minimiser l'espace vide dans



Source : Auteur

FIG. 4.7 – Représentation d'une tranche d'un véhicule j

chaque véhicule tout en vérifiant bien les limites de poids, de volume, de taille de véhicules, de la compatibilité entre produits, le chevauchement des colis et le time window peut être décrit de manière mathématique par :

$$\min \left\{ \sum_{j=1}^{m} \left[\sum_{k=1}^{N_j} H_j.D_j.L_j - \sum_{i=1}^{n} [l_i.d_i.h_i.x_{ijk}] \right] \right\} \tag{4.1}$$

Avec :

$$\forall j \in \{1 \ldots m\} \quad \sum_{k=1}^{N_j} \sum_{i=1}^{n} w_i.x_{ijk} \leqslant W_j \tag{4.2}$$

$$\forall j \in \{1 \ldots m\} \quad \sum_{k=1}^{N_j} \sum_{i=1}^{n} h_i.d_i.l_i.x_{ijk} \leqslant H_j.D_j.L_j \tag{4.3}$$

$$\forall (i,j) \in \{1 \ldots m\} \times \{1 \ldots m\}, \forall k \in \{1 \ldots N_j\} \quad \begin{cases} (x_i + l_i)x_{ijk} \leqslant L_j \\ (y_i + h_i)x_{ijk} \leqslant H_j \\ (z_i + d_i)x_{ijk} \leqslant D_j \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} l_i \leqslant \min_j L_j \\ h_i \leqslant \min_j H_j \\ d_i \leqslant \min_j D_j \end{cases} \tag{4.4}$$

$$\forall j \in \{1 \ldots m\} \quad \sum_{k=1}^{N_j} \sum_{k'=k}^{N_j} \sum_{i=1}^{n} \sum_{l=i+1}^{n} z_{k_i k_l}.x_{ijk}.x_{ljk'} = \sum_{k=1}^{N_j} \sum_{i=1}^{n} x_{ijk} \tag{4.5}$$

$$\left.\begin{array}{l}\forall(i,i',j)\in\{1\ldots n\}^2\times\{1\ldots m\},\forall(k,k')\in\{1\ldots N_j\}^2\\ \text{et } i\neq i' \text{ et } x_{ijk}=x_{i'jk'}=1\end{array}\right\}\Longrightarrow(x_i,y_i,z_i)\in\mathbb{E}_{ij} \text{ ou } (x_i,y_i,z_i)\in\mathbb{E}_{i'j'} \tag{4.6}$$

$$\left.\begin{array}{l}\forall(i,l,j)\in\{1\ldots n\}^2\times\{1\ldots m\},\forall k\in\{1\ldots N_j\}\\ \text{et } i\neq l \text{ et } x_{ijk}=x_{ljk}=1 \text{ et si } t_i>t_l\end{array}\right\}\Longrightarrow y_i+h_i\leqslant y_l \tag{4.7}$$

$$\left.\begin{array}{l}\forall(i,l,j)\in\{1\ldots n\}^2\times\{1\ldots m\},\forall(k,m)\in\{1\ldots N_j\}^2\\ \text{et } i\neq l \text{ et } k\neq m \text{ et } x_{ijk}=x_{ljm}=1 \text{ et si } t_i>t_l\end{array}\right\}\Longrightarrow m>k \tag{4.8}$$

$$\forall i\in\{1\ldots n\}\quad\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{N_j}x_{ijk}\leqslant 1 \tag{4.9}$$

$$\forall(i,j)\in\{1\ldots n\}\times\{1\ldots m\},\forall k\in\{1\ldots N_j\}\quad x_{ijk}\in\{0,1\} \tag{4.10}$$

L'espace vide de chaque véhicule de marchandises est minimisé par la fonction objectif (**4.1**) du problème. L'équation (**4.2**) assure que le poids total des colis placés dans chaque véhicule ne dépasse pas la capacité en termes de poids de chacun des véhicules et l'équation (**4.3**) oblige le volume des colis rangés dans chaque véhicule à être inférieur à sa capacité volumique associée.

Puis l'équation (**4.4**) rend impossible de placer un colis en dehors des limites géométriques des véhicules, c'est à dire, que chaque colis est entièrement dans un véhicule. Grâce à la matrice de compatibilité, l'équation (**4.5**) assure que toutes les catégories de marchandises présentes dans un même véhicule sont compatibles. En effet, $z_{k_ik_l}=1$ si la catégorie du colis i est compatible avec celle du colis l, i et l étant tous les deux placés dans le même véhicule. Grâce à la définition de $\mathbb{E}_{ij}$, l'équation (**4.6**) évite tout recouvrement entre deux colis différents à l'intérieur d'un même véhicule.

Les contraintes (**4.7**) et (**4.8**) considèrent la position des colis selon le time window. Les équations (**4.9**) et (**4.10**) contraignent un colis à être placé dans au plus un véhicule. Le problème

est intéressant si les contraintes triviales suivantes sont vérifiées :

$$\max_i w_i \leqslant \max_j W_j \text{ et } \min_i w_i \leqslant \min_j W_j \tag{4.11}$$

$$\forall (i,j) \in \{1 \ldots n\} \times \{1 \ldots m\} \quad l_i \leqslant L_j \text{ et } h_i \leqslant H_j \text{ et } d_i \leqslant D_j \tag{4.12}$$

$$\text{Et } \sum_{i=1}^{n} w_i \leqslant \max_j W_j \tag{4.13}$$

Les inégalités (**4.11**) rendent pertinente l'utilisation de plusieurs véhicules et la prise en considération du fait que chaque colis a la possibilité d'être placé dans au moins un véhicule. Et (**4.12**) assure que chaque colis ne dépasse pas à lui seul les limites géométriques des véhicules. Dans l'inégalité (**4.13**), nous supposons que le poids total des colis est supérieur à la capacité maximum des véhicules, sinon dans ce cas, une solution triviale est de placer tous les colis dans le véhicule de plus grosse capacité à condition, bien sûr, que les autres contraintes soient vérifiées.

4.3.1.3.2 Méthodologie

Cette section développe la méthodologie de chargement de véhicules. Elle repose sur deux points essentiels que sont la matrice de compatibilité et les règles d'affectation. Enfin le pseudo code de l'algorithme est donné en troisième partie.

4.3.1.3.2.1 Matrice de compatibilité

La matrice de compatibilité joue un rôle primordial pour la méthodologie puisqu'elle assure la compatibilité de tous les colis à l'intérieur d'un même véhicule (ou container). Mais le sens de la compatibilité peut être interprété de plusieurs manières. En effet, celle dernière peut être envisagée par rapport à un critère quelconque : les catégories de produits, le lieu de livraison du colis, les types de clients. . . .etc. Dans cette thèse, nous nous attardons sur la compatibilité en fonction du type de marchandises.

Dans ce cas, la taille q de la matrice correspond au nombre total de catégories de marchandises considérées. Cette matrice est établie en fonction de critères qui sont le type et l'emballage des marchandises, les systèmes de manutention et les normes techniques concernant le transport de marchandises [Burmeister, 2000]. La matrice est de la forme suivante :

$$\forall (i,j) \in \{1 \dots q\}^2 \quad Z = \begin{pmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1q} \\ \vdots & z_{ij} & \vdots \\ z_{q1} & \cdots & z_{qq} \end{pmatrix} \quad \text{Avec } z_{ij} \in \{0,1\}$$

Les valeurs possibles des éléments de la matrice sont 0 ou 1, si pour des catégories i et j $z_{ij} = 1$ alors i et j sont compatibles, incompatibles sinon.

4.3.1.3.2.2 Règles d'affectation

Il existe deux méthodes de remplissage de véhicule : la stratégie séquentielle ou la stratégie simultanée [Eley, 2002]. La stratégie séquentielle considère le remplissage des containers l'un après l'autre. La stratégie simultanée tient compte de la capacité d'un nombre donné de containers en même temps. Sur cette base, une liste de l'espace disponible restant doit être mise en application. La considération de la contrainte de compatibilité et de la simultanéité du remplissage complexifie le problème, par conséquent nous nous limitons à la stratégie séquentielle.

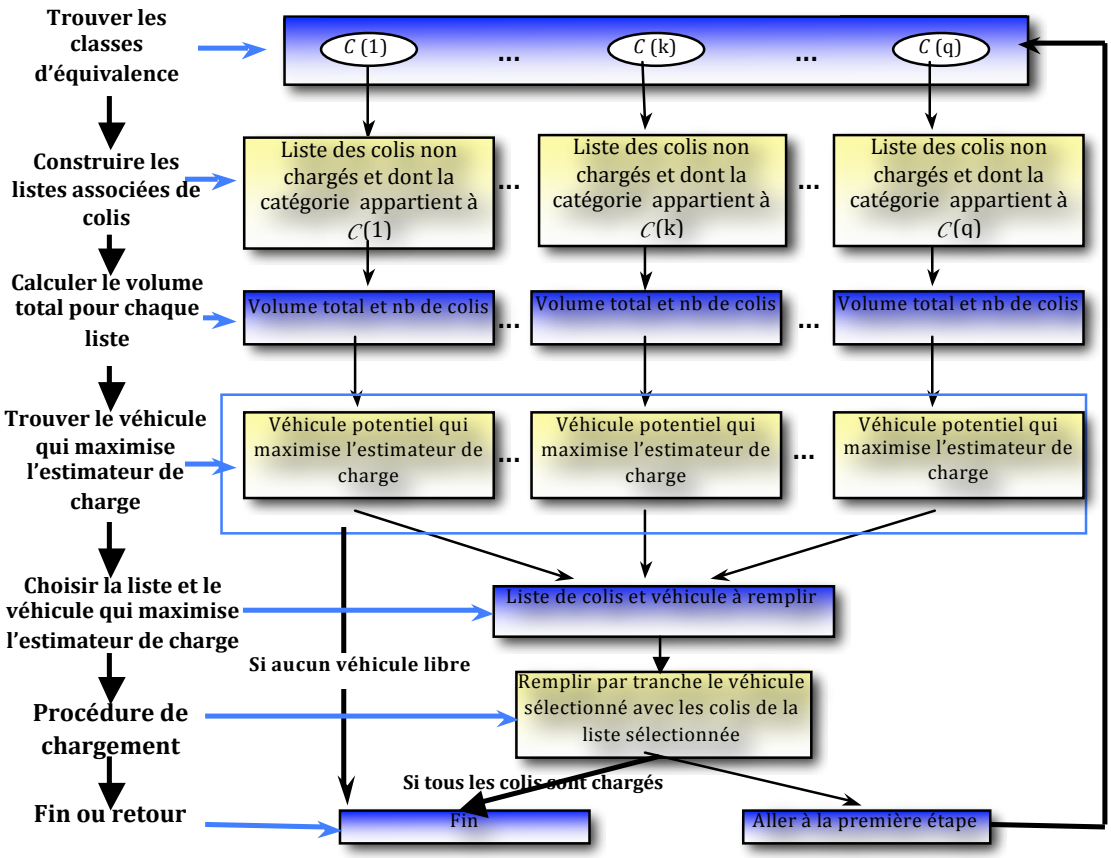
Pour affecter les marchandises, quelques règles d'attribution sont nécessaires. Nous nous basons sur les propriétés de C. La relation de compatibilité est une relation d'équivalence. Ainsi, nous pouvons déterminer les classes d'équivalences. Pour chaque catégorie de marchandises nous calculons la classe d'équivalence associée. Il résulte q listes de colis auxquelles nous associons le volume total et la longueur de la liste. Les colis appartenant à une même liste sont donc tous compatibles entre eux. Les listes sont particulièrement intéressantes, puisqu'une fois déterminées elles offrent l'opportunité de se placer dans un cas de chargement classique de véhicule sans contrainte de compatibilité. Pour débuter l'affectation, il convient de sélectionner une de ces listes et un véhicule grâce à une règle de sélection. Cette règle repose sur une estimation du volume occupé d'un véhicule j par les colis d'une liste. Un estimateur de charge pour chaque véhicule disponible j est alors nécessaire : étant donné un volume V et un nombre de colis n d'une des listes considérées, nous calculons également le volume moyen d'un colis de la liste $\frac{V}{n}$ (avec $n \neq 0$), puis la longueur moyenne d'une arête d'un colis $m_e = \sqrt{\frac{V}{n}}$, un estimateur d'indice de charge pour un véhicule disponible j est donné par :

$$est = \frac{\left[\frac{L_j}{m_e}\right] \cdot \left[\frac{H_j}{m_e}\right] \cdot \left[\frac{D_j}{m_e}\right]}{L_j.H_j.D_j}$$

où $[\alpha]$ représente la partie entière de α. Nous choisissons la liste et le véhicule j qui maximisent l'estimateur de charge. La liste des colis et le véhicule à charger sont alors connus : nous affectons les colis au véhicule selon plusieurs scénarios. Enfin, la procédure est réitérée jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de véhicules disponibles ou de colis à affecter.

4.3.1.3.2.3 Méthodologie utilisée

Le schéma de la méthodologie donné par la Figure 4.8, représente les étapes séquentielles et simultanées du chargement de véhicules que nous utilisons dans cet outil.



Source : Auteur

FIG. 4.8 – Schéma de la méthodologie de chargement des véhicules

4.3.1.3.2.4 Pseudo-code de l'algorithme

La Figure 4.9 correspond au pseudo code de la procédure de chargement.

```
Procedure pack ()
REPEAT
  For toutes les categories k
    Calculer le volume et le nombre associé de colis de la classe d'équivalence k
    Trouver le véhicule qui maximisera l'estimateur de charge
  End For
  Select la liste et le véhicule qui maximise l'estimateur de charge
  Trier les colis par time window et par dimension
  /* pour une affectation en tenant compte des dimensions des colis et des véhicules */
  While création de tranche est possible
    Créer tranche
    While allocation de la tranche est possible
    Allouer les colis aux véhicules par tranche
    End While
  End While
Until il existe encore des véhicules disponibles et des colis non affectés
```

FIG. 4.9 – Pseudo code de l'algorithme en tenant compte des dimensions

4.3.1.4 Module de routage des véhicules (mouvement des marchandises)

Pour faire circuler sur le réseau des véhicules chargés, il s'agit donc de charger les véhicules et d'établir leur feuille de route. Nous avons défini le problème de chargement des véhicules dans le paragraphe 4.3.1.3 dans lequel nous avons déjà traité la contrainte des time windows et nous donnons la séquence des clients à visiter. Le but du module de routage des véhicules est d'établir la route entre deux clients et correspond au déplacement des véhicules transportant les marchandises. Il faut établir la route la plus courte possible qui coûte le moins cher. Nous avons donc à considérer une fonction de coûts qui prend en compte le temps de transport, mais aussi la distance de transport, qui dépendront du type du véhicule. Nous avons choisi de reprendre des travaux de la littérature parce que nous nous focalisons davantage sur la manière d'utiliser ce module que sur la résolution elle-même du problème de routage.

Ce modèle examine les horaires et les plans de circulation pour le routage des véhicules de marchandises en ville. En conséquence, la séquence des clients à visiter et les itinéraires à suivre

pour la livraison des marchandises dans les zones urbaines sont connues. La tournée est fondée sur les localisations des clients, des expéditeurs et des transporteurs, sur le réseau de transport, et les décisions sont prises en fonction de l'état actuel (ou du dernier état connu) des conditions de circulation.

4.3.1.4.1 Description des éléments du problème

Nous repérons le réseau routier par un graphe $G = (V, A)$, construit à partir d'un ensemble de nœuds V et d'un ensemble d'arcs A. On notera N_V le nombre de nœuds et N_A le nombre d'arcs. Nous disposons d'un nombre m de véhicules chargés qu'il faut désormais faire circuler en minimisant le coût total de transport.

Nous établissons la route des véhicules sur la base d'un historique existant du nombre de véhicules sur chaque $arc(i, j)$ où i et j sont des nœuds de V, pour estimer la perte de temps potentielle sur l'arc ij. Chaque véhicule, arc et nœud ont des caractéristiques propres, le Tableau 4.3 dresse les éléments considérés du problème.

Ainsi, en fonction de la concentration de véhicules nous pouvons, à l'aide de modèle, calculer la vitesse d'un véhicule k sur un arc ij. Plusieurs modèles existent dans la littérature, notamment les plus utilisés dans le domaine du trafic sont les modèles de Greenshield, logarithmique de Greenberg, de Drake's Bell shaped et la famille de modèles Pipes-Hungal dont les références sont proposées dans [Greenshield, 1935] et dans un état de l'art parfaitement mené de [Sarramia, 2002]. Nous retenons le modèle de Greenshield pour sa simplicité d'utilisation car ce n'est pas l'objectif du module développé, i.e. nous définissons la vitesse d'un véhicule k comme étant :

$$V_{ijk} = V_{ijkmax}.(1 - \frac{N_{ij}}{C_{ijmax}}) \tag{4.14}$$

Où

- V_{ijk} est la vitesse du véhicule k entre les nœuds i et j ;
- N_{ij} est le nombre historique de véhicules au moment T_i ;
- C_{ijmax} est la capacité maximum en nombre de véhicules de l'arc ij ;
- V_{ijkmax} est la vitesse maximum autorisée pour un véhicule k sur l'arc ij.

Arc(i, j)	**Véhicule** k	**Noeud** i
L_{ij} : longueur de l'arc	t_{ijk} : temps mis par le véhicule k pour parcourir l'arc ij	t_{ik} : time window auquel le véhicule k doit se rendre au noeud i
N_{ij} : Valeur historique du nombre de véhicules sur l'arc ij	L_k : ensemble des noeuds de V que le véhicule k doit visiter, 0 étant la numérotation du noeud de départ	L_{ik} : durée de livraison au noeud i pour le véhicule k
C_{ij} : capacité en nombre de véhicules de l'arc ij	T_{ik} : temps auquel le véhicule k part du noeud i qui appartient à L_k	δ : marge de tolérance sur t_{ik}
V_{ijmax} : vitesse maximum autorisée sur l'arc ij	R_k : ensemble des arcs que va prendre le véhicule k et A_k l'ensemble des noeuds que visite le véhicule k	
	Co_k : coefficient pour distinguer la consommation en fonction du type du véhicule k	

TAB. 4.3 – Description des variables considérées

Puis, on introduit la notation suivante :

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{Si le véhicule } k \text{ utilise l'arc } ij \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Ainsi $R_k = \{\text{arc}(i,j) \text{ tel que } x_{ijk} = 1\}$ et $A_k = \{\text{nœud } i \text{ tel que } \forall j \quad x_{jik} = 1\}$.

Les nœuds de L_k sont numérotés dans l'ordre où ils doivent être visités par le véhicule k. Les caractéristiques sont représentées dans la Figure 4.10.

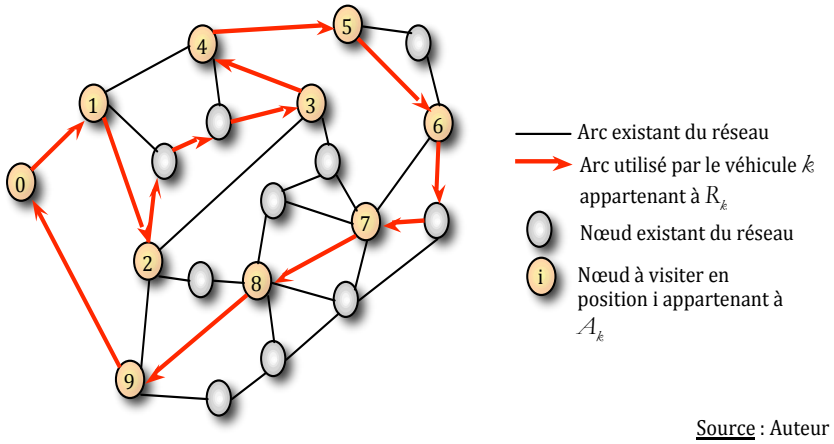


FIG. 4.10 – Représentation de quelques éléments du problème

Le but du routage est de trouver un itinéraire qui minimise le coût de transport. Le coût est donné pour un arc (i,j) et pour un véhicule k, et est noté c_{ijk}. Les coûts fixes comme le coût du chauffeur sont considérés comme équivalents pour chaque véhicule, celui-ci est associé à chaque véhicule et n'a donc pas de propriétés distinctives pour ce problème. Par conséquent les coûts fixes ne sont pas insérés dans c_{ijk}. L'expression du coût est uniquement fonction de la distance parcourue, de la vitesse à laquelle cette distance a été parcourue donc du temps de parcours. Le coût c_{ijk} est alors défini par :

$$\forall \text{ arc}(i,j) \in A, \forall k \in \{1 \ldots m\} \quad c_{ijk} = \frac{l_{ij}.Co_k}{100}.Ce_k \tag{4.15}$$

Où Ce_k est est le coût énergétique du véhicule k aux 100 kilomètres.

Ainsi, le problème du routage des véhicules selon les conditions de circulation peut être formulé de la manière suivante :

$$\min \left\{ \sum_{k=1}^{m} \sum_{i=1}^{N_V} \sum_{j=1 i \neq j}^{N_V} c_{ijk}.x_{ijk} \right\} \tag{4.16}$$

Avec :

$$\forall k \in \{1 \ldots m\} \quad \sum_{i=1}^{N_V} \sum_{j=i+1}^{N_V} x_{ijk} \geqslant |L_k| \tag{4.17}$$

$$\forall k \in \{1 \ldots m\}, \forall (i, i+1) \in Ł_k^2 \quad T_{ik} + t_{ii+1k} + L_{ik} \leqslant T_{i+1k} \tag{4.18}$$

$$\forall (i, j) \in V^2, \forall k \in \{1 \ldots m\} \quad x_{ijk} \in \{0, 1\} \tag{4.19}$$

$$\forall k \in \{1 \ldots m\}, \forall (i, i+1) \in Ł_k^2 \quad T_{ik} + t_{ii+1k} + L_{ik} \leqslant t_{i+1k} + \delta \tag{4.20}$$

$$\forall k \in \{1 \ldots m\}, \forall (i, i+1) \in Ł_k^2 \quad t_{i+1k} - \delta \leqslant T_{ik} + t_{ii+1k} + L_{ik} \tag{4.21}$$

Le coût pour chaque véhicule est minimisé par la fonction objectif (**4.16**) du problème. L'équation (**4.17**) assure que chaque véhicule visite une fois au moins tous les nœuds à livrer. La contrainte (**4.18**) impose que l'heure de départ d'un nœud soit bien ultérieure à l'heure à laquelle la livraison est terminée sur le nœud en question. Enfin, (**4.19**) indique que les variables d'affectation sont binaires. (**4.20**) et (**4.21**) indiquent que les time windows sont respectés avec un intervalle de tolérance d'une amplitude de δ à chaque livraison.

4.3.1.4.2 Règle d'affectation

Comme le problème peut concerner un grand nombre d'arcs et de nœuds, la complexité est source de complications pour la résolution exacte. Comme l'objectif n'est pas d'avoir la solution exacte, nous construisons une heuristique de manière à obtenir une solution acceptable. L'idée est de trouver une solution du problème et de l'améliorer en changeant des arcs utilisés par deux arcs qui auraient un coût total plus petit.

La stratégie d'affectation est la suivante pour un véhicule : la liste ordonnée des nœuds à visiter est fournie en données d'entrée, ainsi un premier chemin est déterminé par un algorithme de plus court chemin entre deux points successifs à livrer qui est basé sur le critère de la distance comme l'indique la Figure 4.11.

Une fois le chemin le plus court déterminé entre chaque nœud à visiter, il s'agit de calculer le coût en appliquant le modèle de Greenshield pour en déduire les temps totaux de parcours. Puis, on remplace chaque arc si possible par un chemin de moindre coût.

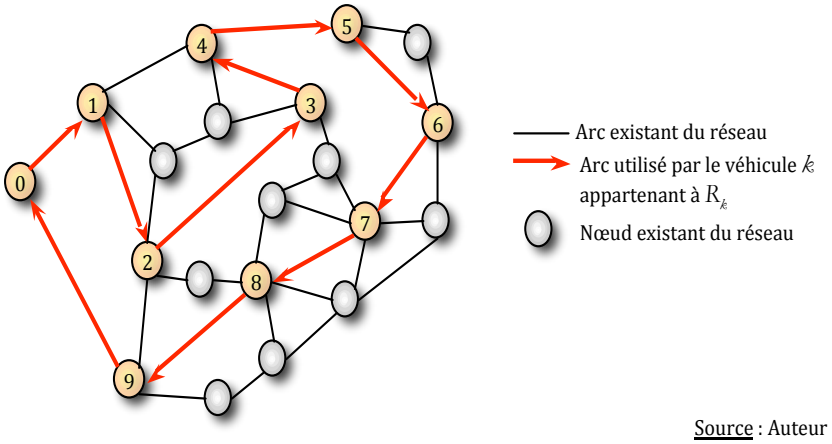


FIG. 4.11 – Chemin le plus court pour un véhicule k

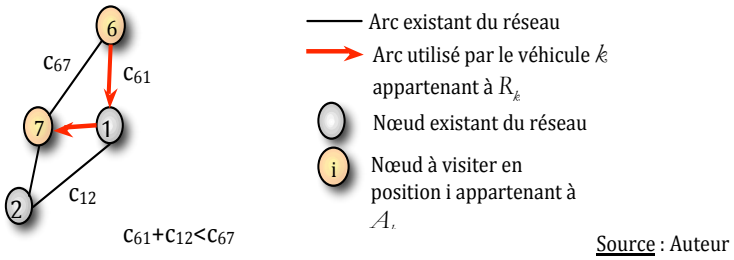


FIG. 4.12 – Amélioration de l'itinéraire

Par exemple, la Figure 4.12 montre qu'entre les nœuds 6 et 7, la donnée historique fait diminuer tellement la vitesse de transport qu'il est plus judicieux de passer par un autre chemin qui sera de moindre coût.

4.3.1.5 Module de stationnement des véhicules

Typiquement, pour livrer la marchandise, les véhicules vont devoir être stationnés sur un emplacement prévu à cet effet. Quatre alternatives sont alors possibles :

- le destinataire possède un quai de déchargement personnel. Le véhicule de marchandises peut ainsi se garer sans gêner la circulation existante ;
- une place de stationnement pour véhicules particuliers. Le cas est plutôt rare, mais un véhicule de marchandises peut très bien être stationné sur une place de stationnement

dite traditionnelle ;

- des aires de livraisons sont dans la plupart des villes marquées au sol selon des règles et normes (un ouvrage décrit clairement les aspects techniques et juridiques de telles installations [GART, 2004]) et permettent au chauffeur-livreur de ne pas ralentir ou stopper les flux de véhicules existants) et de stationner le véhicule sur un espace lui étant dédié ;
- enfin, grâce aux espaces logistiques urbains plus complexes, tels que les CDU et les ELP, pour ensuite laisser la livraison finale à un sous-traitant ou au chauffeur lui-même via des moyens de transports écologiques et généralement peu encombrants sur la voirie comme les triporteurs électriques.

Généralement, lorsque le véhicule dispose d'un quai de déchargement, les opérations de livraison se déroulent sans gêne, ni pour le chauffeur-livreur, ni pour les véhicules qui circulent sur le réseau. Or, l'intérêt de modéliser le stationnement des véhicules est de pouvoir savoir si la demande en stationnement permet d'être satisfaite par l'offre en stationnement, qui est la mise à disposition des aires de livraison, des ELP et des CDU. Nous pouvons considérer les aires de livraison, ELP et certains CDU comme finaux à partir du moment où la dernière livraison est faite avec un encombrement minimum (de même pour les CDU pour lesquels des véhicules de type triporteurs ou chariots peu encombrants assurent le dernier acheminement).

Savoir si l'offre rencontre la demande de stationnement des véhicules de marchandises, c'est aussi connaître le taux d'occupation de ces espaces finaux majoritairement de type ELU. Ainsi, il s'agit de savoir si le taux d'arrivée des camions sur chaque espace n'est pas trop important vis-à-vis de la capacité et de la durée du stationnement.

Le modèle d'un espace final de stationnement est représenté par une file d'attente de capacité finie car chaque espace possède une capacité limitée d'accueil de véhicules en stationnement. Chaque espace est considéré ici comme le serveur du système. Soit :

- i : un espace final de stationnement ;
- C_i : capacité de l'espace final de stationnement i ;
- $\lambda_{ij}(t)$: le taux d'arrivées de véhicules qui dépend du temps t , pour un espace final de stationnement i avec j véhicules sur i (avec j positif ou nul et j inférieur à C_i) ;
- $\mu_{ij}(t)$: le taux de départs de véhicules qui dépend du temps t, pour un espace final de stationnement i avec j véhicules sur i (avec j positif et j inférieur ou égal à C_i) ;

Avec ces notations, nous obtenons le graphe d'états suivant (Figure 4.13) :

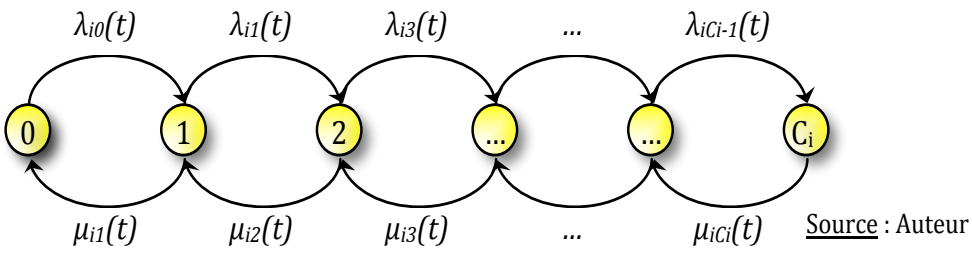


FIG. 4.13 – Graphe d'états d'un espace final de stationnement i

La première hypothèse qui peut être faite pour ce problème est de supposer que les deux taux $\lambda_{ij}(t)$ et $\mu_{ij}(t)$ ne dépendent pas de l'état antérieur j. Ainsi, $\lambda_{ij}(t) = \lambda_i(t)$ et $\mu_{ij}(t) = \mu_i(t)$.

Puis, nous supposons que chaque système de file d'attente est fondé sur un processus de Poisson, ce que nous pouvons faire pour deux raisons : ce processus représente un système réel avec suffisamment de précision et permet de plus l'analyse. Le temps séparant deux arrivées sur l'espace final de stationnement i est une variable exponentielle avec $\lambda_i(t)$ comme paramètre. En conséquence, l'intervalle de temps entre deux arrivées est $\lambda_i(t)^{-1}$.

A ce stade, la RO a permis de formaliser les éléments du système pour ensuite générer les informations d'entrée pour la simulation, à savoir connaître la flotte de véhicules de marchandises, leurs charges et les itinéraires de tournées établis. Il faut désormais poursuivre avec la phase de simulation expliquée dans le prochain paragraphe.

4.3.2 CILOSA : CIty-LOgistics-Simulation-Approach

L'approche de simulation est composée de plusieurs étapes. Chacune est développée selon les techniques les plus appropriées à leurs caractéristiques : nous retrouvons deux techniques de modélisation qui sont la Recherche Opérationnelle et la Dynamique des Systèmes. La Figure 4.14 montre la structure de l'approche de simulation proposée. Elle met en évidence trois parties pour l'utilisation de l'outil de simulation :

- l'élaboration des scénarios pour la simulation ; (Pré simulation)
- la simulation des scénarios par les flux de trafic ; (Simulation)
- l'évaluation des scénarios ; (Post simulation)

L'élaboration des scénarios est faite en deux étapes : la caractérisation de la ville et la construction des scénarios. La caractérisation de la ville est l'étape initiale permettant de formaliser les spécificités physiques pour dégager des solutions potentiellement efficaces vis-à-vis du contexte que peut offrir la ville d'étude. Puis la construction des scénarios est menée en rapport avec la liste des solutions potentiellement efficaces et permet de formaliser les liens entre une solution et sa représentation en terme de variables du système.

La simulation des scénarios est établie par l'outil de simulation présenté dans le paragraphe 4.4 composé des trois modules : le chargement de véhicules, le routage des véhicules et le stationnement des véhicules. Le module de chargement de véhicules alloue les marchandises aux véhicules, le module de routage des véhicules construit les itinéraires des véhicules et le module de stationnement des véhicules simule les livraisons. Tous les résultats sont enregistrés dans une base de données, qui elle-même a le rôle de relais entre chaque module de simulation.

L'évaluation des scénarios permet de connaître les résultats des scénarios simulés. Nous distinguons trois types d'évaluations tant qualitatives que quantitatives des impacts sur la congestion, l'environnement et la société et seront réunis en un seul diagramme d'influence.

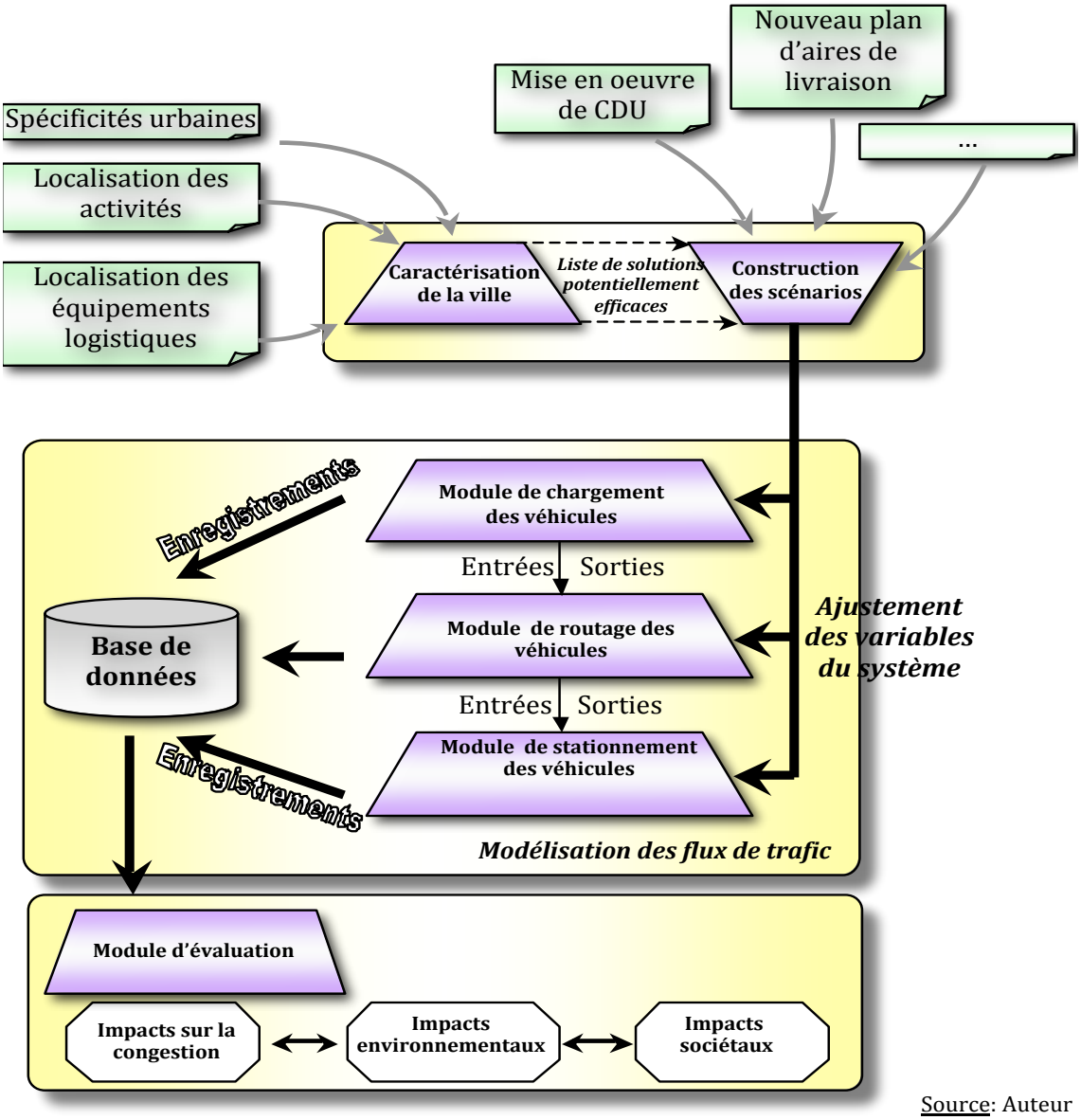
Enfin, nous décrivons les interactions et les flux d'informations entre les modules. Les paragraphes suivants développent les modules d'utilisation de l'outil.

4.3.2.1 Élaboration des scénarios : une approche systémique

Cette étape a pour objectif de construire les scénarios que le décideur souhaite simuler via l'outil. Face à la diversité importante de scénarios possibles, il est important de concentrer nos efforts sur des scénarios plausibles. Ainsi, cette partie de notre travail permet de sélectionner quelques solutions potentiellement efficaces et par conséquent, pertinentes à simuler en fonction de la structure physique de la ville.

4.3.2.1.1 Module de caractérisation de la ville

L'objectif de ce module est de proposer une liste de solutions potentiellement efficaces pour une ville donnée selon ses spécificités urbaines (détaillées dans les paragraphes suivants). Partant du principe que le domaine est encore mal connu, les collectivités sont souvent dans l'obligation de tester des actions en s'appuyant sur des solutions efficaces déjà expérimentées pour



Source: Auteur

FIG. 4.14 – Structure de l'approche de simulation CILOSA

pallier les nuisances principales que sont la congestion dans les centres urbains, l'accessibilité restreinte, les émissions, le bruit et l'insécurité. Ainsi, se posent les problèmes de transférabilité de solutions d'une ville à une autre puisque les résultats peuvent différer d'un contexte urbain à un autre. Évidement, les effets des expériences sont fortement liés aux caractéristiques de la ville.

Les villes offrent un environnement pour le TMV qui dépend de l'organisation de la cité et de la structure urbaine. Le TMV, vu comme un système, peut être décomposé selon son système de pilotage et son système physique [Doumeingts et Vallespir, 1994]. L'organisation de la cité est le système de pilotage ; il comprend la politique des stationnements, la politique de circulation, le mode de gouvernance, les relations entre les acteurs, les corps de métiers, les objectifs de la ville en matière de transport et la vérification du respect des lois. La structure urbaine est le système physique ; il est constitué du réseau de transport, des équipements facilitant le transit de marchandises, des lieux émetteurs et/ou récepteurs de marchandises et la flotte de véhicules. Ainsi, la méthodologie de caractérisation d'une ville pour le TMV peut être double : la caractérisation du système physique et la caractérisation du système de pilotage. Nous avons développé dans [Delaître *et al.*, 2007d] et approfondi dans [Delaître *et al.*, 2007f], une méthodologie de caractérisation du système physique. La méthodologie proposée considère deux spécificités physiques de la ville : la distribution des lieux concernés par des activités logistiques et la distribution des lieux facilitant le transit des marchandises. Son principe repose sur l'adaptation du concept d'entropie (au sens de Shannon) pour obtenir une représentation du désordre lié aux activités logistiques.

Le résultat de cette étape est la formulation claire de toutes les solutions envisageables pour réduire les nuisances en tenant compte des spécificités des villes et la démarche utilisée suit le schéma de principe décrit dans la Figure 4.15.

La caractérisation de la ville se fait en quatre étapes (Figure 4.15) : une étape transversale qui est la construction de la base de connaissance des solutions existantes, et trois étapes successives que sont la caractérisation des spécificités urbaines, la définition de l'espace de caractérisation et la détermination des solutions adaptées à la ville.

4.3.2.1.1.1 Construction de la base de connaissances des solutions existantes

Cette étape peut être réalisée de deux manières différentes : par une démarche personnelle in-

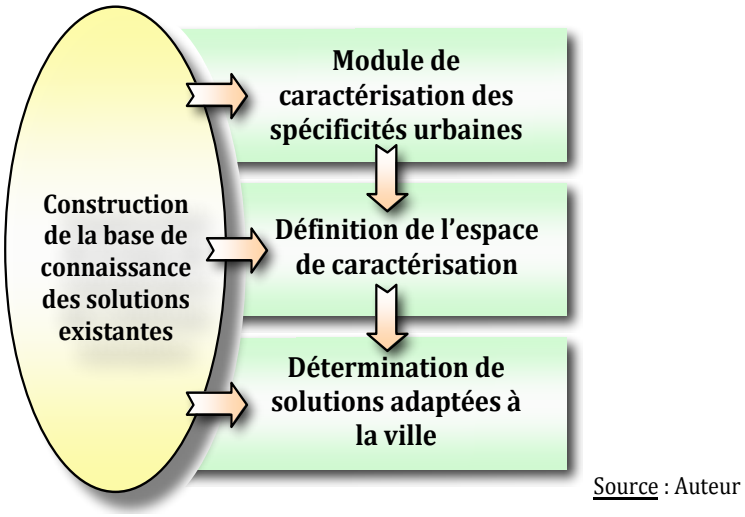


FIG. 4.15 – Schéma de principe pour la caractérisation de la ville

novante ou par une approche déjà présentée dans la littérature. Par exemple, le projet BESTUFS liste les meilleures pratiques et les classe selon neuf catégories de solutions [BESTUFS, 2004] : technologie des véhicules, systèmes intelligents de transport, plateformes publiques/privées, espaces logistiques urbains, réglementations, planning et politique de circulation, interfaces transport de marchandises/passagers, transport intermodal et e-commerce. Pour chaque nuisance, nous associons les solutions efficaces. Ainsi, la Figure 4.16 propose une représentation, sous forme de diagramme d'influence, des associations solutions/congestion dans les centres urbains.

Deux attributs de variables sont donnés : les influentes sont celles à l'origine d'une flèche et les influencées sont celles en bout de flèche. Les flèches indiquent qu'une relation d'influence existe entre deux variables. Chaque relation d'influence est marquée d'un signe positif ou négatif qui indique le sens de l'influence. Une relation positive signifie que si la variable influente augmente, la variable influencée augmente également. Par exemple, plus le ratio $\frac{\text{Nombre de livraisons de nuit}}{\text{Nombre de livraisons}}$ est important, plus la congestion lors de la journée diminue.

4.3.2.1.1.2 Module de caractérisation des spécificités urbaines

Pour caractériser une ville, nous souhaitons connaître son état d'équilibre pour le TMV, i.e. nous retenons une variable d'offre et une variable de demande. Deux grands types de spécificités

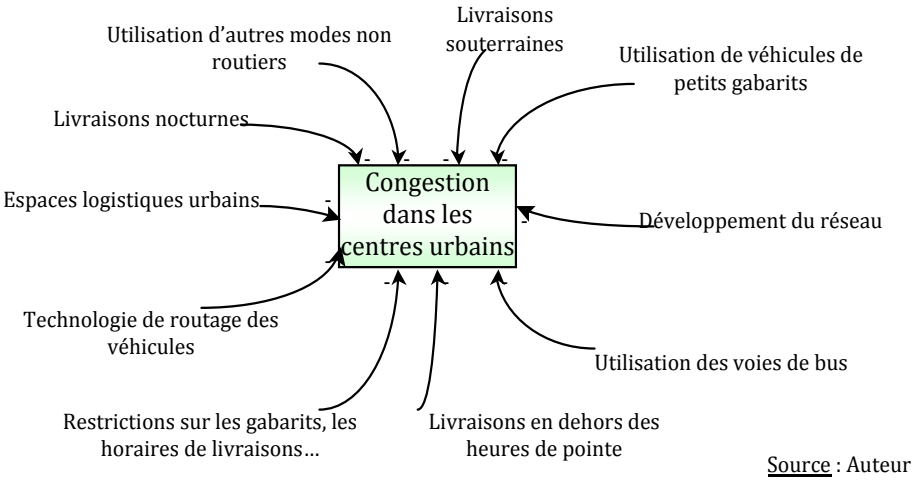


FIG. 4.16 – Exemples de solutions diminuant la congestion

propres à chaque ville sont la distribution des activités et la distribution des points favorisant le transit des marchandises. Une activité est un lieu géographique où une livraison/un enlèvement de marchandises peut être fait. Un point favorisant les flux de marchandises est un équipement logistique, il peut s'agir d'une aire de livraison, d'un espace logistique urbain, d'une consigne, etc. Chaque secteur d'activité ne génère pas le même nombre de livraisons, il importe alors de différencier les secteurs d'activités. Une pondération égale au nombre de livraisons par semaine peut être attribuée selon des valeurs d'enquêtes afin d'obtenir des équivalences entre les activités. Nous avons fait le choix de travailler avec des enquêtes nationales qui révèlent ainsi une certaine robustesse statistique. En Figure 4.17, une table de correspondance est présentée [MRTE *et al.*, 2000], document inspiré de [Ambrosini *et al.*, 1997, 1999a, 1999b].

Par exemple, une activité, dans le secteur pharmaceutique et impliquant un employé, obtiendra un poids de 9.1.

La considération de ces deux variables permet de trouver l'état d'équilibre du TMV d'une ville selon une offre (d'équipements logistiques) et une demande des activités (en équipements logistiques).

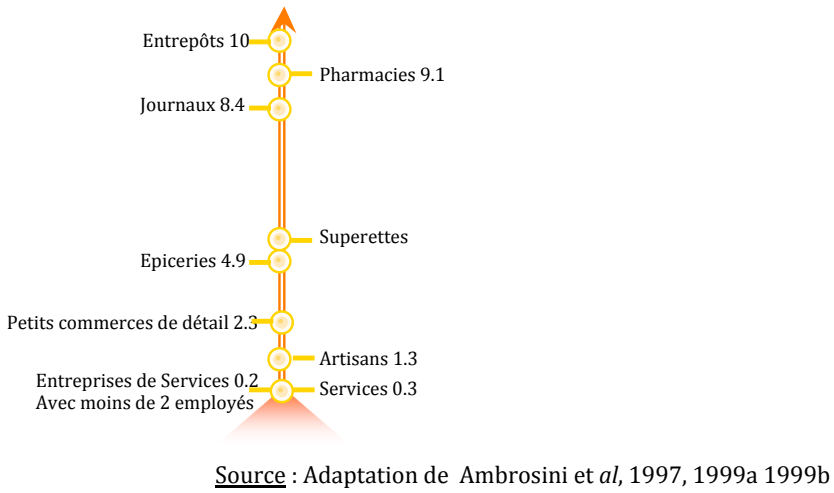


FIG. 4.17 – Nombre de livraisons-enlèvements/semaine par activité par employé

4.3.2.1.2 Définition de l'espace de caractérisation

L'équilibre offre/demande conditionne l'efficacité d'une solution. Ainsi, pour formaliser cet équilibre, nous divisons la ville en zones et pour chaque zone (Figure 4.18), nous considérons le nombre d'activités pour 1000 habitants et le nombre d'équipements logistiques par activités.

La construction des zones ne peut pas être laissée au hasard. En effet la délimitation aléatoire des zones viendrait directement influencer de façon significative les notions utilisées dans la suite. Les zones doivent caractériser une partie de la ville considérée par rapport au transport de marchandises. Dans ce cadre, les zones sont générées à partir d'un critère de demande i.e. le nombre d'activités. La localisation des activités dans la ville peut être vue comme un nuage de points de plusieurs variables quantitatives. Le but est de réunir les « individus » (au sens statistique du terme, qui sont ici les activités) en groupe d'individus similaires (par leurs positions dans la ville) [Bach et Jordan, 2003]. Parmi les techniques existantes, l'analyse discriminante se révèle être un outil simple et efficace et peut être une technique descriptive. On parle dans ce cas d'analyse factorielle discriminante. L'objectif est de proposer un nouveau système de représentation, des variables latentes formées à partir de combinaisons linéaires des variables prédictives, qui permettent de discerner le mieux possible les groupes d'individus [Lebart *et al.*, 2000]. En ce sens, elle se rapproche de l'analyse factorielle car elle permet de proposer une représentation graphique dans un espace réduit, plus particulièrement de l'analyse en composantes principales (ACP) calculée sur les centres de gravité conditionnels des nuages de points

avec une métrique particulière.

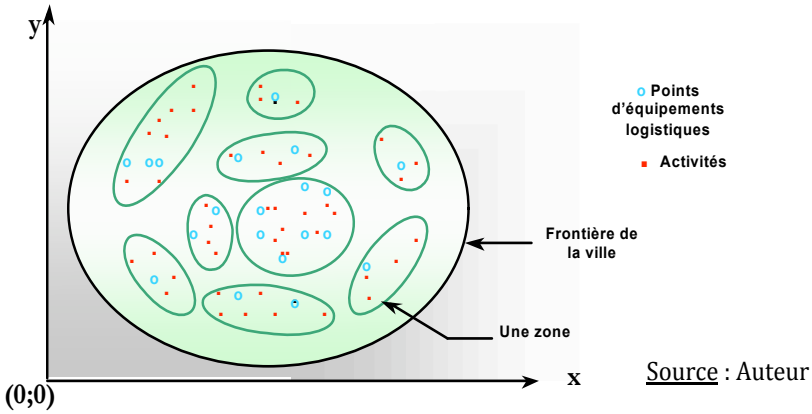


FIG. 4.18 – Représentation des zones dans la ville

Ensuite, la distribution des activités n'est pas identique dans chacune des zones. Il est alors nécessaire de considérer la variabilité de la localisation des activités dans la ville pour connaître et caractériser le type de dispersion géographique puisque les solutions à mettre en place dépendent aussi de la concentration[2] des activités dans un espace donné de la ville. Pour exprimer la variabilité des activités, nous utilisons le concept de l'entropie et plus particulièrement l'entropie au sens de Shannon [Shannon et Weaver, 1949]. L'entropie E de Shannon est en fait une mesure de la quantité d'information (exprimée en bits) que l'on ignore au sujet de la variable aléatoire étudiée (ou encore si on veut être plus positif de l'information que l'on acquiert à son sujet lorsque l'on mesure la variable étudiée). Si E mesure la quantité d'information "intrinsèque" de la variable étudiée, cela veut dire que l'on peut trouver une façon de coder cette variable de manière optimale pour transporter cette information, ceci est à la base du théorème de compression sans bruit de Shannon.

Intuitivement, l'entropie de Shannon peut être considérée comme la mesure de l'incertitude d'un événement aléatoire, et plus précisément sur sa distribution. Pour adapter l'entropie de Shannon à notre méthodologie, nous avons remplacé les probabilités par des proportions p et assimilé les états du système à des zones géographiques. Par analogie, la probabilité d'être dans un état du système devient une proportion à l'intérieur d'une zone géographique. En posant :

– m le nombre de secteurs d'activité,

[2]notion de voisinage d'action détaillé dans le paragraphe 4.4

- K le nombre de zones géographiques,
- N_j avec $j \in \{1 \dots m\}$ le nombre d'activités de type j,
- w_j avec $j \in \{1 \dots m\}$ le poids attribué au secteur d'activité j,
- n_{ij} avec $j \in \{1 \dots m\}$ et $i \in \{1 \dots K\}$ le nombre d'activités du secteur j dans la zone i.

La proportion pondérée des activités dans une zone i est décrite par la formule (**4.22**) :

$$p_i = \frac{\sum_{j=1}^{m} w_j.n_{ij}}{\sum_{j=1}^{m} w_j.N_j} \tag{4.22}$$

La formule de l'entropie associée aux activités est l'équation (**4.23**).

$$E = -\sum_{i=1}^{K} p_i.\log(p_i) \tag{4.23}$$

Où :

- E= entropie,
- K= nombre de zones géographiques,
- p_i= proportion pondérée d'activités dans la zone i.

Notons que le logarithme est utilisé pour conserver la notion d'additivité de l'incertitude ou du désordre notamment grâce à une des propriétés du logarithme[3]. L'additivité de l'entropie est donc bien établie si on suppose deux variables X et Y avec N_X et N_Y états possibles et une distribution p_{X_i} et p_{Y_i}. Les possibilités d'états sont alors égales à $N_X \times N_Y$, ainsi $\log(N_X \times N_Y) = \log(N_X) + \log(N_Y)$.

Dans ce cas, l'entropie devient une mesure de dispersion géographique [Crespo de Carvalho, 2003].

Cette entropie est majorée par $-\log(K)$ puisque $\forall i \in \{1 \dots K\} \quad p_i \leqslant 1$. Dans ce cas, pour obtenir des valeurs bornées de l'incertitude, nous calculons l'Entropie Relative ER. L'entropie divisée par $-\log(K)$ donne l'entropie relative. Ainsi l'incertitude est mesurée sur une échelle de 0 à 1 ; 0.5 étant la valeur intermédiaire. La valeur 1 représente le maximum d'incertitude, i.e. la proportion pondérée est sensiblement la même dans chaque zone de la ville. La valeur 0 signifie que l'entropie relative est à son minimum, i.e. il existe une grande variabilité dans les proportions pondérées.

Comme illustré sur la Figure 4.19, une ville peut être caractérisée grâce à sa localisation dans l'espace de caractérisation.

[3]Pour deux réels a et b $\log(ab) = \log(a) + \log(b)$.

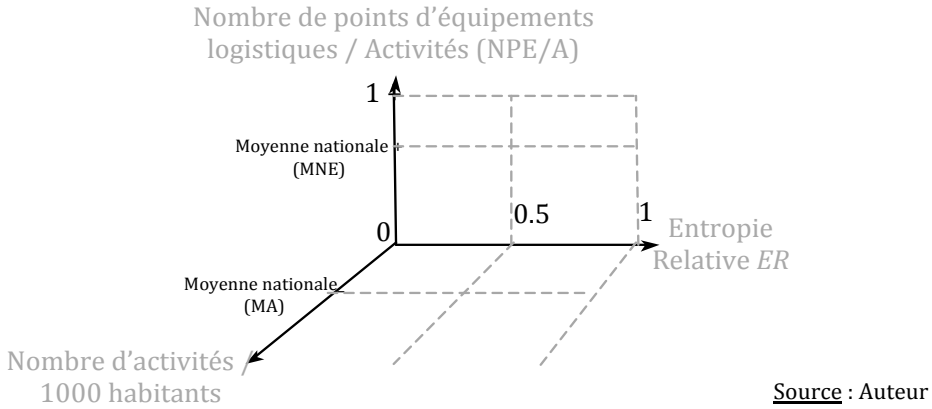


FIG. 4.19 – Espace de caractérisation

Des zones de caractérisation sont définies selon des valeurs particulières des axes de l'espace. En effet, 0.5 pour l'entropie relative correspond au seuil intermédiaire, cet axe défini deux parties de l'espace : une ER inférieure à 0.5 signifie que l'incertitude est faible. Et dans ce cas, la distribution est plutôt mal répartie parmi les zones, il existe notamment des zones possédant un nombre important d'activités par rapport à d'autres. Et inversement si l'entropie relative est supérieure à 0.5, la distribution des activités est assez homogène i.e. le nombre d'activités par zone est sensiblement du même ordre pour chaque zone. Ensuite, deux parties sont définies selon l'axe du nombre d'activités par 1000 habitants où une valeur intermédiaire est la valeur moyenne nationale (MA) du nombre d'entreprises pour 1000 habitants (après pondération selon le type de l'activité) du pays dans lequel se situe la ville à l'étude. Cette valeur est donnée par les offices de statistiques notamment EUROSTAT pour les communautés européennes et l'INSEE pour la France. Enfin, le nombre de points d'équipements logistiques par activités est majoré par 1 puisque que le nombre d'équipements est inférieur au nombre d'entreprises et par conséquent inférieur au nombre d'activités. Grâce aux différentes parties définies, des zones de caractérisation sont mises en évidence (Figure 4.20).

Il existe huit zones de l'espace définies par des intervalles de valeurs selon les trois axes :

- Zone A : $\{$NA/1000HAB<MA ; NPE/A<MNE ; $ER < 0.5\}$
- Zone B : $\{$NA/1000HAB>MA ; NPE/A<MNE ; $ER < 0.5\}$
- Zone C : $\{$NA/1000HAB>MA ; NPE/A<MNE ; $ER > 0.5\}$
- Zone D : $\{$NA/1000HAB<MA ; NPE/A<MNE ; $ER > 0.5\}$

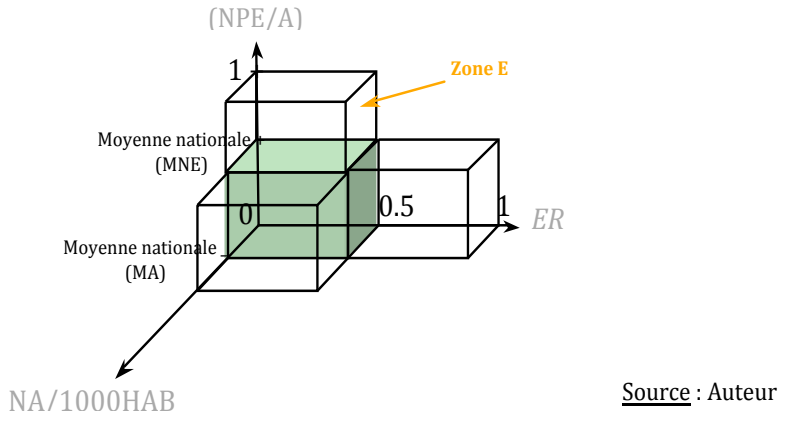


FIG. 4.20 – Représentation de quatre zones de caractérisation

- Zone E : {NA/1000HAB<MA ; NPE/A>MNE ; $ER < 0.5$}
- Zone F : {NA/1000HAB>MA ; NPE/A>MNE ; $ER < 0.5$}
- Zone G : {NA/1000HAB>MA ; NPE/A>MNE ; $ER > 0.5$}
- Zone H : {NA/1000HAB<MA ; NPE/A>MNE ; $ER > 0.5$}

Si une ville se situe dans la zone A de la Figure 4.20, la distribution des activités est hétérogène sur les différentes zones et le nombre d'activités est relativement faible ainsi que le nombre de points d'équipements logistiques par nombre d'activités. L'offre est relativement faible mais la demande également. Ainsi, notre approche permet de définir le contexte de la ville pour chaque zone de caractérisation.

4.3.2.1.3 Détermination de solutions adaptées à la ville

En fonction de la situation de la ville dans l'espace de caractérisation, les solutions inadéquates au contexte défini par les zones de caractérisation sont retirées de la liste initiale établie en première partie de la méthodologie. Ainsi, il reste une liste d'actions à mener qui tiennent compte des caractéristiques de la ville.

Par exemple, considérons une ville dont la localisation dans l'espace de caractérisation correspond à la zone B. Cette ville dispose d'un bon nombre d'activités, une entropie relative assez faible i.e des zones sont beaucoup plus denses que d'autres et un nombre d'équipements relativement faible par rapport au nombre d'activités. Cette ville possède des marchés potentiels à la consolidation de livraisons, notamment dans les zones denses. Les solutions de type

Espaces Logistiques Urbains (ELU) ou Centres de Distribution Urbaine (CDU) seraient pertinentes puisque de tels équipements sont en faible proportion de manière globale.

Deux cas sont à distinguer toutefois, lorsque l'entropie relative est très proche des valeurs minimale et maximale, i.e. lorsque $ER \simeq 0$ ou $ER \simeq 1$ et lorsque l'entropie oscille autour de la moyenne. Dans le premier cas, l'interprétation est relativement simple puisque une ER proche de 0 correspond à un degré de désordre maximal, ainsi les solutions idéales dans ce cas sont les consolidations possibles pour acheminer les marchandises très denses en livraisons et enlèvements. A l'inverse, une ER proche de 1 signifie que l'ordre est maximal ainsi toutes les zones sont équivalentes en termes de livraisons et d'enlèvements. Et des solutions idéales seraient de mettre en adéquation l'importance du nombre de déplacements pour chaque zone avec l'offre du réseau en termes de capacités et de stationnements (par exemple augmenter les capacités des rues par lesquelles transitent les véhicules de marchandises ou optimiser la localisation et le dimensionnement des stationnements des espaces logistiques urbains).

Malheureusement, les cas extrêmes sont plutôt rares, et la majorité des villes se situe dans une zone ambigüe où les deux axes supplémentaires sont absolument nécessaires pour identifier des solutions potentielles. Pour illustrer nos propos, nous allons contraindre une étude sur le centre-ville de Poitiers de manière à obtenir une « sous-ville » qui, elle, aurait un degré d'ordre élevé. Puis dans le chapitre 6, nous étudierons un cas qui, lui, est beaucoup plus délicat à interpréter, celui de La Rochelle.

4.3.2.1.4 Caractérisation du centre-ville de Poitiers

Donnons un exemple concret, celui de la ville de Poitiers. Nous appliquons la méthodologie de caractérisation au centre-ville de Poitiers. La Figure 4.21 donne une représentation graphique de la distribution des livraisons par semaine dans le centre-ville de Poitiers.

En regroupant par zone, la carte devient celle décrite dans la Figure 4.22.

En pondérant (Tableau 4.4), l'entropie et l'entropie relative peuvent être calculées et sont données dans le Tableau 4.5.

L'entropie relative est élevée (rappelons qu'elle est majorée par 1). L'analyse peut être faite selon cette donnée, puisque les zones sont homogènes (elles ne présentent pas de grandes différences au niveau des livraisons), il s'agit donc d'harmoniser les réglementations et les capacités du réseau de manière à les rendre équivalentes dans chaque zone. Si on pousse l'ana-

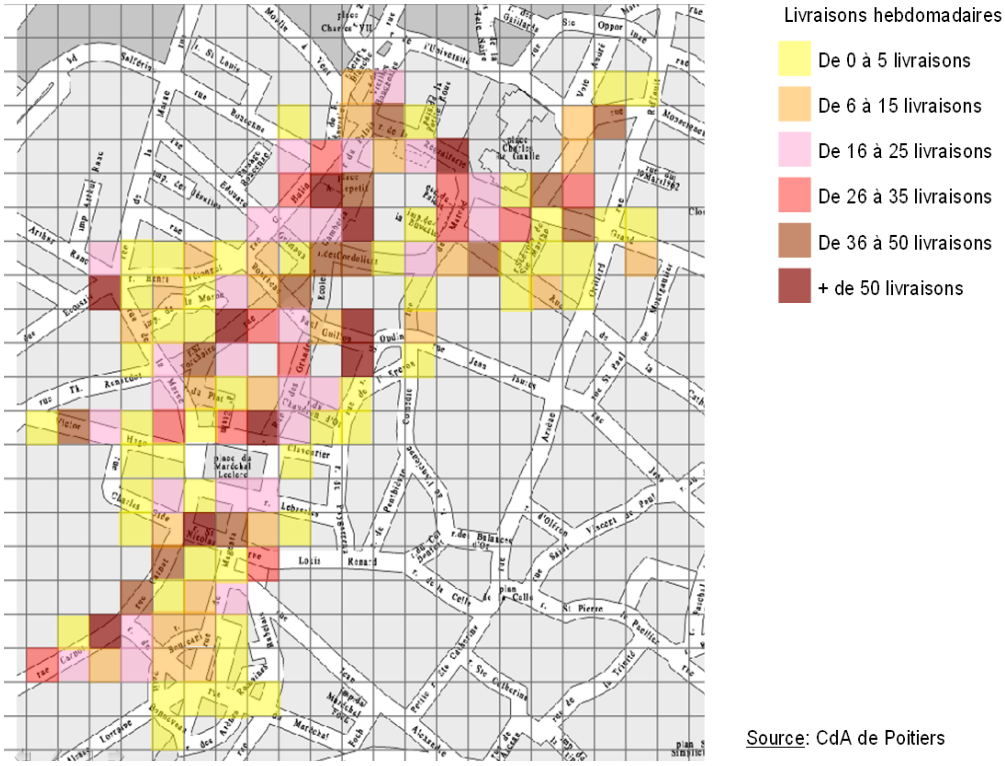


FIG. 4.21 – Distribution des livraisons dans le centre-ville de Poitiers

lyse plus loin, en considérant les deux autres axes de l'espace de caractérisation, des solutions spécifiques de type ELP et réaménagement des aires de livraison se dégagent étant donné le faible nombre d'aires de livraison dans ce secteur (14 aires pour assurer plus de 2500 livraisons, soit plus 180 livraisons pour une seule aire, et d'après les premières études dans ce domaine, on pourrait atteindre un optimum pratique lorsqu'une aire assure environ 90 livraisons [Interface Transport, 2008]).

4.3.2.1.5 Construction des scénarios

Le but de cette étape est de construire des situations hypothétiques pour en évaluer leurs conséquences sur le système, en jouant notamment sur la structure de la ville (comme l'étalement urbain, la répartition des activités, la création de nouvelles zones commerciales...), sur le réseau (capacité, sens des rues....), sur les équipements logistiques (plateformes urbaines, aires de livraisons, consignes....) et sur l'organisation des acteurs (comptes propres et d'autrui, changement de flotte de véhicules, nouvelles technologies de routage...).

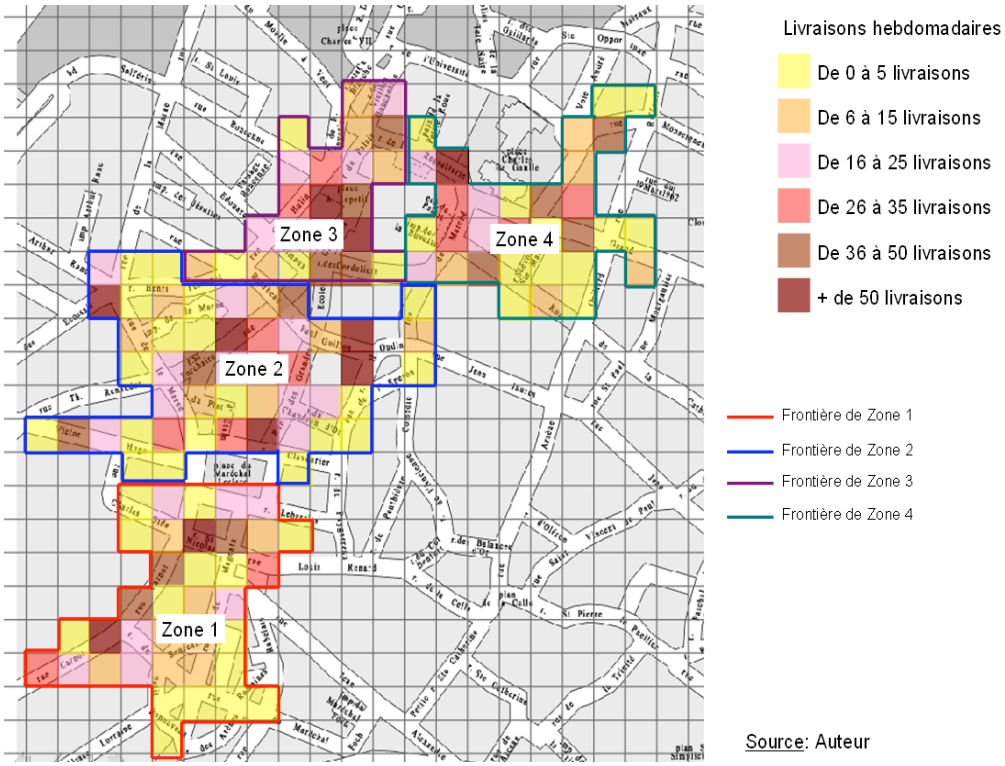


FIG. 4.22 – Zones dans le centre-ville de Poitiers

	Zone	p_i	$-p_i \log(p_i)$
1	Zone 1	0,21395401	0,143280629
2	Zone 2	0,36340558	0,159756149
3	Zone 3	0,21505596	0,143538782
4	Zone 4	0,20758445	0,141739739

TAB. 4.4 – Pondération des zones

Nombre de Zones	**4**
Total poids	1
Entropie	0,5883153
Entropie relative	0,97717056

TAB. 4.5 – Entropie et entropie relative pour Poitiers

Un des principes constants de la Dynamique des Systèmes Complexes étant de ne représenter, dans toute la mesure du possible, que des relations correspondant à une réalité tangible, à une causalité effective et clairement perçue, nous choisirons de représenter la notion d'accumulation, d'intégrale plutôt que celle de dérivée. Nous écrirons un système d'équations intégrales, laissant l'ordinateur, au moyen de logiciels appropriés, simuler la résolution d'un système d'équations différentielles (en réalité un ensemble d'équations intégrales).

Nous ne décrirons pas en détail la symbolique utilisée qui a parfois été décriée comme trop simpliste. Rappelons seulement que la séparation des variables d'un système en variables d'état (qui résultent de phénomènes d'accumulation et qu'on appelle parfois « niveaux » par référence au niveau de liquide dans un récipient), en flux de "matière" (cette matière pouvant être une quantité ou même une qualité d'information, de l'argent, des décisions, etc.), en informations correspondantes et en variables de décision, représente bien la réalité physique telle qu'elle est. Construire un scénario, c'est savoir quelles variables doivent être considérées et savoir comment les faire évoluer, c'est la formalisation d'une idée en variables du système. En listant les éléments du système et leurs interactions, une première vision du système TMV est faite. Il est alors possible d'identifier les variables concernées et celles qu'il faudra prendre en compte dans un scénario donné.

Pour que la réflexion soit plus lisible et compréhensible, nous avons séparé le diagramme causal du système TMV en deux diagrammes causaux : le premier permet de comprendre les mouvements de marchandises, le deuxième permet de comprendre les impacts du TMV. La Figure 4.23 donne le premier diagramme causal du système TMV et la Figure 4.25 le deuxième diagramme causal.

Le formalisme de représentation reste identique à celui décrit dans le paragraphe 4.3.2.1.1.1, les couleurs des flèches ne traduisent que le signe de l'influence (bleu pour une influence positive, rouge pour une influence négative). Ainsi, sur la Figure 4.23, plus la quantité de marchandises est importante plus le nombre de mouvements sera élevé.

La Figure 4.24 précise quels sont les modules concernés selon les variables considérées dans un scénario.

Les variables partenariat, taux de chargement, quantité de marchandises, time windows, ordonnancement des livraisons, et type de véhicule sont des variables de scénarios impliquant le module de chargement de véhicules. Les variables degrés de restriction, nombre de mouve-

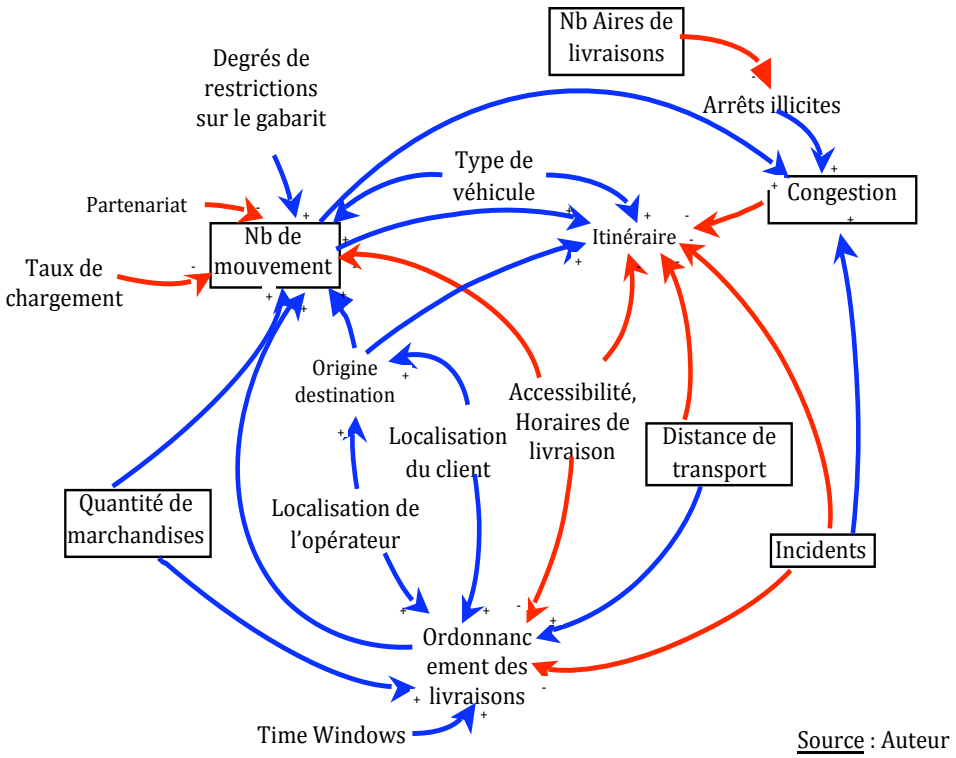


FIG. 4.23 – Diagramme causal pour comprendre les mouvements de marchandises

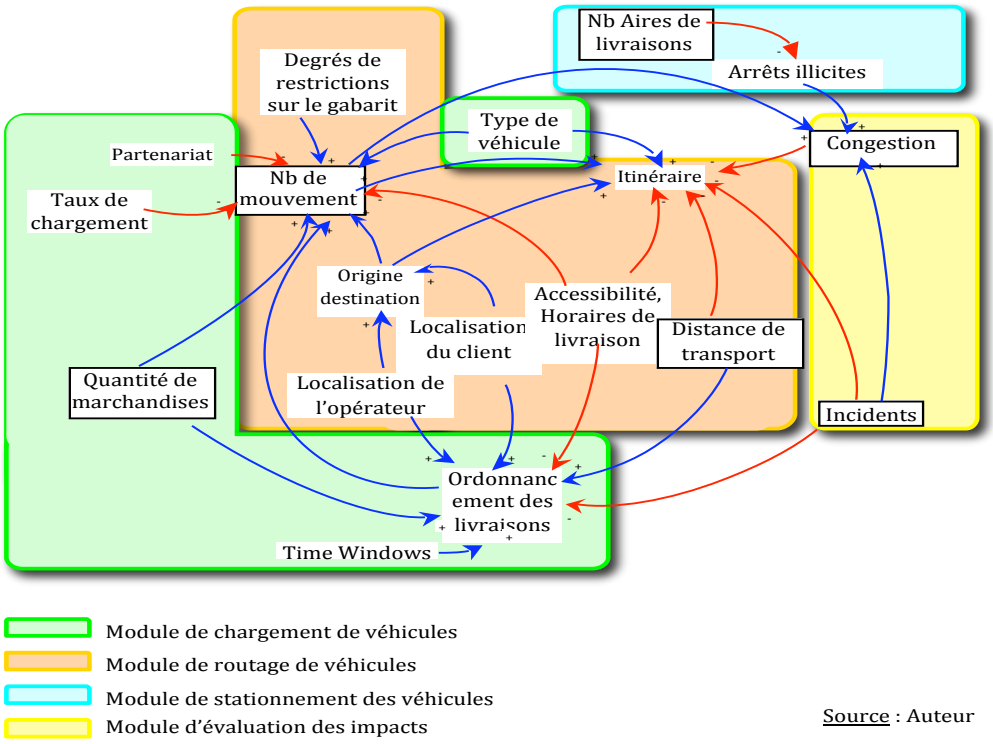


FIG. 4.24 – Relation entre variables et modules de simulation pour les mouvements de marchandises

ments, origine destination, localisation du client, localisation de l'opérateur, accessibilité, horaires de livraison, distance de transport et itinéraire sont des variables de scénarios impliquant le module de routage des véhicules. Le nombre d'aires de livraison et les arrêts illicites appartiennent au module de stationnement des véhicules. Enfin, la congestion et les incidents sont des variables du module d'évaluation.

Les mouvements de marchandises sont donnés principalement par les deux modules de chargement et de routage des véhicules.

4.3.2.2 Simulation des scénarios : une approche Optimisation

Lorsque les scénarios sont construits et de ce fait lorsque le changement des variables du modèle peut être opérationnel, il s'agit de simuler vis-à-vis de ces situations initiales la dynamique et de prendre connaissance de l'évolution du système. Ainsi nous utilisons l'outil de simulation construit en trois modules et décrits dans le paragraphe 4.3.1. A chaque instant une base de données est mise à jour de manière à enregistrer les résultats qui permettront au module d'évaluation d'évaluer les différents scénarios mais aussi qui pourront alimenter les différents modules de l'outil pour fonctionner (le module de chargement, de routage et de stationnement des véhicules). Ainsi, l'approche pour la simulation est établie par une approche d'optimisation du chargement, du routage et du stationnement des véhicules.

4.3.2.3 Évaluation des scénarios

Si l'on se souvient que le but premier de tout ce travail est de connaître l'évolution en fonction du temps du système TMV, on comprendra que l'on cherche à formaliser le problème d'une manière qui soit adaptée à ce but.

Pour l'évaluation, le diagramme causal de la Figure 4.25 montre les variables et leurs relations pour comprendre les impacts du mouvement des marchandises.

Certaines variables sont communes et permettent le lien entre les deux diagrammes causaux. Typiquement, l'impact du TMV repose sur deux états des véhicules selon s'ils circulent ou s'ils sont à l'arrêt. La Figure 4.26 donne les modules associés aux variables.

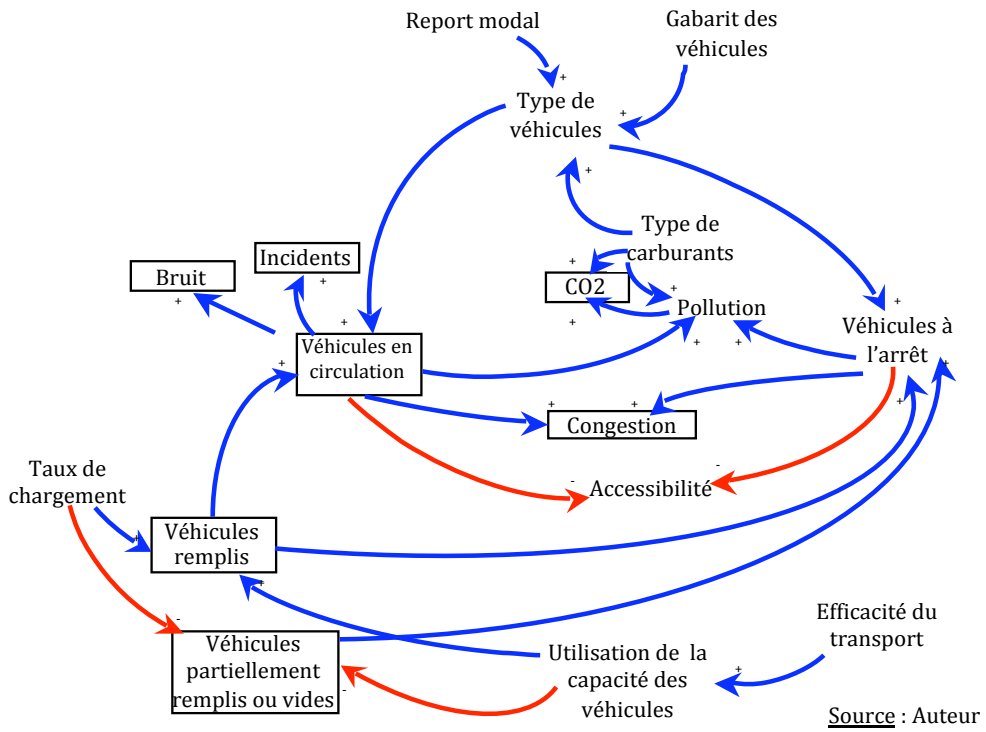


FIG. 4.25 – Diagramme causal pour comprendre les impacts du mouvement des marchandises

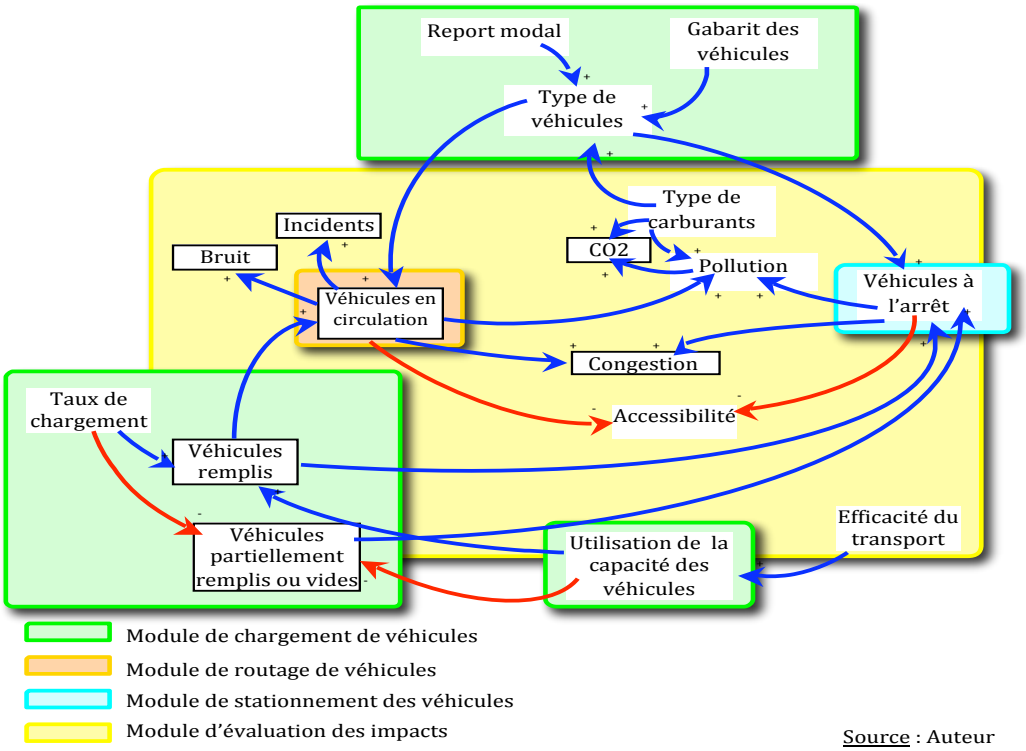


FIG. 4.26 – Relation entre modules et variables pour comprendre les impacts du TMV

4.3.2.4 Interactions et flux d'informations entre les Modules

Nous détaillons dans ce paragraphe les entrées et sorties de chaque module.

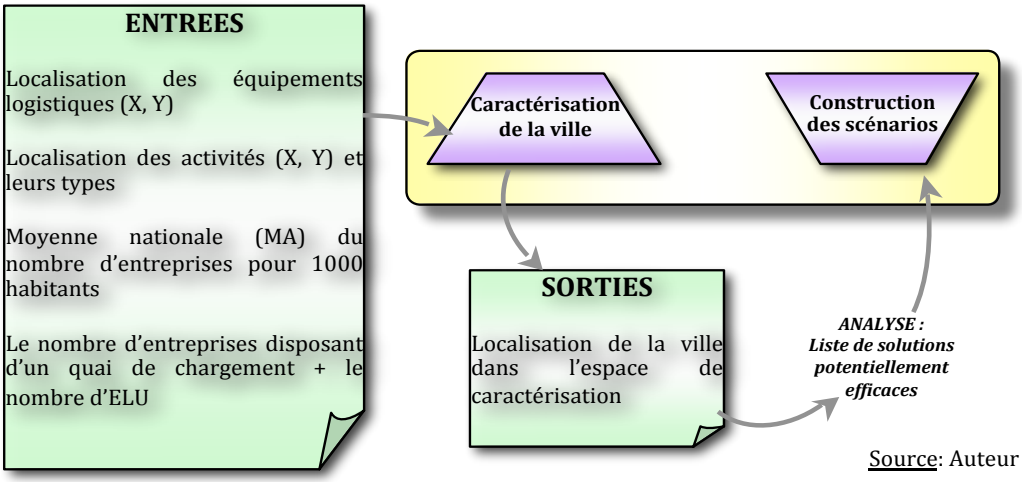


FIG. 4.27 – Entrées/Sorties du module de caractérisation de la ville

La Figure 4.27 détaille les données nécessaires en entrée du module de caractérisation de la ville, c'est-à-dire les localisations des activités et des équipements logistiques, les types d'activités, et la moyenne nationale du nombre d'entreprises pour 1000 habitants. Le module donne la localisation précise de la ville d'étude dans l'espace de caractérisation en sortie. Suivie d'une analyse sur cette localisation, une liste de solutions potentiellement efficaces peut être dressée qui sera l'entrée du module suivant, à savoir la construction des scénarios.

Dans la mesure où un grand nombre de scénarios est possible, nous ne pouvons décrire toutes les entrées/sorties de ce module. En revanche, nous détaillons ces données pour l'outil développé à partir de CILOSA qui vise à simuler plusieurs configurations lors du réaménagement d'un plan d'aires de livraison dans la section 4.4

La Figure 4.28 propose les données nécessaires quant à l'utilisation des modules simulant les flux de trafic. Cependant, selon les scénarios voulus, tous les modules ne sont pas nécessaires, par exemple vouloir simuler l'impact d'un nouveau plan d'aires de livraison sur le trafic ne fait pas appel au module de chargement de véhicules. Ou encore, vouloir simuler l'impact d'un meilleur taux de chargement ne fera pas appel au module de stationnement des véhicules.

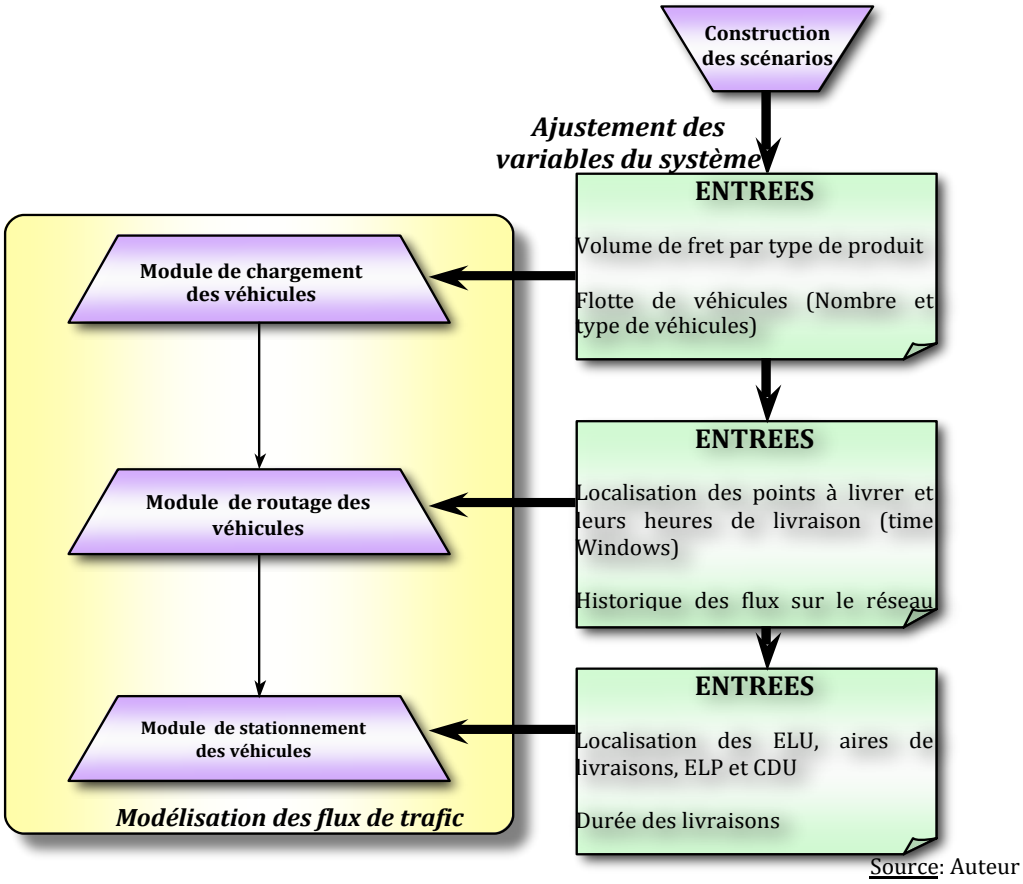


FIG. 4.28 – Entrées/Sorties pour la modélisation des flux

L'approche CILOSA est générique et à partir de celle-ci, il est possible de concevoir des outils de diagnostic et d'aide à la décision qui peuvent jouer un rôle majeur dans l'identification de solutions à moyen terme. Dans la section suivante, nous proposons la construction d'un tel outil sur la problématique fondamentale de la localisation et du dimensionnement des aires de livraison.

4.4 Simulation des aires de livraison

4.4.1 Problématique

Aujourd'hui, les impacts du TMV sur le trafic global ne sont connus que partiellement. En effet, si des comptages permettent de quantifier les flux des véhicules de fret en mouvement et donc d'évaluer les conséquences de leur présence au sein du trafic d'ensemble, en revanche l'impact du stationnement gênant, voire illicite (infraction au code la route) n'est pas ou peu étudié. C'est pourquoi il nous a semblé important de nous intéresser au stationnement gênant des véhicules de livraison et à ses causes. Celles-ci sont multiples, la plus importante étant l'absence d'aires de livraison en nombre suffisant, ou leur non-utilisation par les chauffeurs-livreurs, soit parce qu'elles ne correspondent pas à leurs besoins réels, soit parce qu'elles sont encombrées par des véhicules non autorisés [IAURIF, 2004], [Ambrosini *et al.*, 1997, 1999a, 1999b], [Interface Transport, 2002].

Même si la durée du stationnement varie d'une ville à l'autre, les résultats de plusieurs études menées sur le fonctionnement des livraisons convergent. Le principal constat est que les durées de livraisons sont majoritairement courtes : 90% des livraisons se font en moins de dix minutes dans Paris [IAURIF, 2004], 60% en moins de cinq minutes pour le centre-ville d'Arras [Transitec, 2003], 75% en moins de dix minutes en moyenne sur les agglomérations de Bordeaux, Marseille et Dijon [Ambrosini *et al.*, 1997, 1999a, 1999b]. Elles tendraient même à diminuer. Par ailleurs, le stationnement se fait sur un emplacement non autorisé pour plus d'une livraison sur deux, voire 70% dans le cas de la ville de Lyon [Interface Transport, 2002]. Les raisons en sont multiples, les plus fréquemment évoquées concernant la non-disponibilité des aires de livraison, régulièrement occupées par les véhicules de riverains, de commerçants, voire d'artisans, ou encore l'éloignement des emplacements par rapport aux points de livraison, alors que les livreurs cherchent toujours à stationner au plus près de la destination de livraison. Notons qu'à

Paris en 2004, à peine plus de 10% des destinataires ont déclaré bénéficier d'une aire de livraison à proximité [IAURIF, 2004].

Dans l'ensemble de l'organisation du système TMV, les aires de livraison jouent un rôle particulier [Delaître *et al.*, 2007d] : ce sont des aires d'arrêt et non de stationnement, où le chauffeur peut, sans gêner les flux de circulation, déposer son véhicule pour effectuer les opérations de chargement et déchargement de marchandises à destination des activités commerciales et industrielles situées dans un cercle de faible rayon autour de l'aire. L'existence d'une aire de livraison bien conçue et sa disponibilité effective pour le véhicule de livraison conditionnent fortement au niveau local la fluidité de la circulation et l'efficacité de la distribution des marchandises.

D'une manière générale, les stationnements se font d'autant plus fréquemment sur des emplacements non autorisés que le milieu est contraint. Pour que les chauffeurs-livreurs utilisent correctement les emplacements réservés, il faut que ceux-ci ne nécessitent aucune manœuvre compliquée (entrée et dégagement en direct), condition remplie de préférence par des aires positionnées en angle de rue ou suffisamment longues (de l'ordre de 15 m pour un véhicule utilitaire léger).

La mise en adéquation des besoins en livraison (flux et durées) avec les places réservées à cet effet pour les véhicules de marchandises permet de diminuer les problèmes. Pour entreprendre une telle démarche au niveau d'une ville entière, il faut d'abord établir un diagnostic des besoins au regard de la situation. On peut alors déterminer un plan optimal d'aires de livraison sous forme d'une distribution spatiale des aires de livraison sur la ville.

Pour y parvenir, collectivités locales, transporteurs, commerçants et détenteurs de fret doivent se mettre d'accord. Véritables chefs d'orchestre de cet ensemble, les collectivités locales doivent mesurer à quel point le sous-dimensionnement des aires de livraison et une localisation non optimale dans la ville sont sources de problèmes et apparaître comme force de proposition pour des améliorations, lesquelles s'articulent autour de l'optimisation de la localisation et du dimensionnement des aires en question, puis de l'usage qui en sera fait.

Pour un décideur, résoudre ce double problème est essentiel pour plusieurs raisons :

- c'est une des conditions d'une circulation fluide, en particulier dans les villes physiquement contraintes (rues étroites, cœur historique, etc.) ;
- c'est une étape incontournable et la première à résoudre dès lors qu'une démarche d'op-

timisation du TMV est lancée ;

– c'est une possibilité d'améliorer, efficacement et à moindre coût, la qualité de la desserte d'une ville en marchandises.

Bien évidemment, pour qu'une démarche d'optimisation du TMV soit efficace, il est nécessaire qu'elle soit intégrée à une stratégie cohérente de transport urbain [Delaître *et al.*, 2007a, 2007e], ceci pour éviter que les flux de véhicules de marchandises ne viennent freiner les flux des véhicules particuliers.

Actuellement les aires de livraison sont aménagées au coup par coup pour satisfaire les commerçants qui en font la demande. Les collectivités apportent une réponse locale et ponctuelle à un problème local et daté, soulevé par tel ou tel commerçant. Ainsi, dans la plupart des villes, si ce n'est peut-être certaines villes de petite taille, la localisation et le dimensionnement des aires ne sont pas ou sont peu conçus de manière globale. De surcroît, aucune adaptation n'est prévue pour accompagner l'évolution dans le temps des besoins industriels et commerciaux. Rien d'étonnant alors à ce que certains emplacements dédiés au stationnement des véhicules de livraison soient sous-dimensionnés ou, à l'inverse, que des emplacements réservés soient sous-utilisés, ce qui incite les autres utilisateurs de la voirie à les détourner à leur profit et contribue à décrédibiliser les aires de livraison. Enfin, les livraisons de marchandises évoluent en fonction des besoins industriels et commerciaux et cette évolution est rarement prise en compte par les collectivités pour la mise à jour de leurs plans d'aires de livraison. Dans ce cadre, la livraison ne peut s'effectuer dans de bonnes conditions.

Cette problématique est source d'une optimisation potentielle de la circulation des véhicules dans la ville puisque les zones ne bénéficiant pas d'un plan efficace d'aires de livraison sont sources d'impacts négatifs sur la capacité du réseau et sur la sécurité [Aiura et Taniguchi, 2005].

4.4.2 Le stationnement gênant pris en compte

Comme dit précédemment, nous nous concentrons sur l'activité du transport routier de marchandises qui consiste à livrer de façon illicite ou gênante. Les véhicules de marchandises concernés sont ceux qui n'ont pas pu trouver place sur une aire appropriée et stationnent donc en pleine voie. Nous les désignerons par la suite comme véhicules gênants.

La Figure 4.29 présente quelques cas de véhicules gênants communément observés en ville. Cette liste n'est pas exhaustive et d'autres cas (variantes) peuvent se décliner à partir de ces

situations de base, notamment si l'on considère d'autres aménagements de voirie comme les trottoirs, les voies bus et les pistes cyclables, si l'on tient compte du nombre de voies, si l'on distingue les différents cas de stationnement gênant de véhicules de livraison (en pleine voie, en demi Lincoln, sur une place de stationnement classique, etc.). Le cas 3, dans lequel une aire de livraison existe à proximité, mais est occupée illégalement par un véhicule particulier, ne devrait théoriquement pas se produire. Il relève d'une logique répressive, qui n'est pas du ressort de la modélisation. Seuls les cas 1 et 2 sont considérés dans notre outil.

Nous considérons que la présence de ces *véhicules gênants* au cours d'une livraison est directement liée à l'absence d'une aire convenable à proximité ou à son inadéquation, donc à l'imperfection du réseau d'aires de livraison dans la ville.

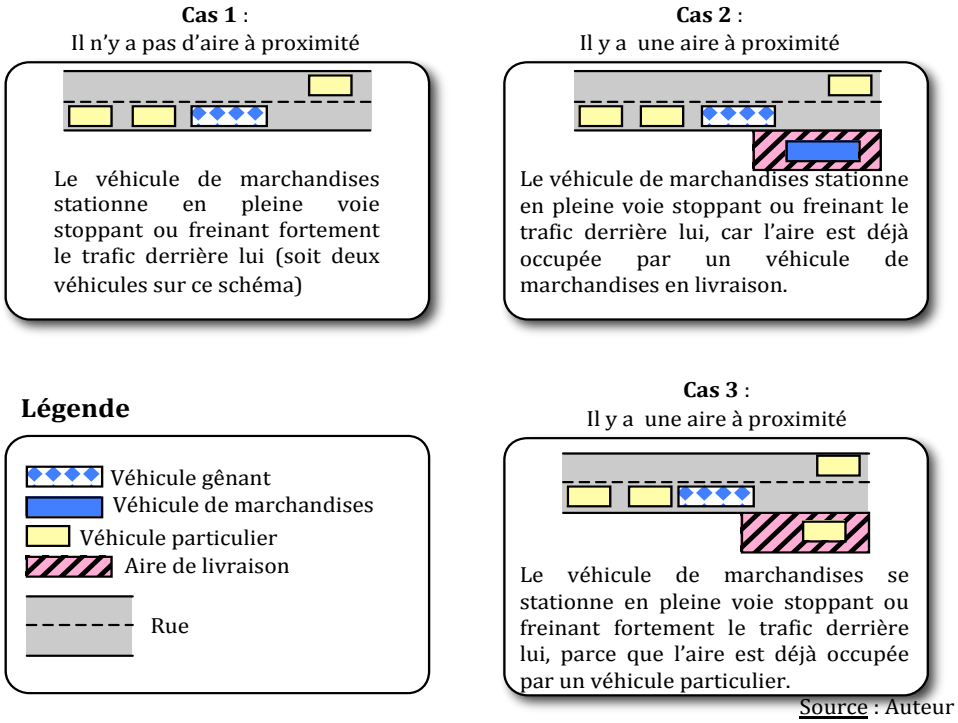


FIG. 4.29 – Cas concrets de véhicules dits gênants

L'outil proposé est construit sur la base de la méthodologie CILOSA décrite dans les paragraphes précédents, et a été mis en œuvre afin de diagnostiquer un plan d'aires de livraison d'une ville et peut simuler des scénarios pour optimiser l'emplacement et la taille des aires dans la ville. Par conséquent il doit être construit sur la base des trois modules de CILOSA. Or, pour

la simulation des aires de livraison, les modules de chargement et de routage des véhicules sont inutiles dans le sens où le fait de connaître le taux de chargement des véhicules et l'organisation des tournées et des itinéraires n'est pas pertinent tandis que la notion de stationnement des véhicules sur les aires de livraison est une information primordiale. C'est pourquoi les seuls modules à considérer pour la simulation des aires de livraison sont le module de stationnement et le module d'évaluation détaillés dans le paragraphe suivant.

4.4.3 Principes

L'outil vise à mesurer l'efficacité d'un plan donné d'aires de livraison, dont le plan et la capacité sont connus, par une simulation numérique confiée à l'informatique. Il s'agit de déterminer le nombre de véhicules de marchandises qui se trouveront en position gênante faute d'avoir pu trouver place sur une aire prévue à leur usage, puis d'estimer l'impact sur le trafic global de ces véhicules bloquants.

L'outil DALSIM est composite et constitué de deux modules : dans le premier, une aire de livraison est modélisée par un système de file d'attente, tandis que, dans le second, les effets des aires sur le trafic global sont donnés par un modèle de dynamique des systèmes. Le schéma de principe se divise donc en deux modules communicants et est donné en Figure 4.30.

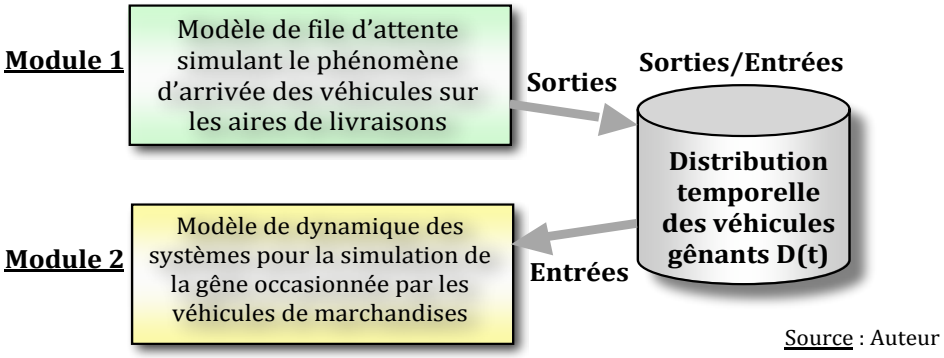


FIG. 4.30 – Structure de l'outil DALSIM

Le modèle de file d'attente génère la distribution temporelle des véhicules dits « gênants » de manière agrégée dans l'espace notée $D(t)$, i.e. c'est le nombre total des véhicules de marchandises qui, à l'instant t, stationnent en dehors d'une aire de livraison pour cause d'occupation

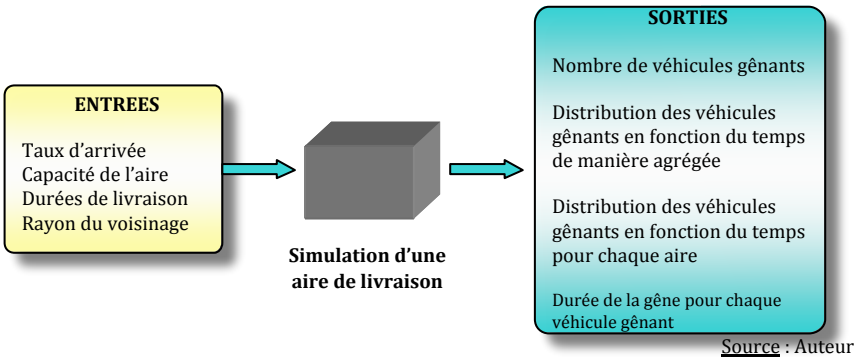


FIG. 4.31 – Entrées/Sorties du modèle d'aire de livraison

ou de trop grand éloignement. $D(t)$ a un rôle charnière entre les deux modules, car elle est une sortie du premier module et constitue une entrée du modèle suivant (modèle de dynamique des systèmes pour la propagation de la gêne).

4.4.4 Simulation d'une aire de livraison

La modélisation d'une aire de livraison est donnée par le modèle de stationnement explicité lors de l'approche de simulation CILOSA.

Ainsi, une aire de livraison est assimilée à une file d'attente d'une certaine capacité, d'un certain taux d'arrivée et de départ de camions. A des fins simplificatrices, le taux d'arrivée des véhicules, qui est normalement généré par le module de routage des véhicules, est calculé de manière plus rapide. Puis, nous supposons que chaque livraison effectuée est faite par un camion unique dans un voisinage petit (i.e. un même camion ne livre pas deux activités différentes dans un même voisinage). La Figure 4.32 montre une représentation du voisinage d'une aire de livraison. C'est un ensemble d'activités (commerces, restaurants,...) faisant partie du cercle tracé dont le rayon est apprécié par l'utilisateur de l'outil. Enfin la dernière hypothèse est qu'une aire de livraison va participer à la desserte de toutes les activités de son voisinage.

Le schéma de principe du module 1 est donné par la Figure 4.31.

Le taux d'arrivée n'est pas trivial à déterminer, alors même qu'il constitue un élément clé de la validité de la simulation. Du fait qu'un camion s'arrête sur une aire donnée forcément pour livrer la marchandise nécessaire au bon fonctionnement d'une activité commerciale ou

industrielle située pas trop loin, le taux d'arrivée sur cette aire est lié à la distribution temporelle des livraisons concernées. Pour calculer ce taux d'arrivée, on va donc s'intéresser aux activités desservies à partir de l'aire considérée et aux nombres de livraisons qu'elles génèrent sur un intervalle de temps donné (un jour de la semaine).

Après avoir observé le comportement des livreurs stationnant sur une aire de livraison donnée, l'utilisateur de l'outil commence par définir le voisinage de cette aire : il s'agit du cercle contenant toutes les activités commerciales ou industrielles desservies à partir de cette aire. Nous avons observé des rayons utiles variant de 10 m à 70 m. Puis, pour chaque activité, une enquête permet de connaître la distribution temporelle des livraisons de façon empirique. Comme un camion ne dessert pas plus d'une activité à partir d'une même aire, il n'y a pas de recouvrement et l'on peut sommer les distributions des livraisons associées aux activités recensées dans le voisinage de l'aire pour obtenir la distribution temporelle globale de l'aire. La Figure 4.32 illustre les critères qui permettent le calcul du taux d'arrivée.

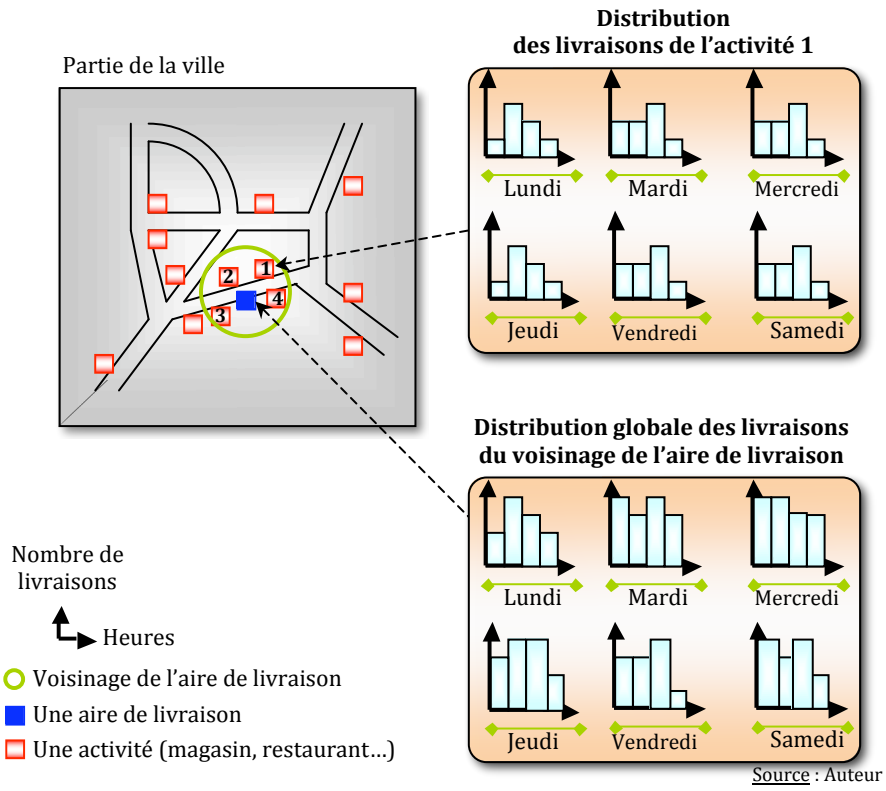


FIG. 4.32 – Critères pour le taux d'arrivées d'une aire de livraison

Les données d'entrée du module 1 sont la capacité de chaque aire de livraison, son rayon de voisinage, la durée des livraisons et le taux d'arrivée des véhicules sur cette aire.

La simulation consiste ensuite à faire apparaître des véhicules de marchandises selon le taux d'arrivée et à générer les livraisons selon la durée et ce, sur chaque aire de livraison. Ainsi, à chaque instant, il est possible de connaître l'état de chaque aire de livraison, autrement dit son occupation. Lorsqu'une aire de livraison est pleine, c'est-à-dire lorsqu'elle se trouve dans l'état C_i (du graphe d'états de la Figure 4.13), il n'y a plus de place disponible, ce qui oblige alors le chauffeur à garer le véhicule ailleurs : sur le trottoir ou sur la chaussée. Dans ce cas, chaque arrivée supplémentaire est comptabilisée comme gênante. Au niveau de chaque aire, les sorties du module 1 sont la distribution des véhicules gênants en fonction du temps et la durée de la gêne pour chaque véhicule gênant.

Le module 1 génère ensuite la distribution temporelle des véhicules de livraison gênants de manière agrégée dans l'espace $D(t)$. Cette distribution joue un rôle de charnière entre les deux modules : sortie du premier module, elle constitue une entrée du second.

Les sorties de ce modèle sont le nombre de véhicules gênants, la distribution $D(t)$, la distribution des véhicules gênants en fonction du temps pour chaque aire et la durée de la gêne pour chaque véhicule gênant.

4.4.5 Simulation de la propagation de la gêne occasionnée

Une fois les véhicules de livraison gênants générés et connus, on s'intéresse à la répercussion sur le trafic global de la gêne occasionnée. Pour cela, nous utilisons un modèle appliqué de manière agrégée dans l'espace.

4.4.5.1 Les variables principales

Le modèle traite l'ensemble des véhicules (voyageurs, fret). Il considère trois variables de type « stock » en interaction deux à deux. Ces variables sont liées au statut des véhicules sur le réseau. On distingue les trois statuts suivants :

- les véhicules **gênés**. Ce sont les véhicules circulant sur le réseau mais dont les conditions de circulation sont altérées par les véhicules de marchandises gênants ou par les véhicules eux-mêmes gênés, comme la baisse de la vitesse ou l'arrêt complet (Cas 1 et 2 par exemple

de la Figure 4.29) ;

- les véhicules **gênables** circulant sur le réseau routier. Ce sont les véhicules qui ne sont pas atteints par la gêne occasionnée lors des stationnements illicites des véhicules de marchandises mais uniquement exposés à la gêne ;
- les véhicules circulant sur le réseau et **non concernés** par la gêne occasionnée ni par les véhicules de marchandises en infraction ni par les véhicules gênés.

Nous posons de plus que les véhicules gênants appartiennent à la catégorie des véhicules gênés.

La Figure 4.33 illustre les trois statuts sur un exemple : à l'instant t considéré, le véhicule 1 est gêné, parce que le véhicule de marchandises est garé en pleine voie et gêne directement la circulation du véhicule 1. Le véhicule 2 est lui aussi gêné, car 1 le gêne. Le véhicule 3 est gênable, car, bien qu'encore en mouvement, il s'approche d'un véhicule gêné. Le véhicule 4 n'est ni gêné ni gênable, car le véhicule devant lui n'est pas encore gêné. Enfin le véhicule 5, ayant la voie libre devant lui, est clairement non concerné par la gêne.

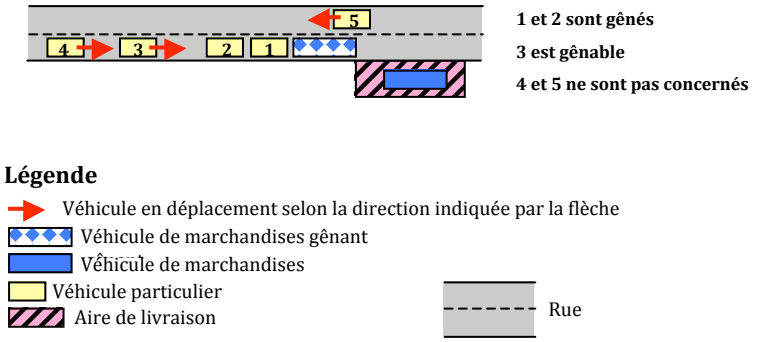


FIG. 4.33 – Les trois statuts des véhicules en circulation

Dans la suite de cette thèse, on notera les variables principales :

- $X_1(t)$ le nombre de véhicules gênables ;
- $X_2(t)$ le nombre de véhicules gênés ;
- $X_3(t)$ le nombre de véhicules qui ne sont pas concernés par l'obstruction des véhicules.

La somme des trois variables principales forme la variable $N(t)$ qui correspond au nombre de véhicules sur le réseau de la ville à un moment t.

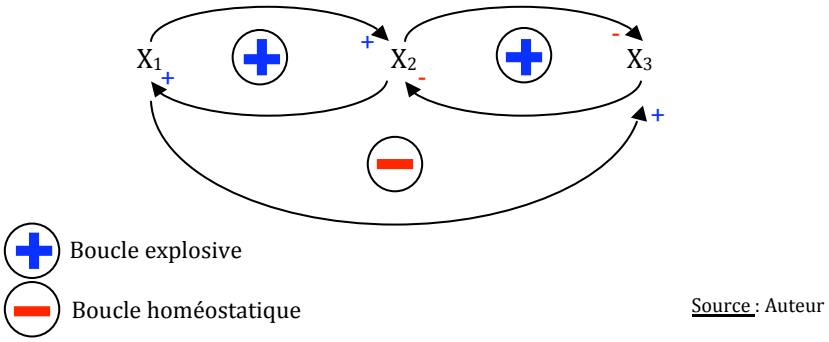


FIG. 4.34 – Boucles de rétroaction dans le modèle de propagation de la gêne

4.4.5.2 Les relations entre les variables principales

Le modèle s'appuie sur des relations d'influence, positive ou négative, entre variables. Les relations croisées sont les suivantes :

- $X_3(t)$ influence négativement $X_2(t)$, i.e. plus il y a de véhicules non concernés par la gêne, moins il y a de véhicules gênés et réciproquement ;
- $X_2(t)$ influence positivement $X_1(t)$, i.e. plus il y a de véhicules gênés, plus il y a de véhicules gênables et inversement.
- $X_1(t)$ influence positivement $X_3(t)$, i.e. plus il y a de véhicules gênables, plus il y a de véhicules non concernés

Cependant, plus qu'à ces influences, il faut s'intéresser aux trois boucles de rétroaction qu'elles forment (Figure 4.34). Les boucles contenant un nombre pair d'influences négatives ont un comportement explosif (croissance ou décroissance exponentielle). La boucle entre $X_1(t)$ et $X_2(t)$ est de ce type et exprime une croissance exponentielle, qui représente la propagation de l'obstruction de la gêne sur les véhicules gênables. La boucle entre $X_2(t)$ et $X_3(t)$ est également explosive, mais représente la résorption de la gêne. Au contraire, une boucle de régulation, ou boucle de stabilisation, a tendance à avoir une structure asymptotique traduisant un état d'équilibre : on parle alors de comportement homéostatique, ou d'équilibration. Les cybernéticiens préfèrent utiliser le terme de boucle négative, car elle est caractérisée par un nombre impair d'influences négatives entre variables. C'est notamment le cas pour la boucle entre $X_1(t)$ et $X_3(t)$.

Les équations des relations entre les variables et les paramètres sont explicités comme suit. Le système de file d'attente avec le modèle suivant de dynamique des systèmes permet d'avoir une vision globale et d'évaluer les répercussions sur les flux de circulation à l'échelle de la ville.

X_1, X_2 et X_3 représentent des nombres de véhicules, et à ce titre, il est sous-entendu que ce sont des nombres entiers. Cependant, dans l'optique de nos travaux de recherche, nous dirigeons nos efforts pour intégrer cette partie dans un modèle qui considère aussi des variables continues. Nous considérons alors que ce n'est qu'une simple option de travail pour une première ébauche à visée simplificatrice.

Un véhicule sur le réseau à un instant t appartient à un et un seul des statuts énoncés. Ainsi le nombre de véhicules N dans la ville est donné par la formule (4.24) :

$$\forall t > 0 \quad N(t) = X_1(t) + X_2(t) + X_3(t) \tag{4.24}$$

4.4.5.3 Hypothèses du modèle :

$X_1(t)$ diminue à un paramètre k_1 et le « contact » entre les véhicules circulant sur le réseau (et gênables) et l'obstruction des véhicules. Les véhicules de X_2 sont en mesure de faire obstacle, pendant une certaine durée, aux véhicules qui ne sont pas gênés mais gênables X_1. Ce lien peut être modélisé par l'équation suivante (4.25) :

$$\forall t > 0 \quad \frac{dX_1(t)}{dt} = -k_1.X_1(t).X_2(t) \tag{4.25}$$

Le nombre de véhicules de X_1 ne peut diminuer que si l'obstruction s'étend ou se stabilise. Après la durée de l'obstruction, les véhicules de X_2 appartiennent ensuite aux véhicules de X_3, dont le nombre ne peut que croître. $X_3(t)$ est fonction du nombre de véhicules gênants et de la durée de l'obstruction k_2, ce qui pourrait être représenté par (4.26) :

$$\forall t > 0 \quad \frac{dX_3(t)}{dt} = k_2.X_2(t) \tag{4.26}$$

Il vient le système S suivant :

$$\forall t > 0 \quad S = \begin{cases} \frac{dX_1(t)}{dt} = -k_1.X_1(t).X_2(t) \\ \frac{dX_3(t)}{dt} = k_2.X_2(t) \\ N(t) = X_1(t) + X_2(t) + X_3(t) \end{cases}$$

Avec $X_1(0) = N(0); X_2(0) = D(0); X_3(0) = 0$

où $D(t)$ est la distribution définie dans le paragraphe 4.4.3.

Ce système est non linéaire et ne peut être résolu analytiquement, par conséquent, la simulation est pertinente pour cette problématique.

4.4.6 Relations entre les deux modules

Considérant les trois variables stocks principales, le lien entre le modèle des aires de livraison et le modèle de propagation de la gêne se fait à partir de la variable X_2, le nombre de véhicules gênés. Ce stock diminue lorsque les véhicules ne sont plus gênés (lié à la durée de la gêne) et augmente lorsque de nouveaux véhicules se voient gênés mais aussi lorsque de nouveaux véhicules gênants apparaissent suivant la distribution $D(t)$ générée du premier module. La Figure 4.35 illustre l'imbrication des deux sous-modèles proposés dans cette thèse.

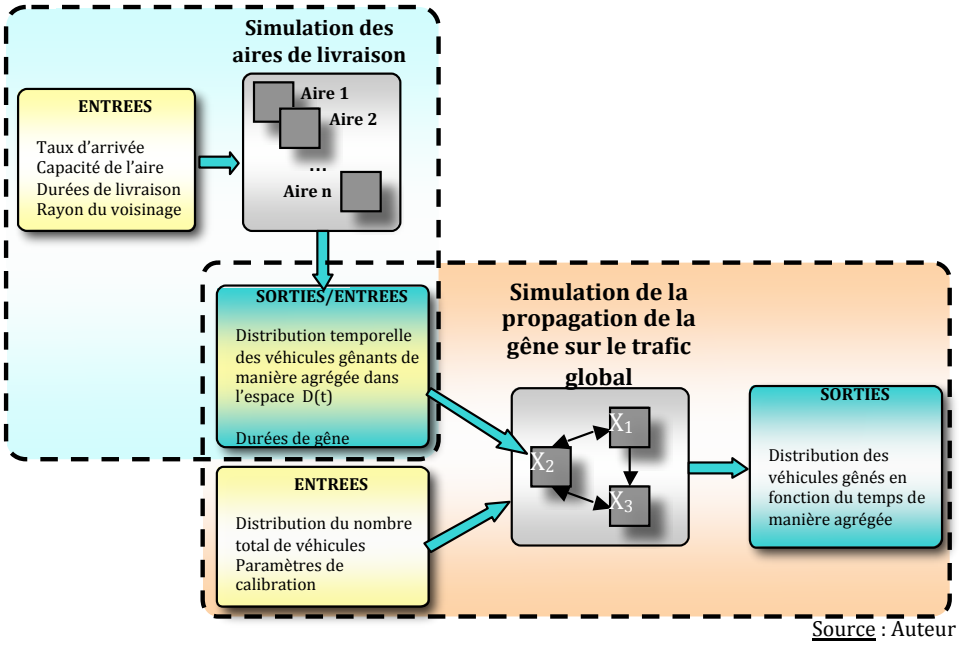


FIG. 4.35 – Lien entre les deux sous-modèles

La distribution agrégée des véhicules gênants en fonction du temps joue un rôle charnière entre les deux sous-modèles.

Ce développement sur une problématique particulière permet de construire un outil d'aide

à la décision à partir d'une approche de simulation CILOSA plus large. On peut ainsi imaginer d'autres développements possibles d'outils connectés entre eux, toujours à partir de CILOSA, pour traiter les problématiques telles que la mise en place d'un nouveau CDU, d'une nouvelle réglementation, ou encore la hausse progressive du prix des carburants.

4.5 L'utilité pour les collectivités locales

4.5.1 Un outil pour le diagnostic

L'outil présente un état existant du système sans modification du plan d'aires de livraison par l'utilisateur. Grâce à cette première étape, l'utilisateur peut se représenter une situation reflétant plus ou moins la réalité. L'utilisateur peut connaître les seuils acceptables concernant la répercussion du stationnement sur le trafic et la manière d'obtenir un équilibre entre la demande et l'offre en stationnement. Puis, cette compréhension va mener à la formalisation d'autres règles de fonctionnement du système et ainsi de suite. Les règles ainsi établies peuvent se généraliser, que ce soit dans l'espace (local ou global, rue, quartier, ville), dans les typologies d'activités ou dans les organisations logistiques. L'outil apporte une capacité supplémentaire aux collectivités locales d'obtenir un état des lieux géolocalisé, que l'on peut paramétrer et mettre à jour.

4.5.2 Un outil pour l'aide à la décision

Nous avons choisi de développer une méthodologie traditionnelle en cinq étapes, certaines liées à l'homme, d'autres prises en charge par l'outil (Figure 4.36).

Nous avons déjà vu comment le réglage des paramètres d'entrée du module 1 faisait appel à la connaissance d'experts (ingénieurs transports, service de voirie, etc.). Ils connaissent la localisation et les dimensions des aires de livraison dans la ville, la localisation des activités commerciales, associatives, de restauration et toute activité se faisant livrer, ainsi que les livraisons qu'elles génèrent (fréquences, horaires). Ils en déduisent les rayons de voisinage pertinents et les distributions du nombre de véhicules sur les jours de la semaine.

Moyennant la connaissance des données de trafic, l'outil de simulation DALSIM fournit ra-

pidement, pour toute configuration d'aires de livraison (localisations et capacités en nombres de véhicules de marchandises), la gêne occasionnée par les véhicules surnuméraires et ses répercussions en matière de circulation. Il est ainsi outil d'aide à la décision pour les collectivités locales soucieuses d'optimiser la livraison en ville.

L'humain intervient de nouveau dans le processus de décision. Au vu des résultats de la simulation, le décideur considèrera la gêne comme acceptable ou non, ce qui fera du plan en question un plan satisfaisant ou non.

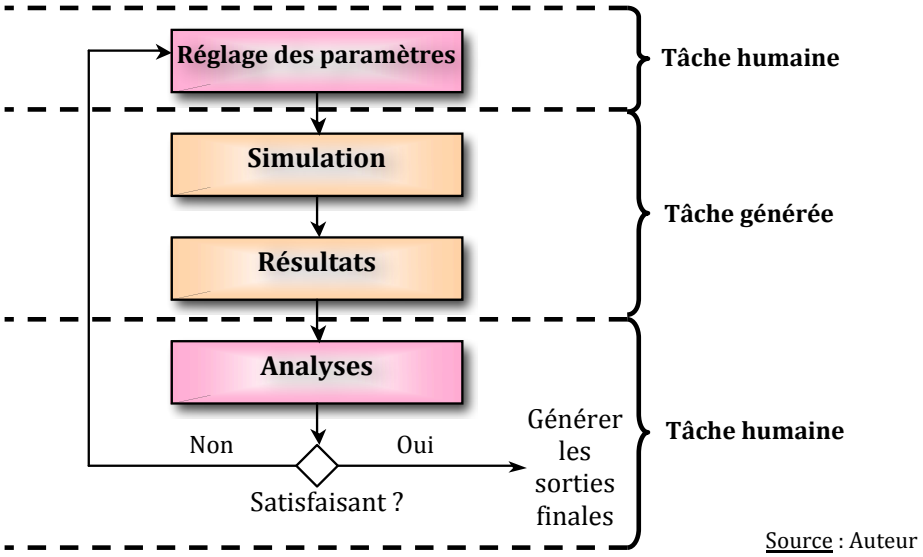


FIG. 4.36 – Méthodologie d'utilisation de l'outil

L'outil peut simuler autant de scénarios que de combinaisons possibles des différents paramètres, en particulier nombre, capacité et localisation des aires de livraison, rayon pertinent d'action et habitudes de livraison, durée moyenne de livraison (paramètre k_2). Ces scénarios peuvent alors être comparés par le biais des impacts négatifs sur la circulation globale, qui sont le résultat de la simulation et la décision sera prise sur la base d'un seuil d'acceptabilité de la gêne, lui-même modifiable par le décideur.

Disposant d'une vision globale de la stratégie de la ville au niveau transport, urbanisme, commercial, les collectivités locales peuvent décider en connaissance de cause, d'établir ou reconfigurer un plan d'aires de livraison. Cette décision est de l'ordre du remaniement de l'espace d'urbain et notamment de l'aménagement du territoire.

Cette décision fait l'objet d'une discussion entre les collectivités locales et les experts. Elle encadre les négociations avec les commerçants pour éviter que de nouveau des décisions d'implantation d'aires ne soient acceptées au coup par coup sans réelle justification.

Si, par contre, de nouvelles activités se développent dans certains secteurs de la ville, spontanément ou de manière volontariste, l'outil peut fonctionner de façon prospective, pour indiquer instantanément les besoins induits en aires de livraison.

Nous présentons dans le sixième chapitre l'application à la ville de La Rochelle du modèle que nous venons d'exposer.

4.5.3 Un outil formalisé pour la concertation et le dialogue

Le formalisme de l'outil permet une certaine réalité quant aux habitudes de livraisons. Il permet également de décrire le système selon des règles et des hypothèses qui forment un tout cohérent. L'apport de l'outil est aussi bien qualitatif que quantitatif ce qui permet le dialogue mais surtout la formalisation d'une décision de la part de l'élu local.

L'outil formalisé permet également d'établir une base rigoureuse sur laquelle des réflexions peuvent être faites, d'une part pour l'amélioration de la connaissance des liens entre les variables et cela rejoint l'idée d'outil pour comprendre (paragraphe 4.5.1) et d'autre part sur les résultats mêmes de l'outil. Ainsi, les décisions peuvent être prises en justifiant les choix de manière scientifique et dépendent d'un cadre rationnel. Mais ce n'est pas toujours le cas, les décisions ne sont pas uniquement prises sur des faits ou simulations rationnels, mais reposent aussi sur la stratégie des élus locaux et d'éventuelles confrontations politiques au sein d'une ville. Et alors, aucun outil, aussi réaliste soit-il, ne pourra apporter une quelconque valeur ajoutée pour la prise de décision.

Enfin, la discussion, élément clé pour trouver des compromis entre les acteurs, peut être formalisée grâce à l'outil et ainsi évite les dérives lors des débats, notamment entre les commerçants et la collectivité locale concernant les attributions d'aires de livraison à proximité de leurs magasins. Dans le cadre de rencontres avec les acteurs de la sphère économique, l'outil est devenu une médiation importante offrant l'avantage d'avoir une interface graphique pertinente et ludique. Il permet de montrer l'engagement des collectivités locales dans une démarche proactive et prospective.

4.5.4 Les limites de l'outil

Le premier module de l'outil est de nature stochastique et considère des données issues d'enquêtes. Le modèle peut représenter la réalité convenablement, compte tenu du caractère empirique de l'outil. D'ailleurs la validation de ce premier module sur la ville de La Rochelle (Cf chapitre 6) ne fait aucun doute sur sa capacité à représenter la réalité. Cependant, le deuxième module l'est beaucoup moins. En tout cas sa validation est d'autant plus délicate qu'il est quasiment impossible de vérifier les résultats de DALSIM. Ainsi, les efforts de validation de l'outil ne doivent pas se concentrer sur une validation de la capacité à représenter la réalité mais sur une validation de la méthodologie de modélisation.

De par sa composition, l'outil ne peut être réaliste. Les résultats liés au module de dynamique des systèmes, i.e. le module 2, ne doivent pas être pris pour argent comptant mais représentent une situation hypothétique. L'intérêt de quantifier cette irréalité vient lorsque plusieurs scénarios de plan d'aires de livraison sont simulés. En effet, les résultats donnent des situations hypothétiques et toujours aussi irréalistes puisqu'elles sont biaisées de par la modélisation utilisée. Mais leurs biais sont les mêmes, ainsi les comparaisons des scénarios deux à deux deviennent alors possibles et surtout ont un sens, c'est-à-dire que l'utilisateur peut être capable de trouver un scénario correspondant à un optimum local (à l'échelle de l'espace de recherche, il n'est pas certain que l'optimum trouvé soit un optimum local ou l'optimal).

Ensuite, l'irréalisme de l'outil vient de la considération des différents problèmes, notamment celui du chargement de véhicules qui est un problème NP-Difficile même si ce module n'a pas été utilisé dans le cas précis de la localisation et du dimensionnement des aires de livraison. Ce type de problème nous impose une certaine simplification de manière à avoir des temps de calcul raisonnables pour la simulation. Ainsi, nous avons montré dans [Delaître *et al.*, 2007b] puis dans [Delaître *et al.*, 2007c] qu'il était nécessaire de trouver un compromis dans la finesse des variables considérées dans ce problème. Les scénarios possibles pour le chargement de véhicules sont vite limités, et on se heurte rapidement à la complexité du problème nous obligeant à revoir le modèle de façon plus agrégée.

Enfin, le modèle ne suffit pas lors des débats. En revanche, il permet de proposer de nouvelles visions (même irréalistes) de scénarios qui seront des éléments de discussions entre les acteurs.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous développons une approche de simulation appelée CILOSA et un exemple de développement sur la problématique des aires de livraison.

L'approche CILOSA est constituée de trois modules successifs et communicants qui sont les modules de chargement, de routage et de stationnement des véhicules. Cette approche est basée principalement sur l'élaboration des scénarios pour la simulation (Pré-simulation), la simulation des scénarios par les flux de trafic via l'outil (Simulation), et l'évaluation des scénarios (Post-simulation). Elle est générique et rend possible le développement d'outils d'aide à la décision sur des problématiques données. Nous avons, pour cela, détaillé un outil composite de simulation issue de CILOSA, nommé DALSIM (Delivery Areas and Logistic SIMulation), qui est un outil de diagnostic et d'aide à la décision pour la mise en œuvre d'un plan de localisation et de dimensionnement des aires de livraison au profit des autorités locales. L'outil est composite car il utilise deux types d'approches de modélisation qui sont les files d'attente de la Recherche Opérationnelle et la Dynamique des Systèmes. L'outil est capable de simuler des scénarios de répartition d'aires de livraison d'une ville et d'en évaluer les impacts sur les flux globaux de circulation. L'outil décrit ne permet pas de trouver le meilleur schéma d'aires de livraison dans une ville, mais simule l'effet de tout complément ou suppression d'une aire sur l'ensemble des flux de circulation et donne un aperçu rapide et efficace de l'ensemble du système car il se limite à la simulation globale du trafic de circulation sans détail spatial.

Ce chapitre permet de poser les bases théoriques de l'approche de simulation que nous validons par un cas d'application dans le chapitre 6, où DALSIM est utilisé sur l'agglomération de La Rochelle et où nous analysons la confrontation des résultats de l'outil et la réalité constatée. Puis, nous verrons l'utilité concrète au sein des services techniques de l'agglomération de Poitiers d'un outil pour le diagnostic et l'optimisation de la localisation et du dimensionnement des aires de livraisons.

Enfin, comme l'approche de simulation CILOSA est large et permet la construction d'un grand nombre d'outils répondants à des problématiques spécifiques, il convient d'identifier celle qu'il s'agira de traiter et d'en associer une description de l'outil par une méthode de mise en œuvre afin d'assurer le caractère opérationnel dans les réflexions des acteurs concernés. Nous expliquons cette méthode dans le chapitre suivant qui comporte deux aspects : une formalisation théorique de la méthode de mise en œuvre d'une manière générale qui se décompose

en plusieurs étapes et une application concrète sur la Communauté d'Agglomération de La Rochelle pour obtenir un retour d'expériences des acteurs.

Chapitre 5

Méthodologie de mise en œuvre

Sommaire

5.1 Introduction **163**

5.2 Définition des objectifs **163**

5.2.1 Les Groupes Cible 164

5.2.2 L'identification des attentes 165

5.2.3 Définition des objectifs 166

5.3 Caractérisation de la ville pour le TMV **167**

5.4 Conception globale et solutions **167**

5.4.1 Conception globale 168

5.4.2 Évaluation des solutions 169

5.5 Position de la démarche **170**

5.6 Réactions et motivations des acteurs **171**

5.6.1 Les transporteurs 173

5.6.2 Les commerçants du centre-ville 174

5.6.3 Les artisans du BTP 174

5.6.4 Les négoces du BTP 175

5.6.5 Les « Cafés Hôtels Restaurants » 176

5.6.6 Les acteurs du Port autonome de La Rochelle 176

5.6.7 Les acteurs liés aux déchetteries 176

5.6.8 Les commerçants en dehors du centre-ville 177

5.6.9 Les artisans hors BTP 177
5.6.10 Les acteurs de la Presse 177
5.6.11 Les habitants 178
5.6.12 La collectivité locale 178
5.7 Conclusion 179

5.1 Introduction

De manière générale un projet visant l'amélioration du TMV comporte trois phases :

- définition du cadre de travail : les objectifs de la collectivité au niveau global par rapport à l'ensemble des mobilités ;
- organisation et conception ;
- mise en œuvre.

Notre démarche concerne la deuxième phase via l'utilisation de modèles pour l'évaluation des solutions. Elle se décompose en quatre étapes dont le schéma de principe est présenté dans la Figure 5.1. La première est la définition des objectifs. Il s'agit d'abord d'expliciter les besoins des groupes cible et d'analyser leurs convergences pour en tirer des synergies et leurs divergences pour identifier les conflits d'intérêt et déterminer les objectifs des actions à entreprendre. La deuxième étape concerne la caractérisation de la ville pour définir un cadre de travail. La troisième est la recherche et la conception de solutions dans une approche globale i.e. en prenant en compte l'analyse des besoins de l'ensemble des groupes cible. Enfin, la quatrième étape révèle le plan ou le schéma directeur dans lequel s'inscrivent toutes les solutions à mettre en œuvre. Nous ne décrirons pas cette dernière étape car sa mise en œuvre demeure très classique.

Ce chapitre est constitué de cinq parties. Les trois premières parties détaillent la méthode de mise en œuvre d'une approche globale pour l'optimisation du TMV, à savoir la définition des objectifs, la caractérisation de la ville pour le TMV et la conception globale des solutions.

La quatrième partie précise la position de cette approche globale du TMV par rapport aux approches existantes.

Enfin, la cinquième partie établit un retour d'expérience de l'approche globale proposée sur un cas concret, celui de La Rochelle, en explicitant la réaction et la motivation des acteurs.

5.2 Définition des objectifs

Cette étape se divise en trois phases : la définition des groupes cible, l'identification de leurs besoins et attentes et la définition des objectifs.

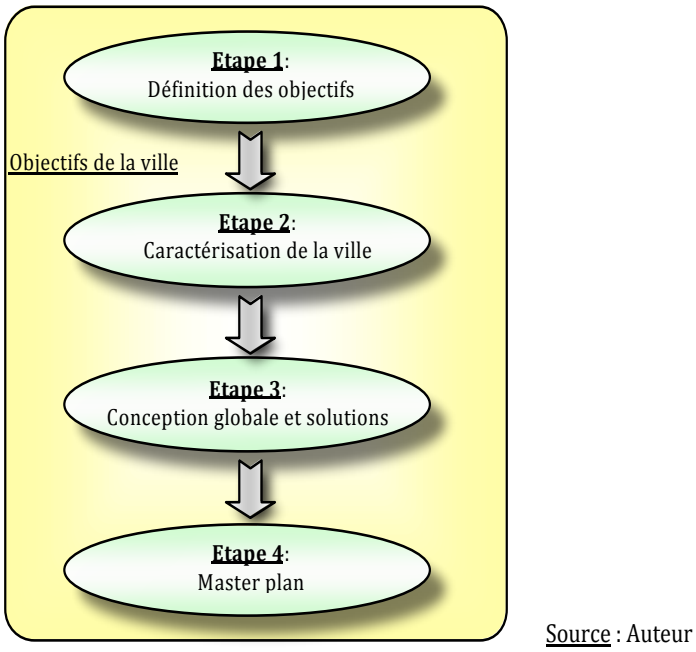


FIG. 5.1 – Schéma de principe de la méthode de mise en œuvre

5.2.1 Les Groupes Cible

Dans chaque ville la répartition des secteurs d'activité est différente. Mais à l'intérieur même d'un secteur d'activité, les acteurs ont sensiblement le même comportement, bien qu'il puisse être différent d'une ville à l'autre.

La définition des groupes cible est faite dans un premier temps en divisant les acteurs en plusieurs groupes (puis sous-groupes) correspondants aux principaux acteurs : les transporteurs, les professionnels, les particuliers, les collectivités, les acteurs externes (comme les donneurs d'ordre par exemple). Chaque groupe est lui-même composé de sous-groupes ; l'importance et le poids de ces sous-groupes vis-à-vis du TMV sont ensuite examinés avec l'aide des représentants de l'activité. Cela permet de caractériser le comportement global et d'estimer les flux de marchandises de chacun et par la suite de les hiérarchiser pour des groupes d'acteurs qui ont sensiblement le même type de contraintes, de problèmes et d'objectifs.

Cette étape doit hiérarchiser les acteurs du TMV. Il vient une structure en cascade dont un exemple est donnée par la Figure 5.2.

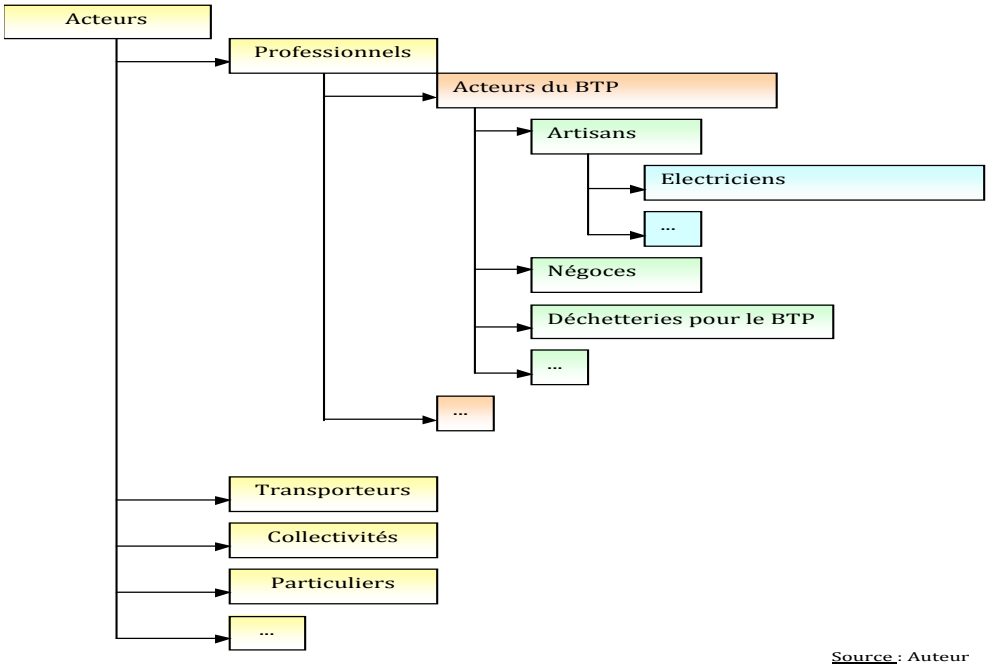


FIG. 5.2 – Exemple de structure de hiérarchisation des acteurs

Les groupes cible sont représentés par les feuilles terminales de l'arbre, il convient à l'utilisateur de préciser le degré de finesse de l'arborescence.

5.2.2 L'identification des attentes

Plusieurs méthodes sont envisageables pour connaître les contraintes, les besoins et les attentes des secteurs d'activité. Tout dépend des pratiques de chaque groupe cible, mais il faut toujours être préoccupé par l'impact de la démarche auprès des membres de ces groupes. En effet, le principal objectif, outre de connaître le comportement, est d'instaurer la motivation dans le cadre des améliorations envisagées. C'est pourquoi, il est nécessaire d'adapter ce recueil de données aux habitudes de chaque profession et acteur plutôt que d'imposer une démarche impersonnelle.

Par exemple, l'utilisation de questionnaires peut se révéler intéressante si elle est accompagnée d'autres actions permettant de sensibiliser les personnes interviewées aux objectifs globaux de la démarche.

Dans notre approche locale, nous avons utilisé plusieurs vecteurs pour recueillir ces attentes, depuis l'entretien avec des responsables de syndicats professionnels et d'acteurs représentatifs jusqu'aux questionnaires suivis de réunions de travail sur les voies d'amélioration, en passant par la connaissance des codes postaux des clients de grandes surfaces.

Cet ensemble conduit à une cartographie des attentes, des contraintes, qui permet de définir des priorités entre les problèmes rencontrés par les acteurs. Cela permet également de faire prendre conscience à ces mêmes acteurs des préoccupations des autres groupes cible, et de commencer à mettre en œuvre une compréhension globale des problématiques par l'ensemble des parties prenantes.

5.2.3 Définition des objectifs

Parallèlement aux activités précédentes, il convient aussi de déterminer les objectifs de la démarche entreprise, les faire coïncider avec ceux des autorités responsables du transport ; il faut pouvoir intégrer les futures améliorations dans les stratégies du développement urbain, en particulier celles liées à la mobilité.

Ces objectifs doivent répondre au moins aux six suivants :

- **simple** : compris de tous et sans ambiguïté ;
- **mesurable** : à tout moment, il est possible de connaître de manière quantifiée la distance entre une situation et la cible fixée ;
- **atteignable** : il faut mettre en œuvre les moyens nécessaires pour atteindre les objectifs ;
- **réaliste** : la cible à atteindre ne doit pas être une utopie. Dire que la logistique en ville sera entièrement assurée par une flotte de véhicules non polluants à l'horizon 2010 est un rêve ;
- **temporel** : chaque objectif est dispersé dans le temps. Pour une date donnée, l'objectif doit être atteint, ce qui motive les acteurs ou exerce une pression mais qui, de manière générale, doit accroître la productivité ;
- **respectueux** : les objectifs ne doivent en aucun cas porter atteinte aux acteurs impliqués.

Cette phase permet d'établir une liste d'évaluation, avec des critères pondérés, afin de juger et de comparer les futures solutions. Les grandes familles de critères portent généralement sur les performances vis-à-vis des objectifs et des contraintes, les aspects humains, les coûts et délais de mise en œuvre, les choix techniques,...

5.3 Caractérisation de la ville pour le TMV

Une fois les objectifs déterminés, il s'agit de confronter différentes solutions. Cependant, étant donné le nombre important d'innovations pour le fret urbain, la considération de toutes les solutions possibles n'est pas envisageable, et surtout n'est pas pertinente. Cette étape permet de sélectionner les pistes de solutions potentiellement efficaces dans une ville. Ainsi, en fonction des caractéristiques de la ville, il y a des solutions qui ne pourront être mises en place, d'autres ne seront pas efficaces ou au contraire se révéleront adéquates au contexte. Dans la méthode de mise en œuvre, nous utilisons la méthodologie de caractérisation d'une ville, expliquée dans le chapitre 4. Il s'agit de construire une base de connaissances des solutions existantes, i.e. faire un benchmark des leviers possibles. Puis, la ville doit être caractérisée selon ses spécificités urbaines, c'est-à-dire identifier la distribution des activités et des équipements pour en déduire la notion de désordre du système. Les données nécessaires que sont la localisation des activités et des ELU sur un plan, le nombre d'employés pour chaque activité, sont, en partie, assez simples à trouver en tout cas en France, puisque le fichier Sirene (fichier de l'INSEE) liste chaque activité et son nombre d'employés. On peut noter que la CCI (Chambre de Commerces et d'Industries) peut fournir un document similaire. En revanche, les données localisant les ELU et les activités présagent de longues et coûteuses enquêtes si la collectivité locale ne dispose pas d'un Système d'Information Géographique (SIG). La Rochelle (et Poitiers) disposent d'un tel système ce qui a évidemment facilité la tâche, mais les aires de livraisons de la Rochelle n'étaient répertoriées dans aucun service. En conséquence, il a fallu, in fine, déterminer la présence et la position des aires de livraisons à La Rochelle par des enquêtes sur le terrain. Enfin, il convient de placer la ville dans l'espace de caractérisation pour proposer, à partir de la base de connaissances, les solutions potentiellement efficaces.

5.4 Conception globale et solutions

Cette étape se décompose en deux phases :

- la conception globale qui a pour objectif d'assurer la cohérence entre toutes les actions ;
- la définition détaillée des solutions qui conduit à une première estimation de planning et de coût.

5.4.1 Conception globale

La recherche d'une conception globale a pour objectif de s'assurer de la cohérence entre toutes les pistes d'amélioration, pour que les actions menées ne soient pas en conflit.

L'outil, décrit dans la Figure 5.3, permet d'identifier rapidement la cohérence lors de combinaisons d'actions : un tableau à deux entrées, une listant les besoins à satisfaire et les objectifs globaux des autorités locales, l'autre les actions à mener. Puis, à l'intersection d'un besoin/objectif et d'une action, nous plaçons un signe « + » signifiant que l'action est adaptée, un signe « - » dans le cas contraire ou « 0 » si indifférent. Une action sera adaptée aux besoins recueillis et aux objectifs des autorités si dans la ligne correspondante, il n'apparaît que des signes « + ».

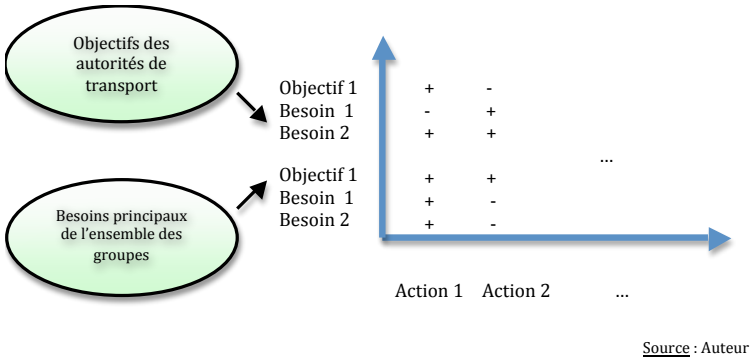


FIG. 5.3 – Tableau à double entrée pour la cohérence des actions

Nous illustrons avec l'exemple de La Rochelle (Figure 5.4) où nous utilisons ce type d'outil pour les principales actions retenues : livrer par ELCIDIS (étendre les activités de la plateforme), changer les flottes de véhicules pour des motorisations hybrides et le développement du système d'information aux usagers. Nous avons fait le choix de sélectionner les besoins et les objectifs qui semblaient les plus pertinents pour notre étude car énoncer tous les besoins n'a pas d'intérêt particulier, par conséquent nous nous concentrons sur les plus redondants.

Ce genre d'outil permet d'obtenir une vision claire de la cohérence de chaque action vis-à-vis des différents besoins et objectifs. Il semble que le développement des activités de la plateforme ELCIDIS soit la plus cohérente pour La Rochelle. Il faut toutefois rester vigilant puisque cette action est susceptible d'englober d'autres actions qui, elles, peuvent ne pas être cohérentes pour l'ensemble du système. C'est le cas notamment de la déconsolidation des livraisons qui entraîne

	Etendre les activités d'Elcidis	Véhicules hybrides	Système d'information
*Rénover les habitations au dessus des commerces du CV	+	-	+
*Accroitre la qualité de vie dans le CV	+	+	-
*Besoins en stationnement	+	-	-
*Plage horaire de livraison plus large	+	-	+
*Avoir des lieux de stockage sécurisés	+	-	-

Source : Auteur

FIG. 5.4 – Cohérence des actions à La Rochelle

plus de trajets, plus de congestion et par conséquent une dégradation de la qualité de vie.

5.4.2 Évaluation des solutions

Cette phase comprend l'identification, la définition et l'évaluation des gains potentiels des solutions. L'identification des solutions est basée sur l'existant et une approche théorique, mais le pragmatisme doit primer. Ainsi, les meilleures expériences existantes (par exemple BESTUFS) fournissent une base de départ. L'adaptation des solutions est parfois nécessaire en fonction des besoins à satisfaire. Les solutions ont pour objectif de répondre aux besoins les plus exprimés (hiérarchisation), par conséquent les innovations ne sont pas indispensables.

Les solutions sont ensuite établies et définies avec les groupes cible intéressés pour qu'elles correspondent vraiment aux attentes des acteurs. La définition des solutions repose sur :

- la description des tâches de mise en œuvre des solutions : nature, objectifs, contenu, durée, coûts, contraintes d'antécédence ;
- la description des étapes transitoires, des points et critères de révision du plan directeur ;
- la planification des ressources requises et des investissements à effectuer.

Puis, il s'agit d'obtenir une première estimation des gains potentiels de la mise en place des solutions. Le but d'estimer les gains potentiels est d'identifier parmi une liste de solutions possibles, la ou les meilleures. Il est alors possible de procéder de deux manières différentes : élaborer une méthodologie d'évaluation des solutions ou construire un modèle de simulation.

Nous avons proposé dans [Awasthi et Delaître, 2008], une méthodologie pour sélectionner

les meilleures solutions pour le fret urbain selon des critères prédéfinis. Basée sur la méthode AHP (Analytical Hierarchy Process), bien connue en théorie de la décision, la méthodologie assimile l'avis d'experts de plusieurs domaines (plus le nombre de domaines couverts est important, plus l'évaluation tient compte des dimensions du TMV) et est articulée autour des étapes suivantes :

- pondération des critères par les experts, deux à deux ;
- pondération des solutions pour chaque critère, deux à deux ;
- calcul de la note de chaque solution en fonction des deux précédentes pondérations ;
- classement des solutions par ordre décroissant de note.

Cette technique permet de représenter chaque solution par une note. Il est alors aisé de choisir la solution dont la note est la plus élevée.

Ces travaux sont issus d'une collaboration et par conséquent ne sont pas totalement développés pour cette thèse. Nous invitons le lecteur à consulter l'article [Awasthi et Delaître, 2008] pour plus de détails scientifiques et sur le cas appliqué de La Rochelle.

Cette étape conduit à préciser, pour chaque solution, les risques et les enjeux (techniques et économiques), les améliorations et performances, l'enveloppe budgétaire liée aux investissements, les gains potentiels (qualitatifs ou quantitatifs) notamment en utilisant CILOSA ou un des outils cités dans le paragraphe précédent.

5.5 Position de la démarche

Cette démarche est innovante dans le sens où nous proposons un mode d'emploi s'adressant aux collectivités locales pour améliorer l'image globale de la ville [Delaître *et al.*, 2007e]. Elle implique différents types d'acteurs : les opérateurs de transport, les habitants, les détenteurs de fret et les institutionnels en tant qu'acteurs internes du système. Mais il existe évidemment des acteurs qualifiés d' « externes », comme nous-mêmes qui proposons cette démarche. Ingénieurs, chercheurs de bureaux d'étude et chercheurs universitaires font partie de ces acteurs.

La complexité du domaine vient certes du fait qu'il est riche en typologie d'acteurs interagissant entre eux, qu'il est gouverné par les rétroactions et les délais de réactions, mais elle vient aussi du fait de la pluralité de visions possibles du système. Les collectivités locales ne voient pas le TMV de la même manière que les opérateurs de transports qui eux-mêmes auront

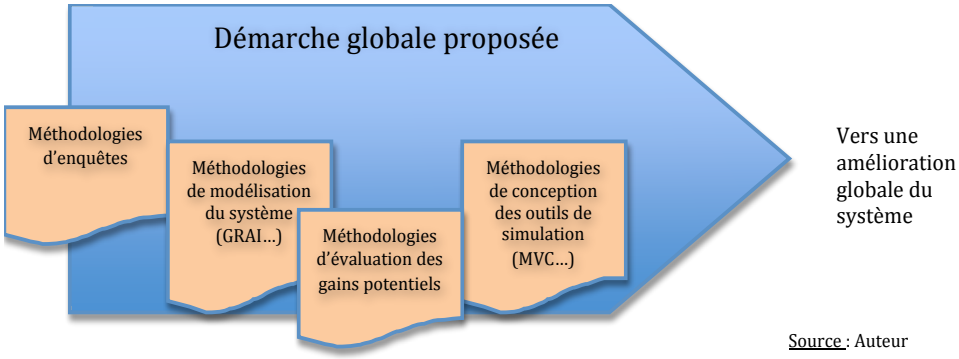


FIG. 5.5 – Position de la démarche proposée

une vision différente des détenteurs de fret...etc. Le principal rôle des acteurs externes est de lier les acteurs de la sphère économique (transporteurs, etc.) et les acteurs de la sphère urbaine (collectivité, habitants, etc.). L'expérience menée à La Rochelle dans le cadre du projet européen SUCCESS du programme CIVITAS, [2005] montre que les nombreuses interviews et réunions de travail avec les différentes parties prenantes permettent, d'abord, de saisir la différence des problématiques et surtout d'instaurer un climat de communication via les acteurs externes ce qui confirme l'utilité de la modélisation pour les débats.

Aujourd'hui, chaque acteur travaille sur différentes problématiques dont quelques exemples sont répertoriés dans le Tableau 5.1. Même s'il peut exister quelques exceptions, nous avons dégagé des tendances et associé les problématiques étudiées pour chaque type d'acteur.

La démarche entreprise est issue d'un projet européen, par conséquent, elle diffère par son mode de conception. Considérant le contexte actuel au niveau national et les problématiques exposées, notre démarche est transversale i.e. toutes les problématiques citées peuvent être abordées. Elle constitue en ce sens une méta-méthodologie, un fil conducteur dans lequel d'autres méthodologies (connues et à ce jour développées) viendraient détailler l'approche comme le montre la Figure 5.5.

5.6 Réactions et motivations des acteurs

La méthode de mise en œuvre décrite dans ce chapitre permet de structurer la recherche des données, de connaître les indicateurs déjà utilisés par les acteurs du TMV. Ainsi, à La Rochelle,

Acteurs	**Problématiques traitées**
Transporteurs	– Problèmes de tournées de véhicules : chargement des véhicules et routage des véhicules (DHL, Transport Genty, Dussolier, etc).
Industriels autres que transporteurs	– Conception de nouveaux véhicules adaptés aux milieux urbains (ex : le cyclotron par Formes & Volutions, les véhicules électriques et hybrides PSA, triporteurs etc). – Conception de logiciels pour l'optimisation des tournées de véhicules (Paragon Sofware Systems, ACXIOM France, INOVIA, etc).
Chercheurs et Ingénieurs de recherche	– Problématiques de modélisation des impacts (École d'Ingénieurs en génie des Systèmes Industriels [EIGSI], École Nationale des Ponts et Chaussées, National Technical University of Athens), la modélisation des flux (Les Universités de Cergy-Pontoise, de Leeds, Méditerranéenne et de Reggio Calabria, Laboratoire d'Économie des Transports [LET]) et conception d'autres outils que ce soit pour les transporteurs, comme les logiciels d'optimisation de tournées par contraintes (Université de Kyoto et de Melbourne, Institut Polytechnique de Calunya), que pour les collectivités, comme les outils d'aide à la décision pour la mise en place de politiques de circulation (LET) ou/et de solutions (Université Technique de Delft, EIGSI, Mines ParisTech). – Méthodologie d'optimisation du TMV (EIGSI, Mines ParisTech, Université technique de Delft). – Problématiques juridiques du TMV (Institut National de REcherche sur les Transports et leur Sécurité [INRETS]).
Bureaux d'études	– Collecte de données et évaluation des impacts environnementaux (Interface Transport, ACT Consultant). – Etude de cas spécifiques (Interface Transport, STRATEC, TRANSITEC...).
Organismes publics et privés	– Expériences d'amélioration (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, Groupement des Autorités Responsables de Transport, ville comme la Communauté d'Agglomérations de la Rochelle...). – Études de cas spécifiques (Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques).

TAB. 5.1 – Acteurs et problématiques traitées

nous avons établi les groupes cible suivants :

- les transporteurs ;
- les commerçants du centre-ville ;
- les artisans du BTP ;
- les négoces du BTP ;
- les « Cafés Hôtels Restaurants » ;
- les acteurs du Port autonome de La Rochelle ;
- les acteurs liés aux déchetteries ;
- les commerçants en dehors du centre-ville ;
- les artisans hors BTP ;
- les acteurs de la Presse (Tabac...).

La liste est classée dans l'ordre de volume de marchandises transportées décroissant. Les groupes sont établis en fonction de leurs comportements semblables et par conséquent souvent liés à un même type d'activité.

Afin d'identifier les dynamiques de chacun des groupes de la sphère économique, il a été nécessaire de les rencontrer et de partager les connaissances. Ainsi, plusieurs modes de rencontre ont été utilisés pour que nos pratiques restent familières au sein de chaque groupe. Nous détaillons dans un paragraphe dédié les enquêtes et interviews menées pour chaque groupe cible et leur motivation pour améliorer le TMV à La Rochelle. Enfin, nous terminerons par le point de vue des acteurs de la sphère urbaine que sont la collectivité et les habitants.

5.6.1 Les transporteurs

Ce groupe, de loin le plus convoité pour améliorer le TMV, n'a pas fait l'objet d'enquêtes approfondies. La raison est simple. Depuis 2006, le CDU ELCIDIS est relégué par une DSP (Délégation de Service Public), mettant ainsi tous les transporteurs locaux dans une position délicate, car ELCIDIS est passé de plateforme d'utilité publique à une véritable exploitation "business" et donc en concurrence avec les transporteurs locaux. Le changement de gestionnaire ne s'est pas déroulé sans encombres, obligeant ainsi Comox (l'actuel prestataire de la plateforme) à développer une véritable stratégie commerciale et marketing puisque les anciens clients d'ELCIDIS demeurent des clients de l'ancien prestataire de la plateforme. Une première volonté de la CdA de La Rochelle a été de laisser la plateforme devenir autonome sur un plan comptable,

i.e. retrouver un niveau de clientèle permanente. Ainsi le démarchage des transporteurs a été fortement perturbé puisque les personnes avançant sur le sujet ELCIDIS étaient prioritaires.

Il existe une deuxième raison justifiant cette passivité vis-à-vis des transporteurs. Le projet SUCCESS, largement développé dans le chapitre 6, a pour but de favoriser des axes d'amélioration du TMV autres que la plateforme ELCIDIS elle-même, les améliorations possibles du TMV pour le groupe transporteurs sont donc uniquement gérées par ELCIDIS et ne rentrent pas dans le projet.

5.6.2 Les commerçants du centre-ville

Les commerçants du centre-ville ont été approchés d'une manière traditionnelle via des questionnaires par l'intermédiaire du coordinateur et représentant de l'association des commerces en centre-ville (hors hôtels, cafés et restaurants) nommée Le Commerce Rochelais. Le nombre d'adhérents est initialement peu important, de l'ordre de 200, il faut ensuite ajouter un taux de réponse très faible (7.5%). L'analyse statistique est par conséquent difficile à apprécier tant l'échantillon est peu représentatif. Il semble que la méthode d'approche n'ait pas été la bonne ou que l'intérêt des commerçants pour améliorer la logistique urbaine soit marginal ou encore qu'ils n'y croient pas. Pourtant, nous avons suivi la méthodologie de recueil de données établie par le LET, qui a largement fait ses preuves. Nous mettons donc en cause la motivation des commerçants qui n'a pas été à la hauteur des enjeux sous-jacents.

5.6.3 Les artisans du BTP

Les artisans du BTP qui travaillent dans le secteur de La Rochelle recouvrent un tissu de métiers très variés allant de la menuiserie au gros œuvre en passant par le génie électrique. Pour appréhender les flux de ce groupe, nous avons fait le choix d'impliquer directement la CAPEB (Confédération de l'Artisanat et des Petites Entreprises de Bâtiment) dont le président est très préoccupé par les questions environnementales et l'aspect durable des déplacements des artisans. Par conséquent, l'impact sur les artisans adhérents a été important tant sur le plan de leur motivation que sur celui de leur implication dans le développement de solutions nouvelles pour les flux du BTP. Nous avons rédigé un rapport d'étude à ce propos [Roque *et al.*, 2007] décrivant la dynamique qui anime le comportement des artisans du BTP, leur motivation et les

actions possibles à mettre en œuvre. Deux axes d'amélioration ont été dégagés :

- opter pour le changement de la flotte de véhicules par des véhicules dits « propres » ;
- rationaliser les flux en proposant une surface de stockage à proximité du centre-ville pour diminuer le nombre de déplacements.

Ainsi, seul le deuxième point a été retenu puisqu'il n'existe pas à l'heure actuelle de véhicule propre et homologué correspondant aux besoins de l'artisanat du BTP. La surface de stockage est fournie par la plateforme ELCIDIS et les artisans peuvent transporter leurs marchandises en utilisant les berlingots électriques de la flotte Liselec (dont l'opérateur est également celui d'ELCIDIS). De plus, un système de carte artisan devrait être mis en place pour faliciter le stationnement dans le coeur historique de La Rochelle, décrit comme trop contraignant pour les activités artisanales.

5.6.4 Les négoces du BTP

Les interviews menées ont été assez facilement exécutées puisqu'il existe un nombre relativement faible de ces acteurs (ils sont au nombre de trois : BigMat, PointP et Thébault). Cependant cette quantité limitée d'acteurs véhicule un volume conséquent de marchandises, de l'ordre de onze semi-remorques par semaine en moyenne. Les difficultés rencontrées sont clairement identifiées chez BigMat : des difficultés de circulation à Beaulieu (selon les horaires étant donnée la présence d'un hypermarché), des pannes de camion (il leur arrive de louer un camion), des clients absents pour recevoir la marchandise et des problèmes de vol sur les chantiers. Chez PointP, les difficultés consistent aussi à trouver du personnel qualifié pour manier les grues spécialisées des camions. Enfin, Thébault n'a pas déclaré de problèmes particuliers, ce qui est très surprenant puisque cette entreprise déplace aussi du gros œuvre qui implique des véhicules encombrants et très peu maniables pour les opérations de stationnement.

De manière générale, les négoces du BTP n'ont pas suscité d'intérêt particulier quant à la mise en place d'actions pour l'amélioration du TMV à La Rochelle. Les spécificités des véhicules utilisés comme les grues et les volumes transportés obligent les négoces à posséder une flotte de véhicules qui sont de surcroît particuliers. Enfin, les conditions de circulation, étant relativement peu contraignantes à La Rochelle, et un milieu où la concurrence est particulièrement importante (du au faible nombre d'acteurs) ne favorisent pas les formations de partenariat entre eux (comme le partage de la flotte de véhicule ou des entrepôts).

5.6.5 Les « Cafés Hôtels Restaurants »

Ce groupe a été appréhendé lors de réunions de club d'entreprises par questionnaires administrés. Là encore, le faible taux de participation aux réunions n'a pas permis une analyse statistique fiable et représentative. De plus, nous avons été accueilli de manière peu courtoise en nous assimilant aux problèmes de discussions entre ce groupe d'acteurs et la collectivité. Par conséquent, les habitudes en termes de déplacements de marchandises sont peu ou ne sont pas connues et le peu d'acteurs présents a immédiatement été réfractaire à toute proposition de notre part.

5.6.6 Les acteurs du Port autonome de La Rochelle

Les mareyeurs approvisionnent les hôtels et les restaurants de La Rochelle et représentent environ 20000 tonnes de poissons par an qui transitent ainsi à la criée. Les pics se produisent durant l'été et le reste de l'année ne représente que 4000 tonnes. Les flux de marchandises ne posent aucun problème parce que le port est réglementé et les zones de chargement et déchargement sont spécifiques aux transporteurs. Les mareyeurs n'ont pas d'intérêt particulier à changer leur mode de fonctionnement, en revanche les hôtels et activités de restauration possédant un véhicule pour s'approvisionner sont des cibles potentielles pour une optimisation des tournées, chaque trajet étant réalisé en trace directe. La déception est relative puisque que les flux à destination de la ville sont minoritaires par rapport à l'ensemble des flux du port dont la quasi totalité concerne des véhicules gros porteurs effectuant ainsi de longues distances (transport régional, voire inter-régional).

5.6.7 Les acteurs liés aux déchetteries

La CdA a une triple responsabilité : la collecte, le traitement et la valorisation des déchets ménagers. II existe douze déchetteries, accessibles uniquement aux particuliers dans lesquelles les artisans ont interdiction de déposer leurs déchets. Les seuls qui leur sont autorisés sont les gravats (déchets inertes) qui peuvent être confiés à la déchetterie de La Palice. Les artisans doivent donc laisser leurs déchets aux déchetteries privées : Tri 17 (Coved) à Salles-sur-Mer, Onyx à Aytré, Nicolin ou ISS environnement.

Le sujet des déchets est délicat puisque les acteurs privés et la collectivité semblent ne pas se comprendre. L'implication des acteurs s'en ressent, il devient alors difficile de proposer des pistes d'amélioration lorsque le fonctionnement interne ne semble pas être cohérent.

5.6.8 Les commerçants en dehors du centre-ville

Ce groupe constitue en quelque sorte le reste des acteurs de la sphère économique. Beaucoup de disparités entre les structures des bâtiments en terme de surface ou nombre d'employés, les localisations (périphérie...) font qu'il devient difficile de remarquer une quelconque habitude selon un profil particulier. Cependant, le fait de se situer en marge du centre-ville constitue un atout considérable pour les opérations de livraison. En effet, la plupart des commerces ont un quai dédié au chargement ou déchargement des marchandises et font appel le plus souvent à des transporteurs. Les axes d'amélioration pour ce groupe sont donc intimement liés aux habitudes des transporteurs.

5.6.9 Les artisans hors BTP

Plusieurs corps de métiers sont inclus dans ce groupe cible comme les artisans de l'alimentation : les boulangers-pâtissiers, les charcutiers et bouchers. Les problèmes d'hygiène sont leurs principales inquiétudes, ce qui entraîne de plus en plus fréquemment la mise en place de normes et donc de contraintes. Par exemple, l'étiquetage des produits finis avec les différents numéros de lot des produits utilisés est contraignant dans les domaines de la restauration, la charcuterie et la pâtisserie. Aussi, certains boulangers et pâtissiers ne possèdent toujours pas de camions correspondant aux normes pour effectuer leurs tournées de livraison.

5.6.10 Les acteurs de la Presse

Les acteurs de la Presse concernent tout diffuseur de revue et vendeur de tabac. Ces acteurs ont été rencontrés via la délégation départementale de l'union nationale des diffuseurs de presse. Le transport de la presse est vraiment particulier et s'appuie principalement sur trois décrets reposant eux-mêmes sur :

– **la liberté de diffusion** : l'article 1er de la loi Bichet stipule que les éditeurs peuvent choi-

sir un ou plusieurs modes de distribution : la vente au numéro, l'abonnement ou le portage. Ils peuvent également choisir de distribuer leurs titres par leurs propres moyens, ou adhérer à une société coopérative.

- **l'égalité entre les éditeurs** : l'article 2 précise que le système coopératif doit garantir une égalité de traitement et de distribution entre tous les éditeurs. A l'intérieur d'une coopérative, les décisions sont prises selon le principe : un éditeur = une voix. Les petits éditeurs peuvent bénéficier des mêmes services que les gros éditeurs.
- **l'impartialité de la distribution** : une coopérative de messagerie ne peut refuser l'adhésion d'un éditeur, quels que soient la nature et le contenu de ses publications (article 6). La seule exception retenue concerne les titres à caractère pornographique.

De manière générale, les diffuseurs sont livrés entre 5h30 et 8h le matin. Le tabac est livré tous les quatorze jours et parfois tous les sept jours (camions suivis par satellite) et la loterie tous les sept jours. Il existe deux sociétés principales de messagerie pour la presse : NMPP (Nouvelles Messageries de la Presse Parisienne) et MLP (Messageries Lyonnaises de Presse). Cependant, le fonctionnement en sas fermé pour les opérations de livraison peut offrir une possibilité de rationalisation des flux mais la surveillance du tabac oblige une certaine confidentialité sur les routes et les informations ne pourront être diffusées, ainsi les acteurs y ont vu un frein essentiel à l'amélioration du TMV pour ce qui concerne leur secteur.

5.6.11 Les habitants

Les habitants de La Rochelle ont été divisés en six groupes : les étudiants, les salariés, les professions libérales, les sans-activités professionnelles, les retraités et les autres. Dans ce cas précis, les études ont été menées grâce à des questionnaires administrés décelant ainsi certaines dynamiques de déplacements de marchandises chez le particulier. Les habitants de La Rochelle sont à 98% favorable à l'amélioration du TMV mais aucun n'accepterait que ces améliorations gonflent les factures des produits, un constat finalement traditionnel.

5.6.12 La collectivité locale

Ce groupe a été abordé lors de plusieurs interviews des responsables de services de la CdA de La Rochelle à savoir : transport et mobilité, stationnement et voirie. Le premier service est concerné par les questions de TMV et est à l'origine de la proposition de plusieurs projets sur

ce thème à l'échelle européenne, les objectifs sont clairement identifiés.

Le service voirie a été interviewé par l'intermédiaire de son responsable. La tâche de ce service pour le TMV est de calibrer les aires de livraisons, accorder (souvent aux artisans) les arrêtés pour un stationnement exceptionnel. Les problèmes de circulation liés aux travaux de voirie sont rendus public sur un site Internet.

Le service stationnement est actuellement en cours de réflexion pour favoriser le stationnement des artisans, en se basant sur le travail effectué à Paris à propos des cartes artisans.

5.7 Conclusion

Ce chapitre permet de diriger une collectivité locale dans une approche d'optimisation du TMV afin d'éviter de s'engouffrer dans des impasses où les solutions potentielles ne sont pas envisageables. La méthodologie d'optimisation s'oriente suivant les points suivants : définition des groupes cible, identification des attentes, définition des objectifs, caractérisation de la ville, conception globale et évaluation des solutions. Les données nécessaires sont statiques ou dynamiques. Les données statiques sont issues des instituts de statistiques comme l'INSEE et des CCI. Les données dynamiques concernent le fonctionnement des acteurs et notamment la capture des réactions dans des situations hypothétiques.

Les difficultés de rencontre des acteurs restent entières et le fait de ne pas avoir d'unité TMV au sein des services transports de la collectivité est un manque évident car les informations sont ventilées (quand elles existent) dans plusieurs services de la collectivité tels que la voirie, les déplacements, les transports, etc. La vision globale des problèmes de logistique en ville n'est donc pas assurée. On le constate nettement pour l'existence et la localisation des aires de livraison à La Rochelle où aucun plan d'aires de livraison n'existe, aussi incompréhensible soit-il. L'observatoire des transports est à peine impliqué dans le TMV et n'utilise pas les données, ou trop peu, sur le fret ce qui ne favorise pas la démarche d'optimisation de la ville. On constate que les initiatives issues des collectivités locales émergent tant bien que mal avec une image plus ou moins bien représentée de la réalité et ce, sans aucune ressource dédiée à l'exécution et la mise en place de solutions.

La motivation et l'implication des acteurs industriels sont difficiles à susciter tant les retombées économiques, environnementales et sociales sont inconnues. Les rencontres fructueuses

ne se sont pas révélées où nous le pensions mettant ainsi en avant la nécessité de recueillir le maximum d'attentes des industriels pour faire la liaison avec d'autres projets et créer des synergies. Le cas des artisans du BTP a été une agréable surprise tant sur leur motivation que sur leur implication dans une démarche d'amélioration du fret urbain, en créant ainsi une synergie avec un projet de la collectivité locale dont le but est la rénovation de plus de 500 habitations situées au-dessus des commerces de l'hyper-centre sur cinq ans.

Enfin, les objectifs et les contraintes des différents groupes sont variés mais liés, c'est pourquoi le pouvoir public décide sous contraintes des autres. Il s'agit d'abord de se concentrer sur le principal problème des acteurs qui s'avère être le manque de stationnement ou l'inadéquation de l'offre de stationnement. La réflexion se tourne naturellement vers les espaces logistiques primaires que sont les aires de livraison et plus précisément, pour une collectivité locale, vers la connaissance de l'impact des véhicules de marchandises lors des livraisons sur la circulation urbaine, étant donné un plan d'aires de livraison. Or, peu de littérature scientifique existe sur ce sujet. Dans ce cadre, nous établissons, dans le chapitre suivant, un diagnostic qui permet la validation de l'outil de simulation des aires de livraison dans le contexte de la CdA de La Rochelle.

Chapitre 6

Application à La Rochelle et réactions des acteurs

Sommaire

6.1 Introduction **182**

6.2 Présentation du contexte rochelais **183**

6.2.1 La Communauté d'Agglomération de La Rochelle 183

6.2.2 Le projet SUCCESS 184

6.3 Caractérisation de la ville **184**

6.3.1 Résultats de la variabilité à La Rochelle 184

6.3.2 La Rochelle dans l'espace de caractérisation 186

6.3.3 Sélection des solutions potentiellement efficaces à La Rochelle 187

6.4 Impacts du schéma d'aires de livraison **187**

6.4.1 Contexte de la validation 187

6.4.2 Données d'entrée et calibrage 188

6.4.3 Validation de la simulation numérique (DALSIM) 189

6.4.4 Utilisation de l'outil à Poitiers 196

6.5 Analyse critique des résultats et préconisations **199**

6.6 L'outil et les acteurs **201**

6.7 Conclusion **202**

6.1 Introduction

L'Europe met tout en œuvre pour développer les grands projets de la CE, pour favoriser la participation des pays membres à des projets communs et pour échanger leurs savoir-faire. Aussi, l'Europe lance-t-elle de plus en plus d'appels à proposition afin de financer ces projets. La Commission Européenne souhaite montrer que les technologies, les stratégies et outils testés sont capables de répondre concrètement aux problèmes de la société européenne dans son ensemble. La Rochelle, ville française de taille moyenne, est reconnue à travers l'Europe pour son avancée en matière de transports durables, à commencer par ses célèbres vélos jaunes qui sillonnent les rues depuis 1976. La Rochelle est une ville pilote du projet SUCCESS, programme européen d'envergure dans le domaine des Transports, animée d'une véritable volonté politique d'amélioration du TMV. D'autres villes, dans un contexte politique local permet d'améliorer le TMV, sont particulièrement novatrices, c'est le cas de la Communauté d'Agglomération de Poitiers pour laquelle nous mettons à contribution l'outil de simulation des aires de livraison après l'avoir calibré et validé à La Rochelle.

L'objectif de ce chapitre est de valider nos travaux sur la base d'une application concrète concernant l'agglomération de La Rochelle et d'avoir un retour critique des aspects pratiques s'agissant de la théorie et plus précisément de la manière de concevoir un outil de simulation pour le fret urbain. Nous présentons dans la première partie, la Communauté d'Agglomération de La Rochelle qui délimite le contexte d'application pour la validation de l'outil.

La deuxième partie présente les travaux de caractérisation de La Rochelle pour le TMV en rapport avec la méthodologie détaillée dans le chapitre 4 et présente ainsi les solutions potentiellement efficaces pour la CdA de La Rochelle.

La troisième partie décrit les résultats obtenus par la simulation pour des scénarios du plan d'aires de livraison sur l'hyper centre de La Rochelle et ils sont confrontés aux enquêtes pour calibrer et valider le modèle sous-jacent. Après une courte description de la ville de Poitiers, l'outil est ensuite utilisé pour l'aide à la décision sur trois projets de réaménagements de voirie dans Poitiers, que sont les projets de la rue Paul Guillon, des aires de livraisons dynamiques dans le secteur de la gare et Coeur d'Agglo.

La quatrième partie porte une réflexion critique sur les résultats et le contexte de l'étude. Enfin, la cinquième partie décrit la manière dont est perçu l'outil notamment au niveau de

son utilisation et de sa pertinence, mais surtout de son potentiel d'aide à la décision pour les collectivités locales.

6.2 Présentation du contexte rochelais

6.2.1 La Communauté d'Agglomération de La Rochelle

La Communauté d'Agglomération est un EPCI (Établissement Public de Coopération Intercommunale) regroupant plusieurs communes formant, à la date de sa création, un ensemble de plus de 50000 habitants d'un seul tenant et sans enclave autour d'une ou plusieurs communes de plus de 15000 habitants. Ces communes s'associent au sein d'un espace de solidarité, en vue d'élaborer et conduire ensemble un projet commun de développement urbain et d'aménagement de leur territoire.

La Communauté d'Agglomération de La Rochelle est composée d'environ 160 000 habitants sur 20 650 hectares.

Source : Auteur

FIG. 6.1 – Carte de la CdA de La Rochelle

La Figure 6.1 donne une représentation de la CdA de La Rochelle dans son ensemble et sa position au niveau national.

6.2.2 Le projet SUCCESS

Un partenariat des villes de La Rochelle, Preston et Ploiesti développe un projet de démonstration intitulé SUCCESS (Smaller Urban Communities in Civitas for Environmentally Sustainable Solutions) en réponse au programme européen CIVITAS II.

La Rochelle, Preston et Ploiesti représentent bien les villes moyennes européennes, qui font face à des problèmes spécifiques de transport : des espaces de surface et de volume réduits, ce qui implique une plus grande mixité et interconnexion des activités ; un manque de financements, qui peut être une barrière à la mise en œuvre de technologies sophistiquées ; un besoin d'adopter rapidement des solutions politiques, un manque d'expérience concernant la complexité des projets européens, une utilisation saisonnière des transports.

Un des objectifs phares du projet SUCCESS est notamment de développer de nouvelles approches pour l'amélioration des transports urbains et plus particulièrement du transport de marchandises en ville pour nos travaux.

6.3 Caractérisation de la ville

La caractérisation a été expérimentée sur la CdA de La Rochelle et sur le centre-ville de Poitiers (illustré à titre d'exemple dans le chapitre 4). Les résultats décrits dans les paragraphes suivants concernent la CdA de La Rochelle. Certains résultats ont déjà été présentés et publiés dans [Delaître *et al.*, 2008a].

6.3.1 Résultats de la variabilité à La Rochelle

Le Tableau 6.1 décrit les zones qui ont été construites par une Analyse en Composante Principale (ACP), le poids de chaque zone étant l'inertie du nuage de points de chaque zone. Et l'intitulé des zones donne leurs localisations par rapport à la carte de la Figure 6.1.

	Zone	p_i	$-p_i \log(p_i)$
1	Centre LR	0,26	0,152
2	Aytré Bourg	0,11	0,105
3	ZI Périgny	0,1	0,1
4	Beaulieu	0,09	0,094
5	Angoulins -sur-Mer	0,08	0,088
6	Les Minimes	0,06	0,073
7	La Palice	0,03	0,046
8	Dompierre-sur-Mer	0,03	0,046
9	Puilboreau Bourg	0,03	0,046
10	Lagord	0,03	0,046
11	LR Nord	0,02	0,034
12	Périgny Bourg	0,02	0,034
13	Chatelaillon-Plage	0,03	0,046
14	L'Houmeau	0,02	0,034
15	Nieul-sur-Mer	0,02	0,034
16	Saint-Xandre	0,02	0,034
17	La Jarne	0,01	0,02
18	Salles-sur-Mer	0,01	0,02
19	Saint-Vivien	0,01	0,02
20	Marsilly	0,01	0,02
21	Esnandes	0,01	0,02

TAB. 6.1 – Zones dans la CdA de La Rochelle

Il y a vingt et une zones comportant plus ou moins d'activités. Le Tableau 6.2 donne l'entropie et l'entropie relative pour ces vingt et une zones.

On constate que l'entropie relative est de 0.84 ce qui signifie qu'il y a une certaine part d'incertitude sur toute la CdA : les zones n'ont pas de différences importantes. Il est vrai que si on retire les trois plus importantes, les zones restantes sont en nombre conséquent et de poids similaire. Leur poids ne permet pas de descendre assez l'entropie relative pour en faire des zones prédominantes vis-à-vis de tout le territoire, parce qu'il y a beaucoup de zones. En effet, si on limite virtuellement le nombre de zones à 15 puis 10 en supprimant les plus petites, l'ACP

Zone	**21**
Poids total	1
Entropie	-1,11106445
Entropie relative	0,840302

TAB. 6.2 – Entropie et entropie relative sur la CdA de La Rochelle

redistribue l'inertie sur les nuages des points déjà importants et l'entropie relative passe à 0.76 et à 0.66 respectivement. Le nombre de zones similaires l'emporte sur l'importance des poids des trois principales zones. La CdA de La Rochelle est, d'un point de vue TMV, polycentrique.

6.3.2 La Rochelle dans l'espace de caractérisation

En prenant les renseignements nécessaires auprès de l'INSEE (source DI-INSEE-DCASPL), nous pouvons localiser La Rochelle dans l'espace de caractérisation. La Figure 6.2 donne cette représentation en mentionnant la zone concernée en vert.

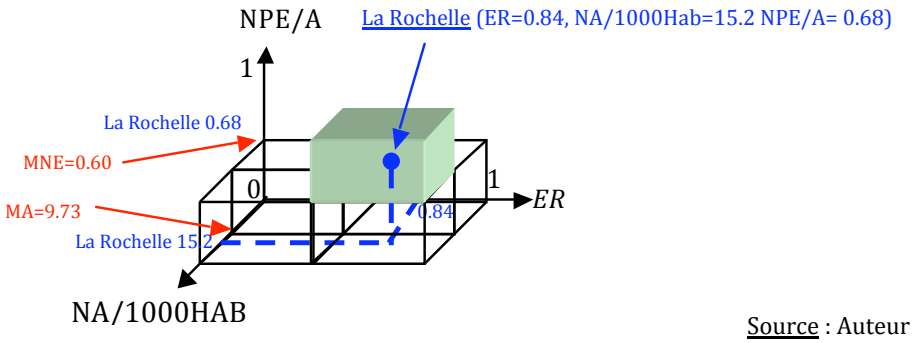


FIG. 6.2 – La Rochelle dans l'espace de caractérisation

La moyenne nationale du nombre d'équipements par activités vaut $0,60$, c'est-à-dire qu'il y a, en moyenne, $0,60$ équipement logistique (aire de livraisons, zone disposant de quais de déchargement...) par activité. Avec cet indicateur égal à $0,68$, La Rochelle est placée dans la partie supérieure de l'axe vertical (NPE/A). La moyenne du nombre d'activités par 1000 habitants vaut $9,73$, La Rochelle englobe, quant à elle, $15,2$ activités par 1000 habitants, ce qui, une fois de plus, la place dans la partie supérieure de l'axe NA/1000HAB. Enfin, avec une entropie re-

lative supérieure à $0,5$ ($\simeq 0,84$), La Rochelle possède une distribution d'activités relativement homogène et se situe par conséquent dans la partie supérieure de l'axe ER.

6.3.3 Sélection des solutions potentiellement efficaces à La Rochelle

Disposant d'un nombre relativement important d'aires de livraison et d'un CDU, il paraît pertinent de connaître la cohérence entre cette offre en stationnements avec la demande réelle. Ensuite, la distribution des activités est homogène sur l'ensemble de la ville, par conséquent la zone de chalandise du CDU doit s'étendre à la ville entière (actuellement la zone de chalandise comprend principalement l'hyper-centre). Or, ELCIDIS est limité en termes de kilomètres par tournée (de l'ordre de 60) ce qui est contradictoire avec une zone de chalandise aussi étendue. Il s'agit donc d'analyser si le CDU peut être capable de livrer une zone aussi vaste avec des moyens si contraignants, puis de chercher les activités annexes permettant d'améliorer l'efficacité de cette plateforme.

6.4 Impacts du schéma d'aires de livraison

6.4.1 Contexte de la validation

La Rochelle est une ville française de taille moyenne localisée sur la côte atlantique. En matière de structure urbaine, La Rochelle est caractérisée par un centre-ville historique comportant de nombreuses rues étroites rendant difficiles les livraisons de marchandises. Dès lors que les véhicules de marchandises sont garés illégalement dans la rue, la circulation globale est rapidement entravée.

À La Rochelle, les aires de livraison ont été créées de manière progressive, au fur et à mesure des besoins des commerçants ou entrepreneurs et leur localisation ne répond toujours pas à une vision d'ensemble.

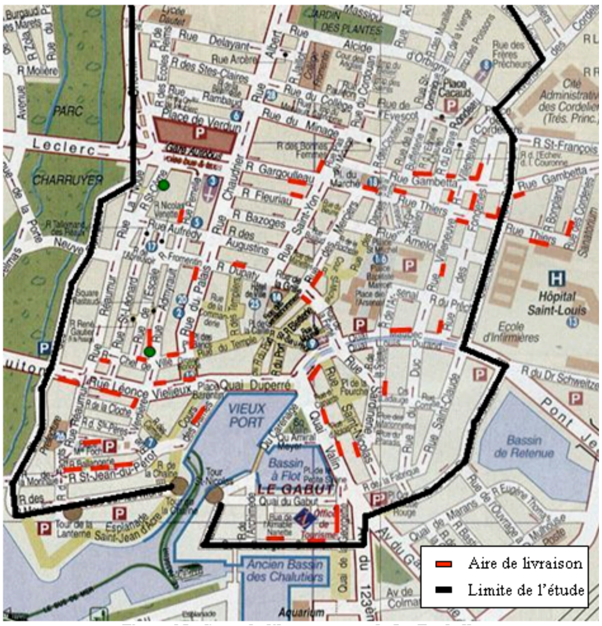
Les collectivités locales sont cependant conscientes du problème et soucieuses d'y remédier. Notre étude répond à une demande de leur part visant à pallier les dysfonctionnements induits par la mauvaise organisation de ces aires.

Pour toutes ces raisons, La Rochelle constituait un terrain pertinent d'application de la

méthodologie mise au point.

6.4.2 Données d'entrée et calibrage

La Figure 6.3 montre le cadre géographique de l'exercice qui est l'hyper centre-ville de La Rochelle, ses limites et les zones de livraison.



Source : Auteur

FIG. 6.3 – Carte de l'hyper-centre de La Rochelle

Chaque aire est localisée sur un plan et repérée par une abscisse et une ordonnée. Chaque activité au centre-ville aussi.

Une enquête menée à La Rochelle auprès des chauffeurs-livreurs au sujet de leur seuil d'acceptabilité en matière de distance entre le lieu de stationnement et le lieu de livraison a permis de fixer le rayon de voisinage à 20 mètres. D'autres enquêtes se sont intéressées à l'activité habituelle de livraison associée à chaque activité comprise dans le voisinage ainsi défini (jour et créneau horaire de livraison). La distribution temporelle des livraisons et enfin le taux d'arrivée sur l'aire en ont été déduits. Les données collectées pour toutes les aires ont été rassemblées en une base de données.

Pour la simulation de la propagation de la gêne (module 2), nous avions besoin de connaître les débits horaires de véhicules sur une semaine. Nous avons disposé, à cet effet, de nombreux comptages effectués récemment par les capteurs routiers mis en place par la Communauté d'Agglomération de La Rochelle dans le cadre du projet SUCCESS pour établir une base de données sur le trafic de véhicules à l'intérieur de la ville.

Pour calibrer le module 2 de l'outil, il était nécessaire de quantifier les paramètres k_1 et k_2 du modèle de propagation de la gêne décrits dans le chapitre 4. Pour quantifier le paramètre k_1 de contact entre les véhicules gênables et les véhicules gênés, nous avons effectué une série d'expériences sur trois axes contenant au moins une aire de livraison et particulièrement générateurs de véhicules gênants, à savoir la rue Saint-Jean-du-Pérot, la rue du Marché et la place du Marché. Nous y avons observé le plus grand nombre de changements de statut des véhicules, de gênable à gêné. Cela a conduit à fixer à 0,02 la valeur de k_1. Le paramètre k_2 représente la durée d'obstruction, assimilable à la durée moyenne de livraison. Sur la base de nos observations et des enquêtes nationales (cf. introduction) nous l'avons fixé à 12 min, soit 0,2 h.

6.4.3 Validation de la simulation numérique (DALSIM)

Le premier module de l'outil DALSIM fournit la distribution des véhicules gênants dans le temps, c'est-à-dire les véhicules qui n'ont pas pu utiliser une aire de livraison près de leur destination.

Le Tableau de la Figure 6.4 donne, rue par rue, le nombre d'aires de livraison actuel et le total par semaine des véhicules gênants simulés. Notons que les capacités des aires sont identiques et valent un véhicule de marchandises (soit 1.5 véhicule particulier). Il peut arriver le cas où des activités d'une rue ne soient pas dans le voisinage d'une aire et alors tout véhicule venant livrer est gênant. Des comptages ont été effectués sur une semaine pour connaître les nombres de véhicules gênants réels, à comparer aux nombres issus de la simulation à des fins de validation de celle-ci. Pour des raisons budgétaires, seule la moitié des aires de livraison pouvait être observée et ce sont les aires les plus génératrices de véhicules gênants qui ont été choisies. De ce fait, la simulation n'a pu être validée en dessous d'un certain seuil (quinze véhicules). Lors des comptages, la distinction a pu être faite entre une occupation par un véhicule de livraison arrivé précédemment (aire sous-dimensionnée) et une occupation par un véhicule particulier (station-

nement illicite). Rappelons que ce dernier cas n'est pas pris en compte dans la simulation, une conséquence étant que la sortie du premier module est une sous-estimation de la réalité en termes de véhicules gênants. Observer les véhicules particuliers en stationnement sur les aires de livraison peut être considéré comme une mesure du biais dû à leur non-prise en compte dans la simulation. Il sera sans doute nécessaire de corriger le modèle sur ce point, ce qui suppose d'effectuer au préalable une analyse dédiée au stationnement des véhicules particuliers sur les aires de livraison.

Nom de rue	Nombre d'aires	Nombre de véhicules gênants par semaine...		
		...simulés	...observés lorsque l'aire était occupée par...	
			...un véhicule de marchandises	...un véhicule particulier
Rue Saint-Jean-du-Pérot	5	77	85	20
Rue du Palais	2	20	16	5
Rue Amyrauld	1	24	28	12
Rue Leonce Vieljeux	1	2	-	-
Place Foch	1	4	-	-
Rue Chef-de-ville	3	49	56	32
Rue Dupaty	1	7	-	-
Rue Villeneuve	2	14	12	3
Rue Bompland	1	6	-	-
Rue Gambetta	2	11	15	12
Rue Saint-Louis	1	3	-	-
Rue des fonderies	2	8	-	-
Rue Amelot	1	8	-	-
Rue Gargoulleau	1	17	15	14
Rue Fleuriau	1	35	29	28
Place du Marché	1	22	80	72
Rue Thiers	1	15	14	15
Rue Emile Normandin	3	14	-	-
Quai Valin	2	21	22	20
Quai Louis Durand	1	8	-	-
Rue Albert 1er	2	8	-	-
Rue Saint-Nicolas	2	14	-	-

FIG. 6.4 – Nombre de véhicules gênants par rue et par semaine

De manière générale, dans chaque rue étudiée existent des problèmes de stationnement gênant de véhicules de livraison qui n'ont pu trouver place sur l'aire de livraison pourtant présente. Il y a évidemment un écart entre les 2 véhicules gênants par semaine simulés pour la rue Léonce Vieljeux (cette rue n'a pas fait l'objet d'un comptage) et les 77 véhicules gênants par semaine simulés pour la rue Saint-Jean-du-Pérot (105 véhicules gênants observés). Mais l'ensemble des rues de La Rochelle comportant au moins une aire de livraison, soit les 22 rues qui ont été simulées, totalise 389 véhicules gênants sur une semaine (les 11 rues ayant fait l'objet d'un comptage car le phénomène étudié y est le plus important totalisent pour leur part 606 véhicules), ce qui représente une moyenne de plus de 17 véhicules par semaine par rue simulée (ou 55 véhicules par semaine par rue observée). Il y a là un réel problème d'inadéquation à la demande réelle de l'offre de stationnement sur aires de livraison. Les plus sérieux problèmes concernent les rues Saint-Jean-du-Pérot, Chef-de-ville et Fleuriau, qui ont été repérées sur la Figure 6.7 et grisées dans le tableau de la Figure 6.4.

La validation porte sur la comparaison des nombres de véhicules gênants simulés aux chiffres de la première colonne des véhicules gênants observés lorsque la rue a fait l'objet d'un comptage (Figure 6.4),

La Figure 6.5 montre, pour les aires observées, les véhicules gênants simulés et les véhicules gênants effectivement constatés.

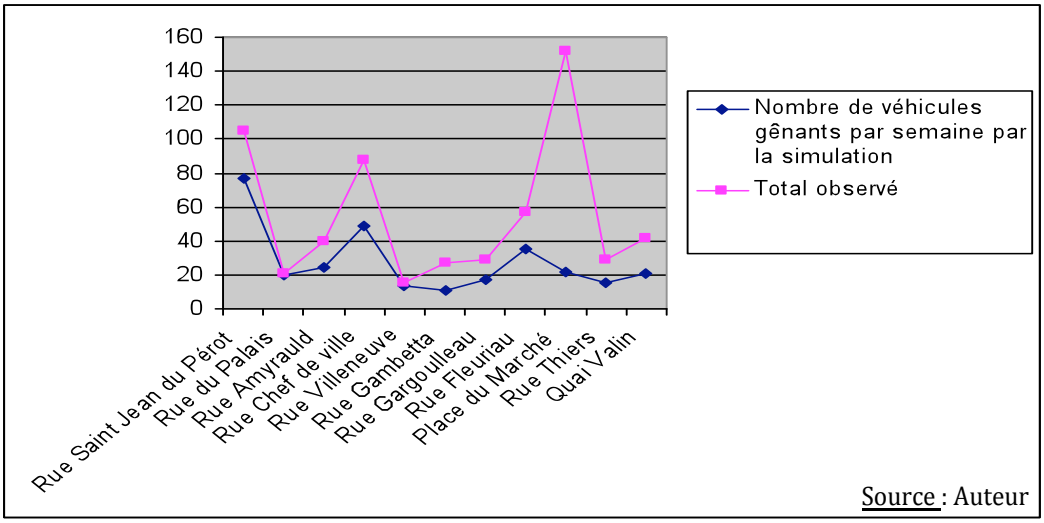


FIG. 6.5 – Distribution des véhicules gênants simulés et constatés

La Figure 6.6 représente les distributions détaillées des véhicules gênants simulés, constatés lorsqu'il y a occupation par un véhicule de marchandises et constatés lorsqu'il y a occupation par un véhicule particulier.

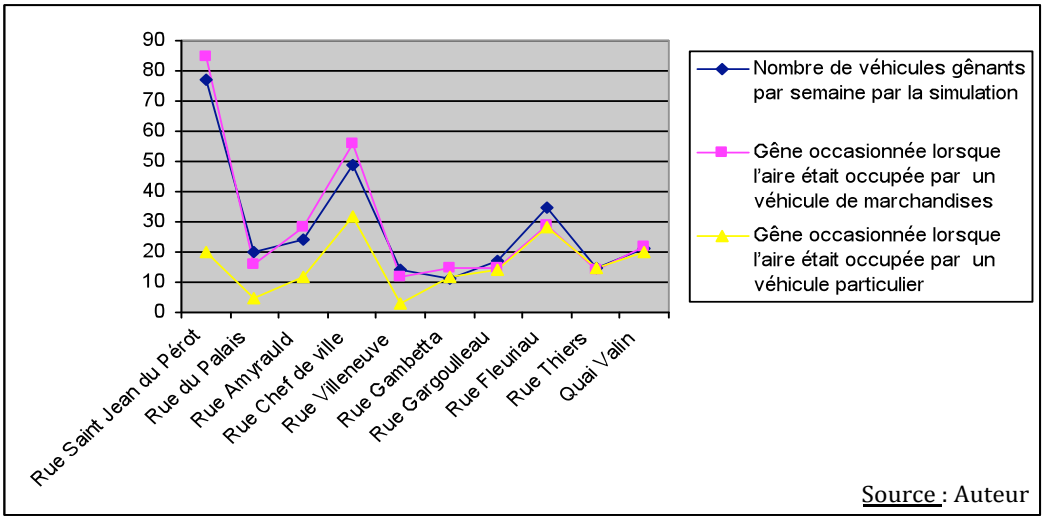
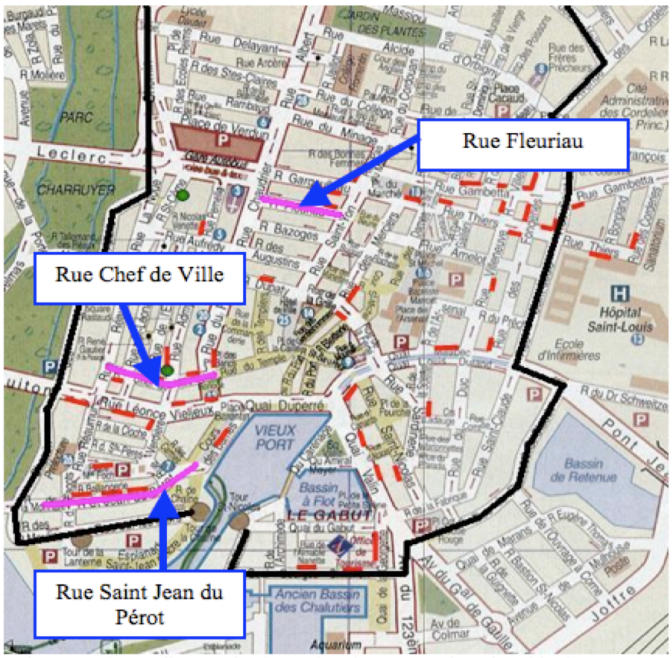


FIG. 6.6 – Distributions détaillées des véhicules gênants

On note que les nombres de véhicules gênants simulés sont proches des nombres de véhicules gênants observés quand l'aire était occupée par un véhicule de marchandises, le décalage visible avec les nombres totaux de véhicules gênants observés correspondant en général au cas de l'occupation de l'aire par un véhicule particulier (Figure 6.5). Un cas se distingue, celui de la place du Marché. En effet, pour 22 véhicules simulés, l'observation a été de 152 au total, dont 80 comparables (occupation de l'aire par un véhicule de marchandises). Une analyse plus fine a donc été nécessaire. On s'est alors aperçu que, les jours de marché, les commerçants utilisaient tout simplement les aires de stationnement pour exposer leurs produits. Les aires de livraison sont neutralisées pendant plusieurs heures et tout véhicule livrant une activité à proximité est en stationnement gênant. On note également une différence entre l'observation et la simulation pour la rue Chef-de-ville. Cette dernière est située dans une zone de la ville où le stationnement pour véhicule particulier est plus rare (pour les types de stationnements suivants : sur la voirie, places de parking réservées et garages). Les usagers sont d'autant plus tentés de détourner une aire de livraison dans leur intérêt.

Si l'on retire le cas très particulier de la Place du Marché, nous observons que la simulation reproduit convenablement la réalité des véhicules de livraisons gênants. Nous considérons le

premier module de l'outil DALSIM comme correctement calibré sur la ville de La Rochelle et validé.



Source : Auteur

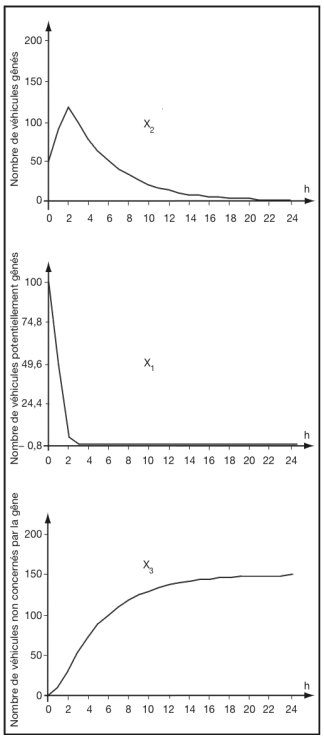
FIG. 6.7 – Localisation des trois rues les plus génératrices de véhicules gênants

Pour étudier de façon fine la propagation de la gêne et le retour à la situation initiale, nous faisons tourner le module 2 sur un scénario de référence dans lequel on prend en compte 50 véhicules de marchandises gênants ($D(0) = 50$) et un nombre total de 150 véhicules sur le réseau. En outre, aucun véhicule supplémentaire, de livraison ou autre, n'est injecté dans le réseau durant les 24 h suivantes ($\forall t > 0, D(t) = 0$). La durée de l'obstruction est toujours fixée à 12 min.

Ces limitations n'influencent pas la dynamique de l'obstruction, simplement nous nous concentrons sur la propagation relative de la gêne dans un groupe donné de véhicules. En ne tenant pas compte de la variation du nombre de véhicules en circulation sur la journée, on observe l'évolution du nombre de véhicules gênés, sans interférence de véhicules gênables à leur tour gagnés par la gêne.

La Figure 6.8 donne, pour ce scénario de référence, les sorties du module 2 sur 24 h. La courbe des véhicules gênés débute à 50 véhicules : il s'agit des 50 véhicules de marchandises

gênants injectés dans le scénario de référence à l'origine des temps, également véhicules gênés d'après nos conventions. En deux heures, la courbe des véhicules gênés atteint son maximum de 117 véhicules (phase où l'obstruction se répand), puis décroît jusqu'à s'annuler complètement en vingt heures environ (phase de résorption). Notons que la gêne se résorbe très lentement, alors même qu'aucun nouveau véhicule de livraison susceptible d'être gênant n'a été injecté ni aucun nouveau véhicule en circulation. Il vaut donc mieux éviter absolument qu'un véhicule de livraison ne se retrouve en situation de devoir stationner en position gênante.



Source : Auteur

FIG. 6.8 – Scénario de référence pour 50 véhicules gênants

Le graphique suivant (Figure 6.9) donne le résultat d'une simulation sur un jour. Le nombre N varie essentiellement selon les heures de la journée.

Pour générer les résultats de la Figure 6.9, le module 2 nécessite la distribution $D(t)$ qui est utilisée heure par heure et jour par jour. La courbe du nombre de véhicules sur le réseau est celle de la journée entière d'un mardi où les comptages du nombre de véhicules sur le réseau ont été jugés significatifs par la CdA de La Rochelle. La Figure 6.9 montre l'impact des véhicules gênants sur la flotte de véhicules circulant dans la ville de La Rochelle. Comme dans le cas du

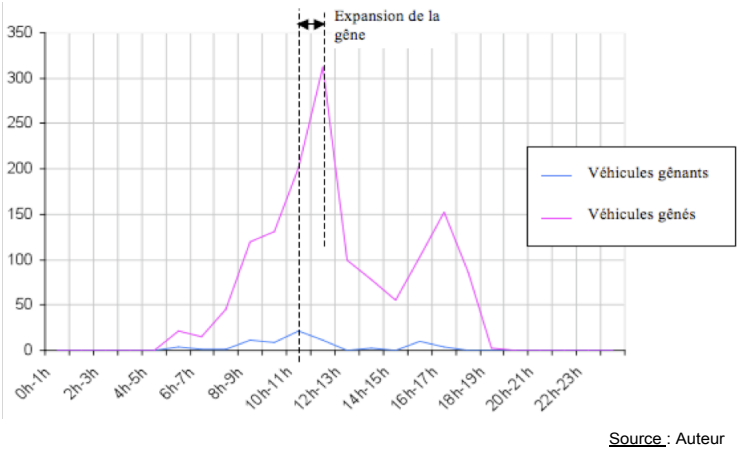


FIG. 6.9 – Distribution des véhicules gênés et gênants

scénario de référence, nous voyons que la propagation de la gêne accuse un retard : le maximum des véhicules gênants (entre 10 et 11 h) précède le maximum des véhicules gênés (entre 12 et 13 h). En outre, l'expansion de la gêne due à la livraison est exponentielle : ainsi, pour 11 véhicules gênants apparaissant de 8 h à 9 h, la gêne concerne 120 véhicules, soit approximativement un rapport de 1 à 10, tandis que pour 11 véhicules gênants apparaissant de 11 h à 12 h, par un effet de masse et un contact plus important avec les véhicules en circulation (eux-mêmes plus nombreux à cette heure), la gêne concerne 312 véhicules, soit un rapport de 1 à 30 environ. Il suffit alors de peu de véhicules de livraison en stationnement gênant pour affecter fortement, par un effet d'accumulation, les conditions de circulation de l'ensemble des véhicules du réseau, voire pour conduire à des situations de quasi-blocage.

DALSIM montre que le schéma actuel des aires de livraison de La Rochelle ne répond pas aux flux de marchandises du centre-ville. Les résultats sont préoccupants, car ils ne sont qu'une borne inférieure de la réalité dans la mesure où les cas des voitures particulières en stationnement irrégulier sur les aires de livraison ne sont pas pris en compte. Les résultats donnés par l'outil permettent de quantifier l'obstruction des véhicules livrant les marchandises sur les flux de circulation et mettent en avant la structure de la gêne : une étape de propagation et une étape de diminution. Ces deux étapes varient en durée selon la distribution des véhicules gênants et l'heure à laquelle s'effectue la gêne. Nous voyons qu'à La Rochelle, un système inadapté des zones de livraison affecte de manière significative l'ensemble des véhicules.

Les résultats obtenus jusque maintenant se révèlent être une représentation raisonnable de

la réalité. Mais on peut élargir les travaux de recherche et aller plus loin dans la simulation. Par exemple, le modèle ne permet pas encore d'évaluer les impacts de « gêner x véhicules » sur les conditions mêmes de circulation. Le modèle ne sera pas capable de le traiter tant qu'une différenciation de la gêne ne sera pas faite, c'est-à-dire de se concentrer sur les cas 1 et 2 mais aussi de leurs variantes. Ainsi, nous connaîtrons le type de la gêne (blocage complet du flux dans la rue où se situe le véhicule gênant, ralentissement, etc...) pour chacun des véhicules gênants et pourrons quantifier en termes d'indicateurs pertinents (à définir mais concernent les notions de temps perdu par automobiliste, niveau de stress, sécurité,...) la gêne occasionnée.

6.4.4 Utilisation de l'outil à Poitiers

Après avoir établi la validation de l'outil sur La Rochelle, pour ne pas interférer avec les résultats énoncés et pour enrichir nos études, nous allons utiliser l'outil dans le cadre du centre-ville d'une autre ville moyenne dont le coeur historique pose également quelques soucis au niveau de l'aménagement de la voirie, qui est Poitiers. Dans cette partie, nous allons utiliser l'outil à des fins d'aide à la décision.

6.4.4.1 Diagnostic du centre-ville de Poitiers

Un partenariat est établi dès que la CAP (Communauté d'Agglomération de Poitiers) prend connaissance de la validation de l'outil à La Rochelle, entre l'EIGSI, Mines ParisTech et la CAP. La CAP fournit les données nécessaires au fonctionnement du logiciel (mobilisant ainsi une personne à temps plein pour effectuer des enquêtes sur 15 jours répertoriant les habitudes en termes de livraisons des commerçants). Dans la Figure 6.10, nous pouvons apercevoir une sortie de l'outil DALSIM décrivant le cadre géographique de l'étude qu'est le centre-ville de Poitiers.

Les aires de livraisons sont représentées en bleu, les activités en rouge. On peut noter la présence des rayons de voisinage qui correspond au champ d'action d'une aire de livraison.

La Figure 6.11 donne les résultats du diagnostic du centre-ville de Poitiers et correspond aux sorties du module 1 de l'outil DALSIM. Les dysfonctionnements apparaissent lorsqu'une aire de livraison est occupée par un véhicule de marchandises (barre rouge) et lorsque les livraisons sont effectuées sans aire de livraison (barre bleu foncé). Les résultats du module 2 ne sont pas disponibles actuellement car les données de comptages nécessaires ne sont pas complètes.

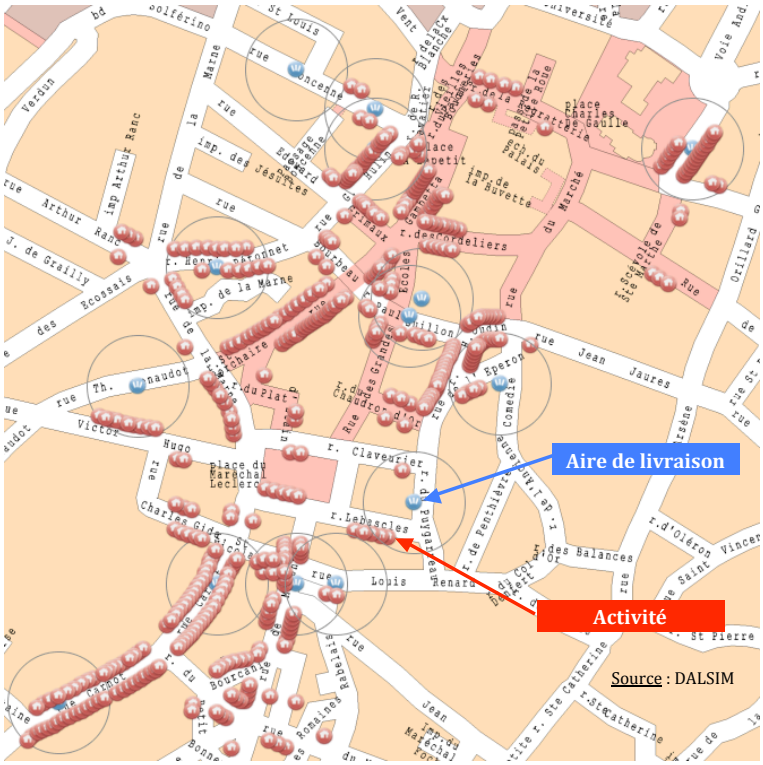


FIG. 6.10 – Cadre géographique de l'étude sur Poitiers

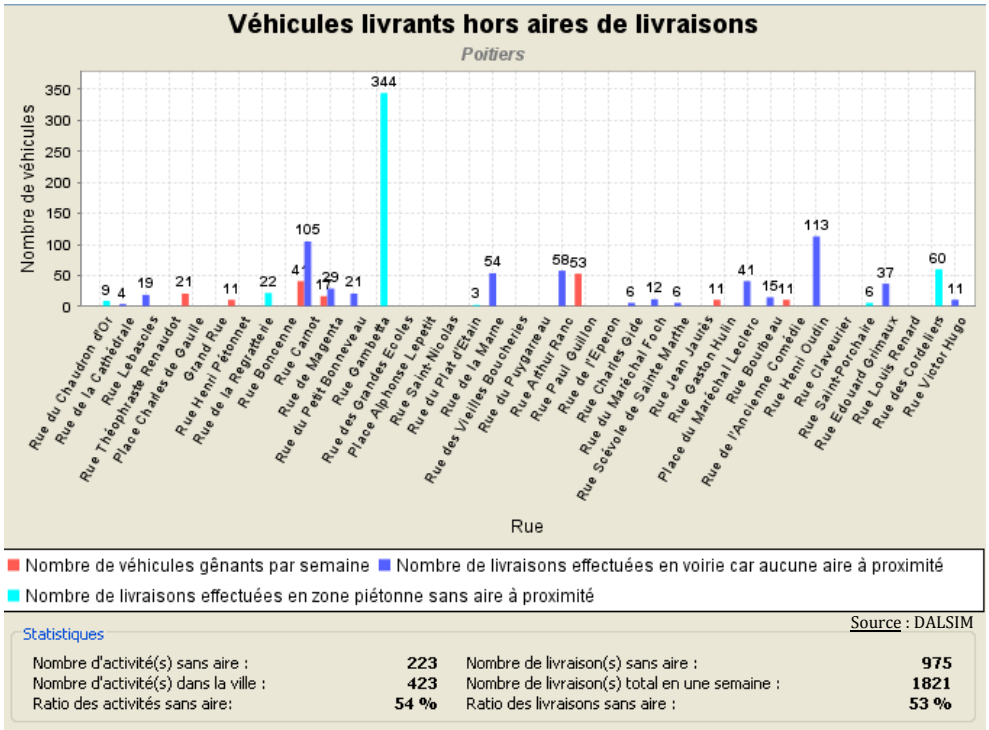


FIG. 6.11 – Génération des véhicules gênants à Poitiers

Les premières réflexions sur les résultats se portent évidemment sur l'explosion de véhicules gênants dans la rue Gambetta. Des résultats à modérer puisque la rue concernée est piétonne et sans aire à proximité, par conséquent, chaque arrivée de véhicule occasionne une gêne. Pour cette raison, nous avons distingué deux types de rue : les rues piétonnes sans aire à proximité et les rues traditionnelles sans aucune aire de livraison. La distinction du premier type permet de préciser les véhicules qui seront réellement gênants de ceux qui ne le seront pas pour ne pas fausser les résultats du module 2. En effet, des véhicules gênants dans une rue piétonne ne gêneront pas, a priori, les flux de véhicules. Enfin, la distinction du deuxième type de rue permet de savoir, intuitivement, quels vont être les lieux où la mise en place d'une aire de livraison va être nécessaire.

Nous remarquons en outre une rue dont le nombre de véhicules gênants est particulièrement élevé, il s'agit de la rue Carnot.

6.4.4.2 Améliorations soulevées à Poitiers

DALSIM a permis la création de scénarios dans plusieurs contextes :

- lors de réaménagements de voirie (rue Pétonnet) : l'outil formalise les pratiques actuelles et, en simulant les possibles aménagements, les pratiques futures. Cet outil a donc été très intéressant notamment pour l'aide au dimensionnement et à la localisation des aires de livraison ;
- lors de la fermeture prolongée d'une voie pour cause de travaux (rue Paul Guillon) : l'outil d'aide à la décision est en mesure d'une part de quantifier le report de camions auxquels la collectivité se devra de trouver une solution palliative. D'autre part, DALSIM donne une idée du dimensionnement des espaces à dégager pour la mise en place d'un espace de livraison pouvant aller de l'aire de livraison standard à l'ELP ;
- dans le cadre du projet Cœur d'Agglo : l'aménagement d'une aire piétonne circulée fonctionnant avec des régimes horaires d'accès différenciés à l'aire devra tenir compte de la question du trafic du TMV. Par ailleurs, la surface nécessaire aux pratiques de livraisons devra être intégrée aux réflexions des architectes urbanistes. L'outil apporte à la collectivité ce type de données ;
- lors de la révision du PDU : pour la CAP, la révision du PDU sera l'occasion de donner un nouveau poids au volet TMV qui n'a pas été traité en profondeur. DALSIM, par le biais des simulations, apporte une vision prospective de ce que pourra être le TMV à Poitiers. Il sera également mis à profit dans le cadre du plan d'actions du PDU pour déterminer les zones dans lesquelles des aménagements d'espaces logistiques seront à envisager ainsi que les caractéristiques de ces dernières.

6.5 Analyse critique des résultats et préconisations

Nous avons présenté dans cette section l'outil DALSIM (Delivery Areas and Logistic Simulation) fondé sur un modèle composite qui utilise deux types d'approche de modélisation : les files d'attente de la recherche opérationnelle et la dynamique des systèmes. L'outil s'articule en deux modules : sur la base de la connaissance experte des habitudes de livraison dans une ville et des débits de véhicules sur le réseau routier, le premier fournit, aire par aire, la distribution temporelle des véhicules gênants accompagnée des durées de la gêne, ainsi que la distribution

agrégée des véhicules gênants sur le réseau. En utilisant cette sortie, le second module propage la gêne à tout le réseau et fournit à tout instant les nombres de véhicules gênés, gênables et non concernés par la gêne.

Cet outil a été utilisé pour reproduire les conditions d'utilisation du réseau d'aires de livraison existant dans l'hypercentre de La Rochelle. La comparaison des nombres de véhicules de livraison gênants simulés aux nombres réels connus par comptage dans les rues connaissant les plus forts problèmes liés à la livraison ont montré que le calibrage du module 1 était correct et ont permis de valider ce module.

Alors même que DALSIM sous-estime la gêne occasionnée par le stationnement en pleine voie des véhicules de livraison faute d'une place disponible sur l'aire adéquate, puisque la simulation ne prend pas en compte le stationnement illicite de véhicules particuliers sur ces aires, pourtant non négligeable à la Rochelle comme le montrent les comptages, le nombre de véhicules gênés est très important et la gêne se répand de façon exponentielle, particulièrement aux heures de forte circulation. On en conclut que le réseau d'aires de livraison de La Rochelle est incapable d'offrir une capacité bien adaptée à l'activité de livraison en centre-ville. Les conséquences en sont des problèmes de circulation qui affectent de manière significative l'ensemble des véhicules [Delaître *et al.*, 2008c].

En établissant un diagnostic clair de la situation actuelle, l'outil DALSIM a permis de sensibiliser les autorités locales au problème. Celles-ci sont décidées à y apporter une solution et ont pour cela besoin d'un outil d'aide à la décision. L'outil DALSIM ne permet certes pas de trouver le meilleur schéma d'aires de livraison dans une ville, mais simule l'impact en matière de gêne sur l'ensemble de la circulation de n'importe quelle variante, déclinée à partir du schéma d'origine par modification des capacités des aires, ajout ou suppression d'une aire, etc. La comparaison des performances de ces différentes possibilités ouvre la voie à une vision prospective. La réflexion peut alors s'engager au sein des collectivités locales et la négociation peut être conduite avec les commerçants.

Le fait que l'outil est simple à utiliser, puisqu'il s'appuie en entrée sur une connaissance experte que les ingénieurs des services municipaux ont en général et donne en sortie un critère global, facilite son appropriation par les décideurs. Ce dernier point a cependant son revers. Modéliser de manière agrégée la gêne propagée par les véhicules de livraison en stationnement gênant ne permet pas de différencier les véhicules gênés selon les rues. Or, la fréquentation des

rues et les véhicules gênants en fonction des heures de la journée conditionnent l'exposition à la gêne et chaque rue est un cas particulier qui n'a pas le même impact au niveau de la congestion. Une amélioration possible de l'outil consisterait à garder dans le module 2 le détail spatial du module 1, pour obtenir une description plus précise de la propagation de la gêne. Il s'agirait de remplacer le modèle exposé par n modèles fonctionnant sur la base non de données globales de véhicules circulant sur le réseau, mais de données liées à chaque rue. Les liens entre ces n modèles devraient bien évidemment aussi être explicités.

Les résultats obtenus jusqu'à présent se révèlent être une représentation raisonnable de la réalité. Mais l'on peut chercher à aller plus loin dans le niveau de détail des situations simulées. Le cas 3 dans lequel une aire de livraison est occupée illégalement par un véhicule particulier, qui avait été exclu de la simulation, sera réintroduit. Par ailleurs, la sortie du modèle sous forme de nombre de véhicules gênés n'est qu'une première approche imparfaite de la gravité de cette gêne. Pour connaître plus parfaitement le type de gêne, blocage complet de la rue considérée ou simple ralentissement, et ses conséquences, par exemple en termes de sécurité, temps perdu par les automobilistes, stress, etc. on ne pourra se limiter aux cas 1 et 2 sans examiner leurs multiples variantes, lesquelles dépendent de la configuration de la voirie, du nombre de voies, de la proximité éventuelle d'un carrefour, des possibilités de dépassement, etc. Ces aspects font l'objet de développements actuels.

6.6 L'outil et les acteurs

Cette réflexion concerne les impressions des acteurs sur l'utilisation et l'intégration de l'outil. Nous avons recueilli les retours d'expérience dans le cas de la ville de Poitiers.

L'interaction entre l'outil et les acteurs de Poitiers est nette. L'outil a permis, selon les collectivités, CAP et Ville de Poitiers, de réunir quatre services distincts s'impliquant dans la problématique du TMV :

- le service *Espace public* (Ville de Poitiers) qui est en charge des aménagements des espaces publics et de la voirie. L'aménagement des aires de livraisons, leurs dimensionnements et localisations sont impliqués dans ce service ;
- le service *Projet urbain et développement durable* qui est en charge de l'urbanisme. Ce service organise le suivi de tous les aménagements urbains (ZAC,...). En charge du PLU, le

service dispose d'un regard prospectif sur les évolutions urbaines de l'agglomération de Poitiers ;

- le service *Développement économique* qui a pour mission première le développement de l'activité économique sur le territoire. Ce service est en contact étroit avec les acteurs économiques et en particulier avec les commerçants. Pour le TMV, ce service recueille et fait remonter les attentes et besoins des entrepreneurs poitevins ;
- le service *Mobilité transport et stationnement*, service de la CAP, qui a pour mission de définir et mettre en place la politique globale de déplacements sur l'agglomération par le biais du PDU. Il a pour mission de développer une politique durable en matière de TMV et propose son expertise au service de l'acteur opérationnel qu'est le service *Espace public*.

6.7 Conclusion

Ce chapitre constitue le volet pratique qui cerne l'applicabilité du modèle conceptuel et de l'outil de simulation développé à partir de CILOSA pour tenter de répondre à la problématique des aires de livraison. Il établit la caractérisation de la CdA de La Rochelle dont les principaux résultats recommandent de s'assurer de la cohérence de l'emplacement et de la dimension des équipements logistiques les plus basiques que sont les aires de livraisons. En effet, La Rochelle dispose d'un nombre important d'aires de livraisons et une distribution homogène des activités. Ce dernier point est problématique pour l'autre résultat de la caractérisation qui est l'extension des activités de la plateforme ELCIDIS. Celle-ci devra perdre en performance pour pouvoir assurer l'acheminement des marchandises dans toute la CdA ce qui remet en cause fondamentalement les rentabilités économique et environnementale.

La calibration et la validation de l'outil DALSIM ont été effectuées à La Rochelle et les résultats ne sont pas encourageants dans la mesure où ils constituent une sous-estimation de la réalité puisque tous les cas de véhicules gênants ne sont pas pris en considération dans cette étude (cas 1 et 2 uniquement). Les rues du centre-ville sont, d'une manière générale, toutes plus ou moins génératrices de véhicules gênants, mais les résultats montrent particulièrement trois mauvais élèves : les rues Saint-Jean-Du-Pérot, Chef-de-ville, et Fleuriau. Ces rues ont un point commun puisqu'elles comportent toutes beaucoup de restaurants, bars et brasseries, et par conséquent nous soulevons une piste intéressante à approfondir qui est l'étude des chevau-

chements des rythmes de livraisons dans un petit périmètre comportant ce type d'activité.

Enfin, l'outil DALSIM fait partie du package dont disposent les personnes des services techniques de la Communauté d'Agglomération de Poitiers et est mis à l'épreuve, encore en ce moment sur des projets in situ. Les résultats à Poitiers sont pour l'instant partiels, mais les premières utilisations de l'outil à la CAP ont fourni quelques retours d'expériences sur la manière de le mettre à l'épreuve et sur les résultats qu'il propose ou pas. La non-distinction des gênes est le point critiqué le plus redondant. La facilité de prise en main, le côté ludique et interactif avec l'homme sont des qualités appréciables pour les services techniques.

Conclusion générale

Le Transport de Marchandises est le parent pauvre de la mobilité en ville parce que la prise de conscience de la part des acteurs impliqués est encore trop récente et le retard accumulé par rapport au transport de personnes, tant sur les compétences des experts que sur l'intégration dans les plans de déplacements et l'aménagement du territoire est aujourd'hui un frein considérable à la réduction des impacts négatifs de l'acheminement des biens en ville.

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à la proposition d'une méthodologie pour l'optimisation du Transport de Marchandises en Ville. Elle permet la définition et la mise en œuvre d'une démarche, se basant sur la modélisation et l'expérience des responsables des services techniques des villes, dont l'objectif est l'aide à la décision pour la mise en œuvre de solutions à moyen terme pour une collectivité locale, i.e. sur un horizon de 2 à 5 ans. Les apports de cette thèse sont à caractère théorique et opérationnel. Nous proposons de les détailler dans les paragraphes suivants.

Les apports théoriques

Les apports théoriques proviennent, en premier lieu, du fait que nous avons poussé la réflexion sur l'intérêt d'une modélisation. Dans le but de développer un outil d'aide à la décision, nous avons, au préalable, établi un modèle conceptuel du système complexe TMV. Une analyse causale globale et un schéma de référence mettant en avant les influences croisées des variables ont été nécessaires à la construction d'un tel modèle. L'intérêt principal a été de formaliser le cadre décisionnel et de situer l'outil dans les processus de décisions.

Les apports théoriques sont également issus de l'intérêt d'une modélisation hybride. Le

principe de modélisation de l'outil d'aide à la décision, une hybridation de Recherche Opérationnelle et de Dynamique des Systèmes, sur lequel repose la méthodologie CILOSA apparaît comme une résultante intéressante de deux modélisations, utilisées d'ordinaire séparément. Ce principe autorise la construction d'un modèle de simulation adapté aux besoins en termes de niveau de détail et de critères de performance aussi bien qualitatifs que quantitatifs. L'intérêt principal réside alors dans la possibilité de décrire la totalité d'un système de transport de marchandises en ville et donc de prendre en compte toutes les interactions, sans pour autant procéder à une description (trop) fine de l'ensemble du système.

Sur le principe de modélisation CILOSA, l'outil DALSIM (Delivery Areas and Logistic SIMulation) a été construit et développé dans le cadre de cette thèse montrant la faisabilité d'une telle approche théorique pour des problèmes pratiques. Il permet d'étudier une problématique majeure des villes qui concerne tous les acteurs de la logistique urbaine : la localisation et le dimensionnement des aires de livraison. Cet outil propose, en premier lieu, le diagnostic des aires de livraison et constitue ensuite une aide à la décision, par un jeu de scénarios, en estimant la gêne occasionnée par les véhicules de marchandises sur les flux globaux de la ville lors des opérations de livraison. La calibration et la validation des modèles sur lesquels repose l'outil ont été menées dans la Communauté d'Agglomération de La Rochelle. Cet outil permet d'établir un lien entre la modélisation de l'occupation du sol et la circulation.

Enfin, les apports théoriques sont assurés par la mise en évidence de la richesse des hypothèses et des limites d'une telle approche. En effet, la principale limite de la présente approche est le nombre de variables à considérer dans les modules de l'outil de simulation. Un nombre trop important, mais légitime pour obtenir des résultats plus précis, impliquerait l'utilisation d'heuristiques plus complexes et difficilement cumulables dans un modèle 3D par exemple. L'amélioration des temps de calculs constituerait une avancée dans le nombre de variables considérées et préciserait les résultats. Toutefois, la pertinence d'un modèle trop fin est souvent à démontrer tant l'envergure du système étudié est vaste (échelle de la ville, voire plus dans certains cas). Par ailleurs, la quantification des relations (entre les différentes variables) du second module de DALSIM est totalement appréciée par le modélisateur, par conséquent les hypothèses de travail sur lesquelles reposent les modèles peuvent être nombreuses et discutables.

Les apports opérationnels

Ce travail de recherche fournit des apports concrets et opérationnels pour les acteurs de la logistique urbaine. Avant toute chose, même si l'outil développé est un outil simplifié, il assure un aspect opérationnel pour les collectivités locales. Calibré, l'outil a été mis à l'épreuve dans la Communauté d'Agglomération de Poitiers où il est toujours en utilisation dans les services techniques sur des projets de réaménagement de voirie et de révisions du PDU (Plan de Déplacements Urbains). Les résultats issus des scénarios envisagés sont utilisés comme base de réflexion lors des dialogues et débats avec les utilisateurs du fret urbain.

Cette thèse fournit également un apport sur la prise de conscience du problème du transport des marchandises en ville par les acteurs de la sphère urbaine, comme les collectivités locales et par les acteurs de la sphère économique, comme les commerçants. Les résultats des simulations, dans ce secteur urbain, montrent que la plupart des rues possédant au moins une aire de livraison provoquent des gênes intempestives sur les flux de véhicules. Ces travaux permettent également de mettre en évidence des interactions entre la dynamique des livraisons et les flux de circulation et un éclairage des conséquences de certaines actions comme l'introduction ou la suppression d'une aire de livraison.

Enfin, les modèles proposés dans cette thèse sont des outils de compréhension du système complexe TMV par les réactions positives ou négatives qu'ils suscitent. Ces aspects opérationnels sont davantage des aspects maïeutiques pour faire émerger de nouveaux problèmes, contraintes et solutions mal formalisés. C'est notamment le cas lorsque l'outil est utilisé pour construire un plan d'aires de livraison acceptable puisque nous avons choisi de représenter la zone d'attraction d'une aire par un disque poussant ainsi le décideur à se poser des questions sur l'existence et la forme d'une telle zone du type : y-a-t-il une forme clairement perçue ou doit-on faire des hypothèses ? Est-ce vraiment un disque ou une autre forme comme une ellipse ?

Ce travail de thèse ouvre principalement la voie au couplage de l'occupation des sols et des flux de véhicules. Nous avons vu que la gêne est constituée d'une phase de propagation et d'une phase de résorption. La gêne simulée serait d'autant plus précise si les différentes variantes de stationnement étaient prises en compte. Par exemple, un stationnement en double file dans une rue à une voie en sens unique paralyse totalement le flux dans cette partie du réseau alors qu'un

stationnement hors de la voirie n'a pas d'impact significatif sur les flux de véhicules. En outre, même si la modélisation des flux de passagers n'est pas montrée explicitement, la modélisation issue de ces travaux de recherche est totalement compatible avec les modèles traditionnels, ce qui ouvre d'autres perspectives de combinaisons d'outils en incorporant les modèles scientifiques utilisés dans les services techniques.

Les résultats de l'outil ne sont pas à prendre pour argent comptant, car même proches des observations, ils sont générés sans tenir compte des comportements des acteurs. L'apport de l'outil réside alors non pas de la représentation absolue de la réalité, mais d'une représentation relative de l'évolution des véhicules gênants par comparaison des scénarios entre eux.

La modélisation du comportement des usagers devrait être incluse dans des travaux ultérieurs. Quelques variables tiennent compte du comportement des chauffeurs-livreurs de façon agrégée pour chaque aire de livraison comme le rayon d'influence d'une aire de livraison. Mais un développement de la modélisation des comportements des acteurs (stationnement en double file, répression des forces de police, attitudes des conducteurs, etc.) serait un apport significatif dans la représentation de la réalité. De plus, l'outil est basé sur l'hypothèse de rationalité des politiques de transport. Or, dans la pratique, cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée pour différentes raisons et en particulier lors des projets d'évaluation.

Pour conclure, appréhender le transport de marchandises en ville est une tâche ardue tant ce système recouvre beaucoup de domaines. La diminution des impacts négatifs peut être abordée de différentes manières. Malheureusement, il existe encore des frontières bien délimitées entre chaque domaine et nous en distinguons deux en particulier :

- **la frontière externe (fret/passagers)**. En effet, la première séparation des approches possibles provient du type de flux considéré : le transport de personnes ou le transport de marchandises. Les documents de planification des transports urbains (comme les PDU) convergent vers la nécessité de prendre en compte simultanément ces deux composantes du transport urbain. Mais, elles sont considérées séparément pour des raisons aussi diverses que les contraintes économiques et sociales, les choix politiques ou encore l'héritage culturel de chaque contexte. Pour accroître les effets des actions visant à améliorer la mobilité urbaine et à les orienter plus fortement vers le partage de l'espace de la ville, il est nécessaire de coordonner et de mutualiser leur mise en place et d'examiner ce qui peut

être partagé (et comment). Cette analyse doit porter sur les quatre domaines d'action que sont l'espace, le temps, les ressources et l'information pris isolément ou conjointement.

– **la frontière interne**. Effectivement, il y a aussi une grande coupure entre les approches d'optimisation elles-mêmes. Plusieurs domaines de compétences sont mis à contribution balayant les sciences sociales, l'économie, les mathématiques, la robotique, etc, mais leurs liens sont inexistants ou ne sont pas clairement établis. Par exemple, proposer de nouveaux véhicules de marchandises (véhicules « intelligents ») est une approche portant sur les nouvelles technologies tandis que l'approche de cette thèse se concentre sur la simulation et l'organisation.

Par conséquent, il s'agit de fournir aux autorités organisatrices de transports, un outil d'aide à la décision beaucoup plus large dont l'objectif est de répondre à leurs interrogations sur les conséquences que peuvent avoir leurs politiques de transport, immense édifice dont une petite brique est construite dans cette thèse. D'autres axes de recherche se dessinent alors, comme imaginer les concepts pertinents pour construire un modèle considérant les impacts du TMV sur la sécurité, le vote électoral, et la qualité de vie des usagers. Il paraît également nécessaire d'étudier les événements « déclencheurs » de la mise en place de nouvelles organisations logistiques et de l'utilisation de nouveaux moyens de transport urbains dans un contexte très particulier basé sur l'économie locale et le développement urbain et durable.

Pour lutter contre la congestion, des actions et des mesures diverses et variées ont vu le jour au fil des trente dernières années. Elles se déclinent en trois axes majeurs :

– l'amélioration de l'infrastructure routière et des véhicules ;
– la limitation des vitesses ;
– la modification des comportements.

La considération du transport des marchandises en ville a enrichi ces trois axes en élargissant le spectre des véhicules et des limitations. Si les deux premiers axes ont été relativement faciles à tester et à mettre en place, le troisième reste un point crucial sur lequel collectivités locales et chercheurs rencontrent des difficultés. Convaincre, persuader, influencer des comportements sont des activités liées à la communication et à la sociologie. On le découvre très bien lors des opérations d'optimisation dans une même chaîne logistique, où tous les acteurs échangent autour d'un modèle de représentation. On le remarque beaucoup moins dès que l'on étudie la mutualisation entre plusieurs chaînes logistiques. Dans un milieu aussi contraint et multi-acteurs que celui du milieu urbain, le véritable intérêt d'une modélisation pour les changements com-

portementaux n'est pas réellement posé. Y-a-t-il une manière de modéliser pour influencer les comportements ? Quels sont les apports d'une modélisation du fret urbain pour un changement comportemental des acteurs ? A partir des expériences de La Rochelle et de Poitiers, un premier élément de réponse est de constater que le modèle peut permettre de faire comprendre aux acteurs les conséquences de leurs actes et surtout de les faire réagir.

Choisir une solution extrême - l'automatisation du transport de marchandises en ville à l'horizon 2050 - peut être un changement radical dans l'organisation des logistiques et pousse cette réflexion vers d'autres domaines que celui de la gestion en outrepassant, peut-être, la nécessité de changer brutalement les comportements. Le transport automatisé des marchandises relève d'un concept innovant mais n'est constitué, à l'heure actuelle, que de projets de recherche multidisciplinaires. Pour considérer une telle avancée et voir se développer un système de transport automatisé dans nos villes pour acheminer les marchandises, il faut s'assurer que cela constitue une alternative réaliste et réalisable en présentant un intérêt stratégique pour le développement du progrès social, la sécurité de l'environnement et la réduction des émissions de GES (Gaz à Effet de Serre) et de polluants. Un système automatisé de transport des marchandises dans les secteurs urbains redéfinit l'espace alloué et son utilisation. Par conséquent, il convient d'introduire des étapes de changements radicaux pour la mobilité des personnes et des biens pour les vingt prochaines années et au-delà. L'ensemble de ce dispositif doit contribuer efficacement à la réalisation des objectifs de la Communauté Européenne et permettre l'exportation de l'expertise de la CE dans le monde entier, en termes de connaissance théorique interdisciplinaire et pratique dans les systèmes de transport automatisé de biens et de personnes.

Imaginons, quelques instants, un scénario futuriste d'un système de transport urbain entièrement automatisé basé sur une ou plusieurs plateformes de dépôt gérée(s) par la ville et munie(s) d'une flotte de véhicules propres et respectueux des usagers de la ville. Chaque entreprise devrait fournir la demande de mobilité de ses biens en indiquant le type de véhicule (conditionnements particuliers, matériels frigorifiques...), le lieu et l'heure de livraison. Le système central va lui octroyer, par analogie du sillon dans le fret ferroviaire, le véhicule adapté et l'itinéraire qui aura le moins d'influence sur la charge du réseau en fonction du lieu où les marchandises doivent être déposées (dans le cas de plusieurs plateformes). D'un point de vue expérimental, toute la technologie nécessaire à ce type de système est disponible, pourtant on assiste globalement à un retour en arrière comme le fait d'utiliser des triporteurs « classiques » pour livrer en ville. Pourquoi n'irions nous pas vers un changement radical ? Il faudrait pour cela entamer un

long processus dont la première tâche serait l'analyse des technologies disponibles et le diagnostic des espaces utilisés. Les choix technologiques ne sont qu'un des aspects d'une démarche qui peut bousculer les processus métier et l'organisation des acteurs. Ainsi, il s'agirait en d'autres termes de réaliser la cartographie et la description des processus logistiques, des procédures de travail actuelles et de l'adéquation des systèmes d'information en place qui composeraient une phase d'analyse des besoins. Un tel projet doit prévoir également les perspectives de croissance pour augmenter le degré d'automatisation, les aspects économiques comme la rentabilité exigée, la durée de retour sur investissement. Par une phase d'évaluation, il faudrait finalement rendre compte des gains sur le contrôle des flux, l'augmentation de la productivité, la rapidité des livraisons, les gains en surface de stockage. De tels changements d'intégration de l'automatisation dans les transports de marchandises en ville seraient à effectuer avec beaucoup de précautions en veillant ainsi à la modularité, la flexibilité et la réactivité pour s'adapter à l'évolution dynamique des acteurs, des pouvoirs politiques et des flux de marchandises qui en résultent. Dans ce cadre, l'outil développé dans cette thèse serait alors parfaitement utilisable, complémentaire et trouverait toute son efficacité car les données techniques et comportementales seraient considérablement améliorées et contrôlées.

Abréviations

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

ANVAR : Agence Nationale de VAlorisation de la Recherche

B2B : Business to Business

B2C : Business to Customers

BESTUFS : BEST Urban Freight Solutions

BLU : Boîte Logistique Urbaine

C2C : Customers to Customers

CE : Commission Européenne

CERTU : Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques

CDU : Centre de Distribution Urbaine

CH_4 : Méthane

CILOSA : CIty LOgistics scenarios Simulation Approach

CIVITAS : CIty VITAlity Sustainability

CO_2 : Dioxyde de Carbone

DALSIM : Delivery Areas and Logistics SIMulation

DRAST : Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques

DS : Dynamique des Systèmes

EIGSI : École d'Ingénieurs en Génie des Systèmes Industriels

ELCIDIS : ELectric vehicle CIty DIstribution Systems

ELP : Espace Logistique de Proximité

ELU : Espace(s) Logistique(s) Urbain(s)

GART : Groupement des Autorités Responsables de Transport

GES : Gaz à Effet de Serre

GPS : Global Positioning System

HC : HydroCarbures

INRETS : Institut National de REcherche sur les Transports et leur Sécurité

ITS : Intelligent Transport System (Système de Transport Intelligent

JAT : Juste A Temps

LAURE : Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie

LET : Laboratoire d'Économie des Transports

MEEDDAT : Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire

$\boldsymbol{NO_2}$: Dioxyde d'azote

$\boldsymbol{NO_x}$: Oxyde d'azote

PAM : Point d'Accueil de Marchandises

OD : Origine Destination

PAV : Points d'Accueil des Véhicules

PDU : Plan de Déplacements Urbains

PLU : Plan Local d'Urbanisme

PREDIT : Programme National de Recherche et d'Innovation dans les Transports Terrestres

RO : Recherche Opérationnelle

SO_2 : Dioxyde de Soufre

SRU : loi relative à la Solidarité et au Renouvellement Urbains

SUCCESS : Smaller Urban Communities in Civitas for Environmentally Sustainable Solutions

TMV : Transport de Marchandises en Ville

ZLU : Zone Logistique Urbaine

Bibliographie

A

[ADEME, 2006a] Ademe (2006). Centres de Distribution Urbaine : rationaliser le transport de marchandises en ville. Brochure, Ademe Éditions 4p.

[ADEME, 2006b] Ademe (2006). Les transports de marchandises, quels impacts ? Quelles actions ? Dossier de presse, 7p, 10 mars 2006.

[Aiura et Taniguchi, 2005] Aiura N., Taniguchi E. (2005). Planning On-street loading-unloading spaces considering the behaviour of pickup-delivery vehicles and parking enforcement. Proceedings of the 4th International Conference on City logistics, Langkawi, Malaysia, 2005.

[Albergel *et al.*, 2006] Albergel A., Segalou E., Routhier J-L., De Rham C. (2006). Mise en place d'une méthodologie pour un bilan environnemental physique du transport de marchandises en ville.

[Allen *et al.*, 2003] Allen J., Tanner G., Browne M., Anderson S., Christodoulou G., Jones P. (2003). Modelling policy measures and company initiatives for sustainable urban distribution. Final Technical Report, University of Westminster.

[Ambrosini *et al.*, 1997] Ambrosini C., Patier D., Routhier J-L. (1997). Transport de marchandises en ville, enquêtes quantitatives de Bordeaux, 226p.

[Ambrosini *et al.*, 1999a] Ambrosini C., Patier D., Routhier J-L. (1999). Transport de marchandises en ville, enquêtes quantitatives de Marseille, 120p, 1999.

[Ambrosini *et al.*, 1999b] Ambrosini C., Patier D., Routhier J-L. (1999). Transport de marchandises en ville, enquêtes quantitatives de Dijon, 122p, 1999.

[Ambrosini et Routhier, 2004] Ambrosini C., Routhier J-L. (2004). Objectives, Methods and Results of Surveys Carried out in the Field of Urban Freight Transport : An International Comparison. Transport Reviews, Vol. 24, No. 1, 57–77.

[Ambrosini *et al.*, 2007a] Ambrosini C., Meimbresse B., Routhier J-L., Sonntag H. (2007). Urban Freight Policy Oriented Modelling in Europe. Vision Technology on policy, proceedings of the Citylogistics 2007 conference ICL, Crète, Grèce.

[Ambrosini *et al.*, 2007b] Ambrosini C., Routhier J-L., Sonntag H., Meimbresse B. (2007) Urban freight modelling : a review . WCTR'07 Conference – Berkeley.

[Ang-Olson *et al.*, 2005] Ang-Olson J., Seth Hartley W., Turchetta D. (2005). Impacts of Freight Transportation on Regional Emissions. National Urban Freight Conference, December 2005, Long Beach.

[ATN, 2001] ATN (2001). Modèle générique de simulation pour l'étude prospective à 20 ans de la mobilité urbaine en France. Rapport final de recherché pour la DRAST.

[Awasthi et Delaître, 2008] Awasthi A., **Delaître** L. (2008). Évaluation de politiques pour le fret urbain. Congrès International ATEC-ITS, 6-7 février, Versailles.

B

[Bach et Jordan, 2003] Bach F.R, Jordan M.I. (2003). Learning spectral clustering. Technical Report UCB/CSD-03-1249, EECS Department, University of California, Berkeley, 2003.

[Ballot, 1997] Ballot E. (1997). La simulation industrielle : aide réelle ou virtuelle à la prise de décision Analyses à partir d'une étude de cas. RFGI Vol16 1997.

[Ballot et Molet, 2003] Ballot E., Molet H. (2003). Contribution à l'évaluation du transport capillaire : définition d'unités d'œuvre cohérentes, Revue Française de Gestion Industrielle vol. 22, n°4, 2003.

[Barceló et Hanna Grzybowska, 2005] Barceló J. , Grzybowska Hanna H. (2005). Combining vehicle routing models and microscopic traffic simulation to model and evaluating city logistics applications, Advanced OR and AI Methods in Transportation.

[Bell, 1983] Bell, M. G. H. (1983). The Estimation of an Origin-Destination Matrix from Traffic Counts, Transportation Science, 17(2) :198-217.

[Berry, 2008] Berry J. (2008). DG TREN Logistics Action Plan. Proceedings Bestufs Final Conference, Athens, june 2008.

[BESTUFS, 2004] BESTUFS (2004). Consolidated Best Practice Handbook. PTV Planung Transport Verkehr AG.

[BESTUFS, 2005] BESTUFS (2005). BESTUFS Policy and Research recommandations I. Urban Consolidation Centres, Last Mile solutions. September 2005.

[BESTUFS, 2007] BESTUFS (2007). BESTUFS : Guide de bonnes pratiques pour le transport de marchandises en ville. 2007.

[Bhat *et al.*, 2002] Bhat C., Handy S., Kockelman K., Mahmassani H., Gopal A., Srour I, Weston L. (2002). Development of an Urban Accessibility Index : Formulations, Aggregation, and Application. Research Report Number 4938-4.

[Binsbergen et Visser, 2001] Binsbergen A.V, Visser J. (2001). Innovation Steps Towards Efficient Goods Distribution Systems for Urban Areas, The Netherlands TRAIL Research School, TRAIL Thesis series T2001/5, ISBN 90-407-2179-3.

[Bischoff *et al.*, 1995] Bischoff E. E, Janetz F., Ratcliff M. S. W. (1995a). Loading pallets with non-identical items. European Journal of Operational Research, 84 :681–692, 1995.

[Bischoff, 2006] Bischoff E.E. (2006). Three-dimensional packing of items with limited load bearing strength. European journal of operational research. (2006) 952 – 966.

[Boerkamps et Binsbergen, 1999] Boerkamps J., Binsbergen A.V (1999). GoodTrip - A New Approach for Modelling and Evaluation of Urban Goods Distribution. Urban Transport Systems, 2nd KFB-Research Conference Lund, 1999.

[Bortfeldt et Gehring, 1998] Bortfeldt A., Gehring H. (1998). Applying Tabu Search to Container Loading Problems. Fern Universitat Hagen Technical Report, 1998.

[Boudouin et Morel, 2002] Boudouin D., Morel C. (2002). Logistique Urbaine – l'optimisation de la circulation des biens et services en ville, Programme national "Marchandises en ville", La Documentation Française, p. 15.

[Boudouin, 2006] Boudouin D. (2006). Guide méthodologique : les espaces logistiques urbains. La documentation française, Paris, 2006, 112p.

[Bous, 2001] Bous, D (2001). Feasibility study on the use of the Amsterdam metro system for distribution of goods. BESTUFS Workshop 5 – RailBased Transport : A Disappearing Opportunity or a Challenge for Urban Areas ?, 30th-31st August 2001, DVB-Dresden, Germany.

[Boyce *et al.*, 2002] Boyce D., Lohse D, Nöth F. (2002). Comparisons of Two Combined Models of Urban Travel Choices : Chicago and Dresden. Presentation at the 42nd Congress of the European Regional Science association at the University of Dortmund, Dortmund, Germany, August 27 – 31.

[Boyer, 2004] Boyer C. (2004). Atelier 3 – Évolution des déplacements et acteurs. Espace de livraison de proximité. Expérimentation pilote innovante en matière de distribution urbaine des marchandises. Ecomm 2004 Grand Lyon.

[Browne *et al.*, 2005] Browne M., Sweet M., Woodburn A., Allen J. (2005). Urban Freight Consolidation Centres. Final Report for the Department for Transport . 2nd november 2005.

[Browne *et al.*, 2007] Browne M., Allen J., Nemoto T., Visser J., Wild D. (2007). City restrictions and the implications for goods deliveries. ICL Conference, Crete, July 2007.

[Burmeister, 2000] Burmeister A. (2000). Familles Logistiques propositions pour une typologie des produits transportés pour analyser les évolutions en matière d'organisation des transports et de la logistique. PREDIT Systèmes d'information (2000).

[Button et Pearman, 1981] Button K., Pearman A. (1981). The economics of Urban Freight Transport. Macmillan, London.

C

[CERTU, 2006] CERTU (2006). Transports de marchandises en ville. Le cas de la ville de Langres Une politique innovante pour une petite ville. Collection Les rapports d'étude. Septembre 2006.

[CERTU, 2007] CERTU (2007). Quels véhicules pour quelles logistiquesPlaquette réalisée pour le compte de la DTT/TR2 par Interface Transport, 4p.

[CERTU-ADEME, 1998] CERTU-ADÈME (1998). Plan de déplacements Urbains – Prise en compte des marchandises, pp. 28-30.

[Chevallier, 2002] Chevallier C. (2002). What you can do locally to decrease air pollution and achieve European air quality standards. Fact Sheet November 2002. A breath of fresh air.

[Cholez, 2001] Cholez C. (2001). Constraints and know-how of the deliveryman in urban areas. 9th World Congress on Transport Research, Séoul (Korea), 22-27 Juin, 20p.

[CIVITAS, 2005] http ://www.civitas-initiative.org/main.phtml ?lan=en.

[CIVITAS, 2007] CIVITAS (2007). How to optimise and find solutions in medium-sized cities ? Thematic leadership in Goods distribution. Brochure, 20p.

[CIVITAS – MIRACLES, 2004] CIVITAS – MIRACLES (2004). New concepts for the Distribution of Goods. Demonstrator fact sheet. Barcelona, 1p.

[Claver *et al.*, 1997] Claver J-F., Gélimier J., Pitt D. (1997). Gestion de flux en entreprises, modélisation et simulation. Éditions Hermès, 1997.

[Cohen *et al.*, 1985] Cohen G., Dubois D., Quadrat J.P., Viot M. (1985). A linear-system-theoretic view of discrete-event processes and its use for performance evaluation in manufacturing, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. AC-30, no. 3, pp. 210–220, Mar. 1985.

[COST 321 Action, 1998] European Commission Directorate General Transport (1998). COST 321 Urban Goods Transport, final report, Brussels (European Commission).

[Courrivault, 2004] Courivault J. (2004). Les livraisons en centre-ville, quels problèmes, quelles solutions Mémoire de DESS Transports urbains et régionaux de personnes, ENTPE.

[Crainic *et al.*, 2004] Crainic T. G., Ricciardi N., Storchi G. (2004). Advanced freight transportation systems for congested urban areas. Transportation Research Part C 12 (2004) 119–137.

[Crespo de Carvalho, 2003] Crespo de Carvalho J.M. (2003). Systems Theory, complexity and supply organizational models to enrich city logistics : an approach. ISCTE University of Lisbon, Portugal. Logistics systems for sustainable cities, p179-189. Elsevier publication.

[Cybernetix, 2002] Cybernetix (2002). CITY FREIGHT Inter- and Intra- City Freight Distribution Networks Work package 1 : Annex report France. Comparative survey on urban freight, logistics and land use planning systems in Europe.

D

[Dablanc, 1997] Dablanc L. (1997). L'invisibilité juridique du transport des marchandises en ville. Les Cahiers Scientifiques du Transport Numéro 31/1997 - Pages 5-29.

[Dablanc, 1998] Dablanc L. (1998). Le transport des marchandises en ville : une gestion publique entre police et service, Paris, Éditions Liaisons, octobre 1998, 182p.

[Dablanc et Thévenon, 2000] Dablanc L., Thévenon J. (2000) Les marchandises et le commerce dans les PDU : enjeux d'intégration, enjeux de mise en œuvre, Congrès ATEC, Presses de l'ENPC, Paris, p. 103 -108.

[Dablanc et Patier, 2001] Dablanc L., Patier D. (2001). Les rythmes urbains de marchandises, revue TEC, juillet-aout, pp. 2-14.

[Dablanc et Bossin, 2002] Dablanc L., Bossin P. (2002). Éléments pour le montage juridique d'un Centre de Distribution Urbaine (C.D.U.), Rapport GART INTERFACE TRANSPORT, 10p.

[Dablanc, 2007a] Dablanc L. (2007). Qualité de l'air et transport de marchandises : les villes peuvent agir. Les fiches d'actualité de l'INRETS n°4, 2007, 2p.

[Dablanc, 2007b] Dablanc L. (2007). La notion de développement urbain durable appliquée au transport des marchandises. Les Cahiers Scientifiques du Transport, n°51/2007- Pages 97-126.

[Dablanc et Routhier, XXXX] Dablanc L., Routhier J-L. (XXXX). La partie urbaine de la chaîne de transport premiers enseignements tirés de l'enquête ECHO. Enquête « ECHO » Les apports des enquêtes chargeurs pour la connaissance des chaînes de transport de marchandises et de leurs déterminants logistiques. Les Collections de l'INRETS Actes n° 120, Lavoisier, à paraître.

[De Rosnay, 1996] De Rosnay J. (1996). Une approche systémique de l'énergie. Conférence FIFEL. Lausanne, 12 novembre 1996.

[Debauche et Duchateau, 1998] Debauche W., Duchateau H. (1998). Urban Freight Transport Strategy in Brussels. Loughborough (UK) PTRC September 1998.

[Delaître *et al.*, 2007a] **Delaître** L., Orsini S., Breuil D., Molet H. (2007). Approche globale pour l'optimisation du transport de marchandises dans les agglomérations de taille moyenne, Revue TEC 193.

[Delaître *et al.*, 2007b] **Delaître** L., Awasthi A., Molet H., Breuil D. (2007). A multiple container loading problem based algorithm for efficient allocation of Goods to Vehicles. Modelling and Simulation. IASTED 2007, 28th-1st june 2007, Montréal, Canada.

[Delaître *et al.*, 2007c] **Delaître** L., Awasthi A., Molet H., Breuil D. (2007). Un algorithme d'affectation de marchandises aux véhicules pour la simulation du transport de marchandises en ville. 7ème Congrès International de Génie Industriel 5-8 juin 2007 Trois Rivières Canada.

[Delaître *et al.*, 2007d] **Delaître** L., Molet H., Roque M., Breuil D. (2007). Caractérisation d'une ville de taille moyenne pour l'optimisation du transport urbain de marchandises. Journées nationales MACS 9-10 juillet 2007 Reims.

[Delaître *et al.*, 2007e] **Delaître** L., Breuil D., Molet H. (2007). Vers une démarche globale d'optimisation de la logistique urbaine : fondements et position. Revue Française de Gestion Industrielle RFGI Vol. 28, N 3 - Septembre 2007.

[Delaître *et al.*, 2007f] **Delaître** L., Awasthi A., Breuil D., Molet H. (2007). An entropy based characterization of medium sized cities for selecting urban freight solution. National Urban Freight Conference - December 4 – 5, 2007, Westin Long Beach Hotel Long Beach, CA 90802.

[Delaître *et al.*, 2008a] **Delaître** L., Awasthi A., Breuil D., Molet H. (2008). Systems Science for selecting urban freight solution : Application to La Rochelle. RCIS 2008 IEEE International Conference on Research Challenges in Information Science, June 3-6 2008, Marrakech.

[Delaître *et al.*, 2008b] **Delaître** L., Molet H., Breuil D. (2008). Which Innovative Concepts for the last miles. Logistics Research Network annual Conference 2008 LRN'08. 10-12 September 2008. University of Liverpool, UK.

[Delaître *et al.*, 2008c] **Delaître** L., Molet H., Breuil D. (2008). Outil de simulation pour le diagnostic des aires de livraison : Le cas de La Rochelle. Revue Internationale de Recherche Transport Sécurité (RTS) n° 99 avril-juin 2008, p105-121.

[Donnadieu et Karsky, 2002] Donnadieu G., Karsky M. (2002). La SYSTEMIQUE : penser et agir dans la complexité. Des concepts aux applications en entreprise, management, économie, écologie, biologie, psychologie, sociologie, ethnologie,... Éditions Liaisons, septembre 2002.

[Doumeingts, 1984] Doumeingts G. (1984). La méthode GRAI, Thèse d'État, Université de Bordeaux I, 1984.

[Doumeingts et Vallespir, 1994] Doumeingts G., Vallespir B. (1994). Gestion de production : principes. Collection techniques de l'ingénieur 1994.

[Dufour et Patier, 1997] Dufour J., Patier D. (1997). Introduction to the discussion based on the experience of the French experimental and research programme, ECMT Round Table 108, Freight Transport and the City, Paris.

[Dyckhoff, 1990] Dyckhoff H. (1990). A typology of cutting and packing problems. European Journal of operational Research 44 (1990) 145-159.

E

[Eggleston *et al.*, 1993] Eggleston H.S, Gorissen N., Joumard R., Rijkeboer R.C., Samaras Z., Zierock K.H. (1993). CORINAIR Working group on Emission Factors for Calculating 1990 Emissions from Road Traffic. Volume 1 : Methodology and Emissions Factors, Report EUR 12260 EN.

[ELCIDIS, 2002] ELCIDIS (2002). European Commission Directorate General for Energy and Transport, final report.

[Eley, 2002] Eley M. (2002). Solving container loading problems by block arrangement. European Journal of Operational Research 141 (2002) 393–409.

[Emberger, 2004] Emberger G. (2004). PLUME Synthesis Report : Urban Freight Transport measures Project Contract n^o EVK4-CT-2002-20011.

[Eriksson, 1996] Eriksson J.R. (1996). Urban freight transport forecasting - an empirical approach. Urban Transport and the Environment II, Computational Mechanics Publications, Ashurst, pp 359-369.

F

[FMVM, 1988] Fédération des Maires des Villes Moyennes http ://www.villesmoyennes.asso.fr/fr/index.php.

[Forrester, 1961] Forrester J.W. (1961). Industrial Dynamics, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

[Friedrich *et al.*, 2003] Friedrich M., Haupt T., Nökel. K. (2003). Freight Modelling : Data Issues, Survey Methods, Demand and Network Models. 10th International Conference on Travel Behaviour Research Lucerne, 10-15 August 2003.

[FTA, 2007] FTA : Freight Transport Association (2007). Delivering London.4p.

[Fusco, 2003] Fusco G. (2003). Un modèle systémique d'indicateurs pour la durabilité de la mobilité urbaine : les cas de Nice et Gênes dans une comparaison internationale. Thèse de doctorat Université de Nice-Sophia Antipolis.

G

[GART, 2004] GART (2004). Guide technique et juridique pour les livraisons en ville. Celse Paris. ISBN 2 85009 261 4.

[Gehring et Bortfeldt, 1997] Gehring H., Bortfeldt A. (1997). A genetic algorithm for solving the container loading problem. International Transactions in Operational Research, 44, 1997, 401-418.

[Gendreau *et al.*, 2004] Gendreau M., Laporte G., Semet. F. (2004). Heuristics and lower bounds for the bin packing problem with conflicts. Computers and Operations Research (2004) 347 – 358.

[Gentile *et al.*, 2007] Gentile G., Rosini R., Vigo D. (2007). Modelling city logistics in Emilia-Romagna : from the CityPorts project to the CityGoods software, BESTUFS II WP3, round table n°3 Application fields, use cases and opportunities, Bruxelles, 03.05.07.

[Geroliminis et Daganzo, 2005] Geroliminis N., Daganzo C. F. (2005). A review of green logistics schemes used in cities around the world.

[Gorys et Hausmanis, 1999] Gorys J., Hausmanis I. (1999). A strategic overview of goods movement in the Great Toronto Area, Transportation Quarterly 53 (2).

[Greenshield, 1935] Greenshield B.D. (1935). A study of traffic capacity. Proceedings of the Highway Research Board, 14 :448-477, 1935.

H

[Harris et Liu, 1998] Harris R. I., Liu A. (1998). Input-Output modelling of the urban and regional economy : the importance of external trade. Regional Studies, 32 (9).

[He et Crainic, 1998] He S., Crainic T.G. (1998). Freight transportation in congested urban areas : issues and methodologies. Proceedings 8th World Conference on Transport Research, Antwerp, Belgium.

[Hilbers et Verroen, 1993] Hilbers H.D., Verroen E.J. (1993). Measuring Accessibility, A Key Factor in Transport & Land Use Planning Strategies, PTRC Education and Research Services Ltd.

[Ho, 1992] Ho Y.C. (1992). Discrete Event Dynamic Systems : Analyzing Complexity and Performance in the Modern World. Piscataway, New Jersey : IEEE Press, 1992.

[Holguín-Veras et Thorson, 2000] Holguín-Veras J., Thorson E. (2000). General Patterns of Freight Movements in the NYMTC Region. Report prepared for the New York Metropolitan Transportation Council.

[Hutchinson, 1974] Hutchinson B.G (1974). Principles of urban transport systems planning. McGraw-Hill.

I

[IAURIF, 2004] IAURIF (2004). Note rapide sur les transports n°362. Le transport de marchandises par véhicule utilitaire léger en Ile de France. Octobre 2004.

[Interface Transport, 2002] Interface Transport (2002). Mieux gérer le stationnement pour les livraisons : L'expérimentation Rapido à Lyon. Mai 2002.

[Interface Transport, 2003] Interface Transport (2003). ELCIDIS plate-forme logistique et de services - Rapport final.

[Interface Transport, 2004] Interface Transport (2004). Espaces Logistiques Urbains de Monaco et La Rochelle. Éléments pour un guide méthodologique. Étude ADEME n° 0303C0070 36p.

[Interface Transport, 2006] Interface Transport (2006). Les Centres de Distribution Urbaine : quels outils d'évaluation environnementale ? Plaquette (4p) réalisée pour le compte de l'ADEME.

[Interface Transport, 2008] Interface Transport (2008). Guide d'aménagement et de dimensionnement des aires de livraisons. Ouvrage CERTU à paraître.

[Inregia, 2003] Inregia (2003). DISTRA pre-study on modelling local/regional distribution and collection traffic. Rapport TNO-INRO Statistics, Suède, Rev-04-29.

J

[Juraitis *et al.*, 2006] Juraitis M., Stonys T., Starinskas A., Jankauskas D., Rubliaukas D. (2006). A Randomized Heuristic for the Container Loading Problem : Further Investigations. ISSN 1392 – 124X INFORMATION TECHNOLOGY AND CONTROL Vol 35, No 1.

K

[Köhler et Strauß, 1997] Köhler, Strauß (1997). City-Logistics concept in Kassel. 25th European Transport. Forum, proceedings of seminar B : Freight, volume P412, London, (PTRC), pp. 97-101.

L

[Le Baccon et Delaître, 2008] Le Baccon G., **Delaître L.** (2008). Développement d'un outil de simulation d'aires de livraison : DALSIM (Delivery Areas and Logistics SIMulation). Rapport de stage IUT Informatique de La Rochelle, juin 2008.

[Le Moigne, 1994] Le Moigne J-L, (1994). La théorie du système général – théorie de la modélisation. Éditions Presses Universitaires de France, 4ème édition.

[Lebart *et al.*, 2000] Lebart L., Morineau A., Piron M. (2000). Statistique Exploratoire Multidimensionnelle, Dunod, 2000.

[Lepetit et Pumain, 1993] Lepetit B., Pumain D. (1993). Temporalités Urbaines, Collection Villes, Paris : Anthropos.

[LET, 2001] LET Laboratoire d'Économie des Transports (2001). Mesurer l'impact du transport de marchandises en ville ? - le modèle de simulation FRETURB (version 1). METL, LET, ADEME. 2001. 104 p.

[Levifve, 2008] Levifve H. (2008). Le transport de marchandises à Paris et le besoin en sites logistiques. Revue TEC n°198 avril-juin 2008.

[List et Turnquist, 1994] List G., Turnquist M. (1994). Estimating Multi-Class Truck Flow Matrices in Urban Areas.73rd Annual Meeting of the Transportation Research Board.

M

[Mairie de Paris, 2003] Marie de Paris (2003). La stratégie de la ville de Paris en matière de transports de marchandises. Présentation d'un service de livraisons terminales par vélos triporteurs électriques pour les arrondissements centraux de Paris. Conférence de Presse. 15 mai 2003.

[Manuelle, 2006] Manuelle G. (2006). L'expérience de LA PETITE REINE comme interlocuteur privilégié des professionnels du transport et des collectivités locales pour l'organisation des livraisons dites «finales» en centre-ville. Ateliers du développement durable. Bordeaux 2006, «Comment réduire l'impact des transports sur les gaz à effet de serre ? »

[McKinnon, 1999] McKinnon Alan C. (1999). A logistical perspective on the fuel efficiency of road freight transport, IEA workshop "Improving fuel efficiency in road freight transport : the role of information technologies", Paris, France, 24 February 1999.

[Meimbresse et Sonntag, 2000] Meimbresse B., Sonntag H. (2000). Modelling urban commercial traffic with the model WIVER. p94-106. Treizièmes Entretiens Jacques Cartier Montréal.

[Meimbresse et Sonntag, 2007] Meimbresse B., Sonntag H. (2007). Bestufs II Work package 3 Urban Freight data Harmonisation and Modelling. 3rd round table 2007.

[Merlin, 1991] Merlin P. (1991). Géographie, économie et planification des transports, Paris : Presses Universitaires de France.

[Ministère, 2003] Ministère de l'environnement (2003). Plan "Véhicules propres". Lundi 15 septembre 2003, Hôtel de Matignon, 17p.

[Ministère, 2006] Ministère des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer http ://www.tmv.transports.equipement.gouv.fr/

[Molet, 1999] Molet H. (1999). Comment maîtriser sa productivité industrielle. Presses de l'École des Mines de Paris, 196p, septembre 1999.

[Morin, 1981] Morin E. (1981). Peut-on concevoir une science de l'autonomie ?, Cahiers internationaux de sociologie, vol XXI, n^o spécial "Les sociologues".

[MOSCA, 2001] MOSCA (2001). Project presentation. Brochure 2001.

[MRTE *et al.*, 2000] MRTE/CERTU/GART/ADEME (2000). « PDU et Marchandises en ville ».

[Munuzuri *et al.*, 2004] Munuzuri J., Larraneta J., Onieva L., Cortes P. (2004). Estimation of an origin-destination matrix for urban freight transport. Application to the city of Seville. In : Logistics systems for sustainable cities eds. E. Taniguchi and R. G. Thompson, Elsevier.

[Munuzuri *et al.*, 2005a] Munuzuri J., Larraneta J., Onieva L., Cortes P. (2004) (2005) Solutions applicable by local administrations for urban logistics improvement. Cities, Vol. 22, No. 1, p. 15–28, 2005.

[Munuzuri *et al.*, 2005b] Munuzuri J., Larraneta J., Ibanez J.N. (2005). Routing of delivery vehicles in a city with access time windows, In : Brebbia, C.A, Wadh,a L.C, Urban Transport XI Urban Transport and the Environment in the 21st Century. Wessex Institute of Technology Press, Southampton, Grande-Bretagne.

O

[OECD, 2003] OECD (2003). Delivering the goods, 21st century challenges to urban goods transport.

[Ogden, 1978] Ogden K.W. (1978). The Distribution of Truck Trips and Commodity Flow in Urban Areas : A Gravity Model Analysis. Transportation Research 12(2) pp 131-137.

[Ogden, 1992] Ogden K.W (1992). Urban Goods Movement. Ashgate. ISBN 1-85742-029-2.

[Oppenheim, 1993] Oppenheim N. (1993). A Combinated, Equilibrium Model of Urban Personal Travel and Goods Movements. Transportation Science Volume 27, No. 2 pp 161-171.

[Oppenheim, 1994] Oppenheim N. (1994). Urban Travel Demand Modeling. John Wiley & Son, New York.

[Orfeuil, 2000] Orfeuil J-P. (2000). Stratégies de localisation Ménages et services dans l'espace urbain. La documentation française-Paris, 2000, 75p.

[Ortúzar et Willumsen, 1994] Ortúzar J. de D., Willumsen L.G. (1994). Modelling Transport, Chichester :Wiley.

P

[Paglione, 2006] Paglione G. (2006). City logistics : the need for a behavioural model. Società Italiana degli Economisti dei Trasporti – VIII Riunione Scientifica – Trieste 2006.

[Patier et Routhier, 1997] Patier D, Routhier J-L (1997). Les livraisons de marchandises en ville. Revue TEC, 145, Nov-Dec. 1997, pp. 8-14.

[Patier *et al.*, 2000] Patier D., Routhier J-L., Ségalou E., Gérardin B. (2000). Diagnostic du transport de marchandises dans une agglomération, DRAST-METL, 85 p., avril 2000.

[Patier *et al.*, 2004] Patier D., Cholez C., Routhier J-L., Ambrosini C. (2004). Méthodologie des enquêtes "Tournées dans les agglomérations urbaines". Rapport final, volet 1. 2004. 37 p.

[Pirie, 1979] Pirie (1979). Measuring accessibility : a review and proposal. Environment and Planning A, vol. 11, pp. 299-312.

[Pisinger, 2002] Pisinger D. (2002). Heuristics for the container loading problem. European Journal of Operational Research 141, 292–382.

[PREDIT, 2005] PREDIT GO3 GO4 (2005). Livre des Projets, Marchandises : Connaissance et Technologies.

[PREDIT, 2008] PREDIT GO5 (2008). Méthodologie d'évaluation des innovations en matière de logistique urbaine. Rapport final version provisoire, document confidentiel. Auteurs F. Henriot, D. Patier, P. Bossin et B. Gérardin, 49 pages.

R

[Regan et Garrido, 2000] Regan A.C., Garrido R.A. (2000). Modeling Freight Demand and Shipper Behaviour : State of the Art, Future Directions. Preprints of IATBR, Sydney.

[Robinson et Mortimer, 2004] Robinson M., Mortimer P. (2004). Urban Freight and Rail : The State of Art. Focus February 2004 Bestufs Articles.

[Roboam, 1993] Roboam M. (1993). La méthode GRAI : Principes, outils et démarche pratique, Édition TEKNA, 1993.

[Roque *et al.*, 2007] Roque M., **Delaître L.**, Orsini S., Breuil D., Molet H. (2007). Étude des comportements des artisans de la CAPEB liés au transport de marchandises en ville : Le cas de La Rochelle.

[Routhier, 2002] Routhier J-L (2002). Du transport de marchandises en ville à la logistique urbaine. Centre de Prospective et de veille scientifique. 2002. 67 p. (2001 plus - Synthèses et Recherches, n° 59).

[Routhier et Toilier, 2007] Routhier J-L., Toilier F. (2007). FRETURB V3, a policy oriented software tool for modelling urban goods movement, 11th WCTR, Berkeley, CA, USA.

[Rupprecht Consult, 2005] Rupprecht Consult (2005). Sustainable Urban Transport Plan and urban environment : Policies, effects, and simulations. Review of European references regarding noise, air quality and CO2 emissions. Final Report, 10 October 2005.

[Ruske, 1994] Ruske W. (1994). City Logistics – Solutions for urban commercial transport by cooperative operation management. In : OECD Seminar on Advanced Road Transport Technologies, Omiya, Japan (OECD).

[Russo et Comi, 2004a] Russo F., Comi A. (2004). A state of the art on urban freight distribution at European scale. Ecomm 2004.

[Russo et Comi, 2004b] Russo F., Comi A. (2004). A modelling system to link end-consumers and distribution logistics. European Transport Trasporti Europei n°28 (2004) : 6-19.

[Russo et Comi, 2005] Russo F.,Comi A. (2005). Demand models for city logistics : a state of the art and a proposed integrated system. Proprints of 4th City Logistics Conference, Langkawi, Malaysia.

S

[Salini, 2000] Salini P. (2000). La dynamique des systèmes : retour sur une expérience d'application aux transports de marchandises". Les Collections de l'Inrets.

[Sarramia, 2002] Sarramia D. (2002). ASCI-mi : une méthodologie de modélisation multiple et incrémentielle. Application aux systèmes de trafic urbain. Thèse de doctorat, université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II. Déc. 2002.

[Savy, 1998] Savy M. (1998). Projet REDEFINE Activité économique et trafic routier de fret : le cas français. Marne-la-vallée, ENPC, 1998.- 22 p.

[Schoemaker *et al.*, 2006] Schoemaker J., Allen J., Huschebeck M., Monigl J. (2006). Quantification of Urban Freight Transport Effects I. Best Urban Solutions II Octobre 2006.

[Shannon et Weaver, 1949] Shannon C.E, Weaver W. (1949). The Mathematical Theory of Communication. Urbana, University of Illinois Press. 1949.

[Simon, 1976] Simon H.A. (1976). Sur la complexité des systèmes complexes. Les introuvables en langue française de Herbert A. Simon (document n°6)- Université Carnegie-Mellon, Pittsburgh.

[Slavin, 1979] Slavin H.L. (1979). The transport of goods and urban spatial structure. University of Cambridge.

[Southworth, 1995] Southworth F. (1995). A Technical Review of Urban Land Use-Transportation Models as Tools for Evaluating Vehicle Travel Reduction Strategies. National Transport Library.

[Sterman, 2006] Sterman J. D., (2006). Learning from Evidence in a Complex World. American Journal of Public Health March 2006, Vol 96 N°3. p 505-514.

[SUTP, 2007] Sustainable Urban Transport Plans (2007) Preparatory Document in relation to the Follow-up of the Thematic Strategy on the Urban Environment, Annex, EC, September 2007.

T

[Taniguchi *et al.*, 1999] Taniguchi E., Noritake M., Yamada T. Izumitani T. (1999). Optimal size and location planning of public logistics terminals. Transportation Research Part E 35, Pergamon.

[Taniguchi *et al.*, 2001] Taniguchi E., Thompson R. G., Yamada T., Duin R.V. (2001). City Logistics, Network Modelling and Intelligent Transport Systems, PERGAMON.

[Taniguchi et Thomson, 2002] Taniguchi E., Thomson R.G. (2002). Modelling city logistics. Transportation Research Record, 1790 paper n°02-2659 : 45-51.

[Tavasszy, 2006] Tavasszy L.A. (2006). Freight modelling – An overview of international experiences. Paper prepared for the TRB Conference on Freight Demand Modelling : Tools for Public Sector Decision Making, September 25-27, 2006, Washington DC.

[Taylor, 1997] Taylor S.Y. (1997). A Basis for Understanding Urban Freight and Commercial Vehicle Travel", ARRB Transport research Report, ARR300.

[TFL, 2007] TFL Transport For London (2007). London Freight Plan. Sustainable freight distribution : a plan for London. 108p.

[Transitec, 2003] Transitec (2003). Étude marchandises pour le centre-ville d'Arras, Communauté urbaine d'Arras, avril 2003, 66p.

V

[Victoria Transport Policy Institute, 2006] Victoria Transport Policy Institute, Litman T. (2006). London Congestion Pricing, Implications for Other Cities. 10 January 2006.

[Visser *et al.*, 1999] Visser J., Binsbergen A.V., Nemoto T. (1999). Urban freight transport policy and planning. First International Symposium on City Logistics, Cairns, Australia.

[Visser, 2000] Visser J. (2000). City Logistics and the strategic options for the future, dans Taniguchi, E. (ed.) City Logistics 2000, Kyoto (Institute for City Logistics).

W

[Wegener, 1998] Wegener M. (1998). Applied Models of Urban Land Use, Transport and Environment. State of the Art and Future Developments, in "Network Infrastructure and the Urban Environment : Recent Advances in Land Use/Transportation Modelling", ed. par L. Lundqvist, L.-G. Mattson et T.J. Kim, Berlin-Heidelberg-New York : Springer Verlag, p. 245-267.

[Wisetjindawat et Sano, 2003] Wisetjindawat W., Sano K. (2003). A behavioral modeling in micro-simulation for urban freight transportation. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.5, October, 2003.

Y

[Yannis *et al.*, 2006] Yannis G., Golias G., Antoniou C. (2006). Effects of Urban Delivery restriction on Traffic Movements. Transportation Planning and Technology, August 2006 Vo. 29, No. 4 p295-311.

[Ygnace, 2007] Ygnace J-L. (2007). Les Systèmes de Transport Intelligent : entre promesse technologique et outil des politiques de transport. Réflexions sur les tendances et les enjeux. Congrès International ATEC ITS, Issy-les-Moulineaux, janvier 2007.

Annexe A

Spécifications approfondies du premier module de DALSIM

DALSIM a été développé une première fois sous forme de prototype en Visual Basic couplé d'une base de données ACCESS pour le premier module et VENSIM pour le second module. Le module 1 a fait l'objet d'un développement supplémentaire. Dans cette partie, nous décrivons l'apport du développement dit « industriel ». Gaël Le Baccon a contribué au développement de cette version. Beaucoup d'informations sont issues de son rapport de stage [Le Baccon et Delaître, 2008].

A.1 Diagrammes de classes

Dans la Figure A.1 nous retrouvons les propriétés suivantes :

Une rue « tbl_rue » est caractérisée par un intitulé de rue et une largeur, pour localiser la rue deux points sont utilisés, un point de début et un point de fin. Le seul attribut utilisé par le prototype est l'intitulé de la rue, les autres étant pour une future extension.

Dans une rue nous avons des activités « tbl_activite » caractérisées par un intitulé et un attribut « appartenance » celui-ci permet de savoir si l'activité appartient aux voisinages d'une aire de livraison, nous avons aussi des aires de livraison « tbl_aire » caractérisées par un at-

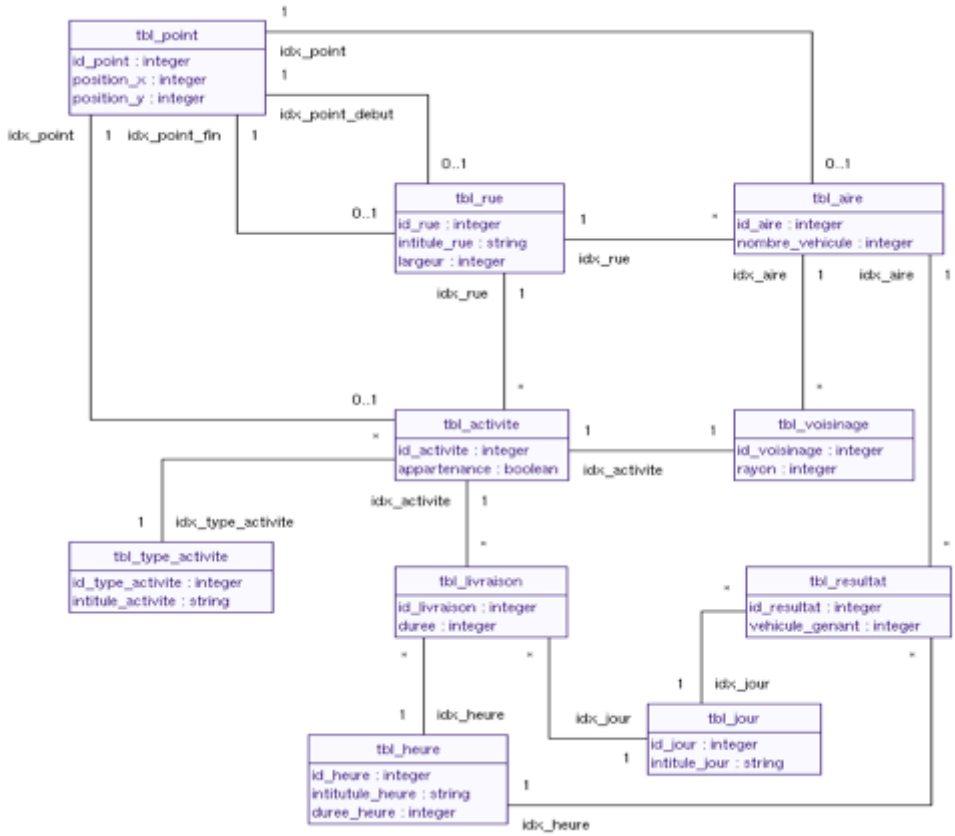


FIG. A.1 – Diagramme de classes de la version prototype du premier module

tribut « nombre_véhicule » qui est la capacité maximale de véhicules qui peuvent stationner dessus. Une activité est associée à un type d'activité « tbl_type_activité » caractérisé par un intitulé comme par exemple « Restaurant ». Les activités et les aires sont localisées par un point « tbl_point » de coordonnées x et y.

La table « tbl_voisinage » permet de faire le lien entre les activités et une aire, cela veut dire que les véhicules de marchandises qui livrent ces activités utilisent l'aire associée. Chaque activité concerne des livraisons « tbl_livraison » programmées dans la semaine un jour donné « tbl_jour », pendant une tranche horaire « tbl_heure » et dure un certain temps « duree ». Un jour est caractérisé par un intitulé « intitule_jour » (par exemple MARDI). Une heure est caractérisée par un intitulé « intitule_heure » (par exemple : 8h - 9h) et une durée « duree_heure ».

Les résultats « tbl_resultat » permettent de comptabiliser le nombre de véhicules gênants d'une aire de livraison pour un jour de la semaine donné et pendant une tranche horaire pour

faire le lien avec le deuxième module. La Figure A.2 représente le diagramme de classe du premier module de DALSIM sous une version retravaillée et approfondie.

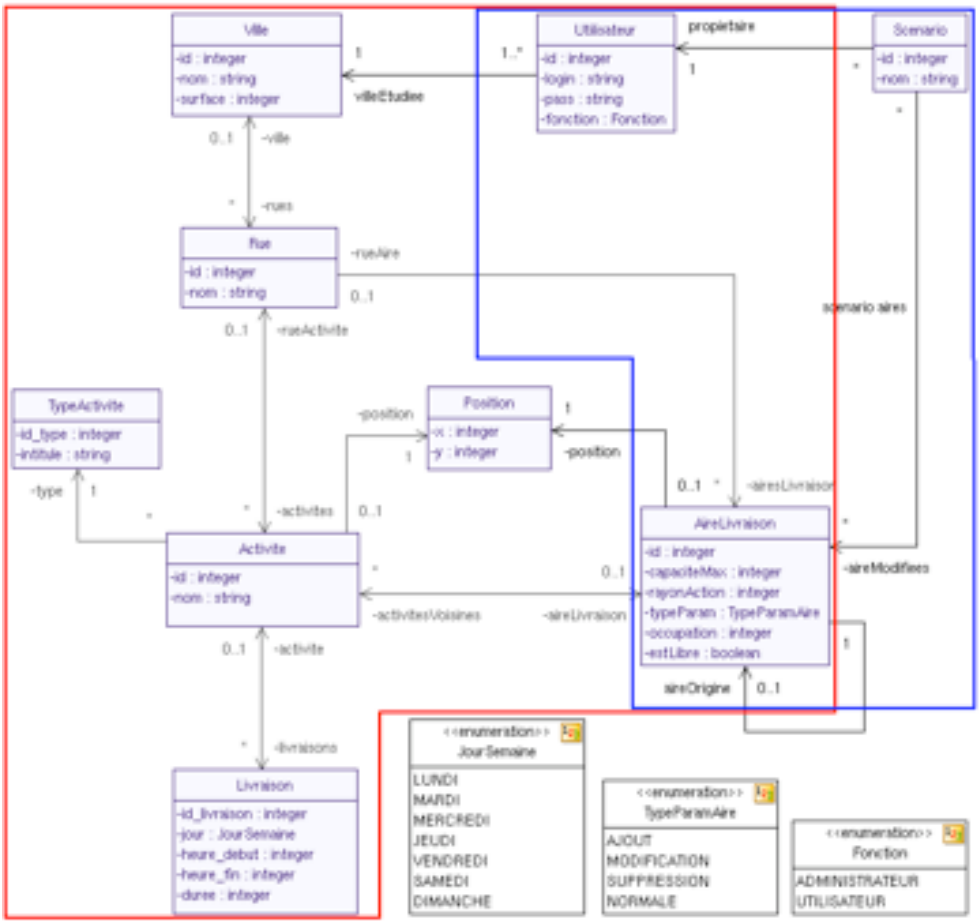


FIG. A.2 – Diagramme de classes de la version industrielle du premier module

Le modèle de données est composé de deux parties. La première partie (couleur rouge) est l'ensemble des classes permettant de sauvegarder le plan original de chaque ville. Ces villes, une fois construites ne changent jamais sauf si l'administrateur effectue une mise à jour lorsqu'il constate qu'une nouvelle activité ou une aire de livraison s'est implantée dans la ville.

Une « Ville » porte un nom unique et occupe une certaine surface (au moins pour l'étude), pour circuler à l'intérieure d'une ville il faut un réseau de rues. Les « Rue » d'une ville ne portent pas deux fois le même nom, en revanche elles peuvent avoir le même nom dans deux villes différentes. Une aire de livraison « AireLivraison » est localisée par une « Position »de coor-

données x et y, elles permettent au livreur de stationner pendant sa livraison sans gêner la circulation, mais une aire de livraison a une capacité limitée en termes de véhicules. De plus une aire est utilisée pour la livraison de 0 ou plusieurs activités, pour savoir quelles activités utilisent une aire de livraison on attribut à cette dernière un rayon d'action (de voisinage). De même une « Activite », caractérisée par un « Type d'activité » (bar, restaurant, . . .) et par un nom unique, se situe dans une rue en position x et y, elle peut se situer dans le rayon d'action d'une aire de livraison. Une activité peut très bien se trouver dans plusieurs rayons d'actions d'aires différentes, dans ce cas elle utilisera l'aire la plus proche.

Une « Livraison « se fait un jour de la semaine, dans une tranche horaire (heureDebut et heureFin) et pour une durée moyenne.

La deuxième partie concerne la persistance des scénarios imaginés par les utilisateurs (couleur bleu). En effet un utilisateur peut créer son propre scénario et l'enregistrer si celui-ci est pertinent, ce qui lui permet de relancer la simulation à tout moment. Par contre, il peut ajouter, modifier ou supprimer des aires de livraisons.

Un « Scénario » est en fait l'ensemble des modifications effectuées sur une seule ville (au niveau des aires de livraison), il porte un nom unique donné par l'utilisateur qui est alors le propriétaire du scénario.

L'attribut typeParam de la classe « AireLivraison » permet de savoir quel est le type de l'aire : ajout ('A'), modification ('M'), suppression ('S') ou normale ('N'). Une aire normale est une aire créée par l'administrateur, elle est donc une aire du plan original. Les autres types d'aires sont créés par l'utilisateur. Dans le cas d'un ajout, on doit avoir la capacité maximale, le rayon d'action, les coordonnées et la rue de la nouvelle aire de livraison. Dans le cas d'une modification ou d'une suppression, on doit avoir les mêmes attributs que précédemment et l'aire d'origine pour connaître l'aire ainsi modifiée.

Un utilisateur peut être propriétaire de plusieurs scénarios ainsi qu'une ville peut être étudiée par plusieurs utilisateurs. L'« Utilisateur » peut charger une ville ou un scénario si celui c'est correctement identifié par son login et mot de passe. Cette fonction permet d'autoriser ou non l'accès à l'interface administrateur. Les attributs occupation et estLibre servent pendant la simulation, le premier pour savoir le nombre de véhicules actuellement sur l'aire de livraison et le deuxième pour savoir si elle est libre. Ces deux derniers attributs ne sont pas enregistrés. Ce modèle permet de garder le plan original de chaque ville tout en autorisant des modifications

que l'on sauvegarde séparément.

A.2 Diagramme de Flux

La Figure A.3 représente le diagramme de flux du premier module de DALSIM. L'administrateur met à disposition de l'utilisateur ou d'un enquêteur externe un modèle de fichier lui permettant de saisir les informations sur chaque activité de la ville qu'il étudie. Dans ce fichier, il y a plusieurs champs : le nom de l'activité, son type, sa rue, ses coordonnées ou son secteur (morceau du plan) et les différentes livraisons qui lui sont associées. Pour chaque livraison il y a le jour de la semaine, la tranche horaire et la durée. L'utilisateur rempli le fichier et l'envoie à l'administrateur qui va ensuite l'importer dans l'application. L'administrateur peut gérer les différents objets (activité, type d'activité, aire, rue, ville, livraison) soit en les saisissant, soit en les modifiant ou soit en les supprimant. Une fois les plans des villes construits, un utilisateur peut consulter le plan d'une ville et changer les aires de livraison afin d'avoir divers scénarios. Chaque scénario peut être enregistré, pour cela l'utilisateur fournit un nom. Il peut ensuite lancer une simulation et interpréter les résultats obtenus.

A.3 Interfaces

Deux types d'interface sont disponibles : l'interface pour l'administrateur (Figure A.4) et l'interface pour l'utilisateur (Figure A.5) . La barre de menu permet de gérer les différents éléments (ville, rue, etc.). Le menu Activité contient le sous menu Type d'activité qui permet de gérer les types d'activités. La barre d'outils possède 3 boutons. Ces boutons bleus et rouge permettent de placer respectivement une aire de livraison et une activité avec la souris. Les coordonnées de la boite de dialogue d'ajout seront pré-remplies. Le premier bouton (flèche) permet d'enlever l'outil en cours. Le zoom se fait à la molette de la souris, il permet d'avoir une plus grande précision pour placer les activités et les aires à la main (zoom avant) ou d'avoir une vue globale du plan (zoom arrière). Lorsque l'on grossit l'image, les détails des activités et des aires s'affichent. La Figure A.5 montre par exemple l'affichage des noms d'activités au dessus de 150% de zoom.

Dans le menu Application l'administrateur peut passer en mode utilisateur, l'interface est

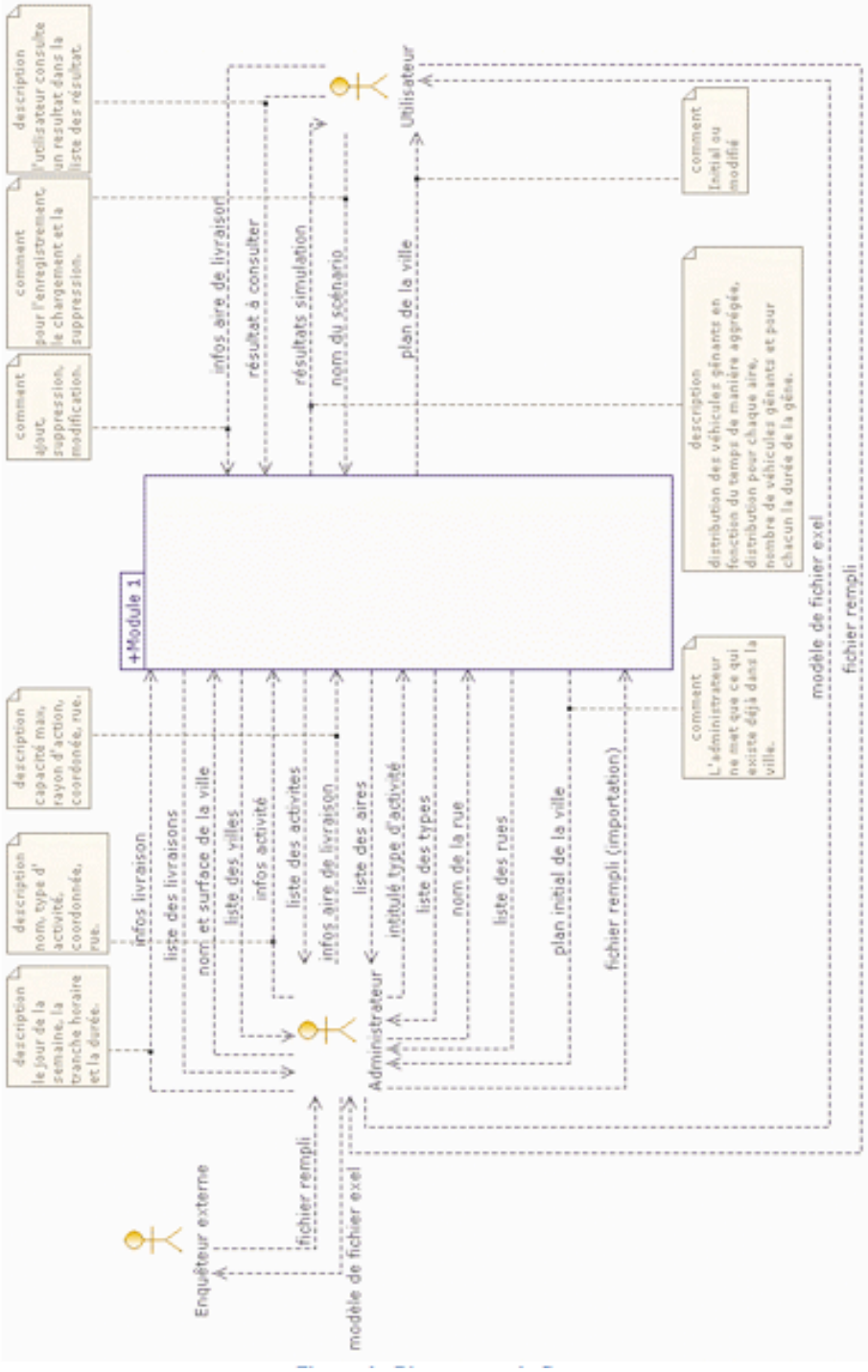


FIG. A.3 – Diagramme de flux du premier module de DALSIM

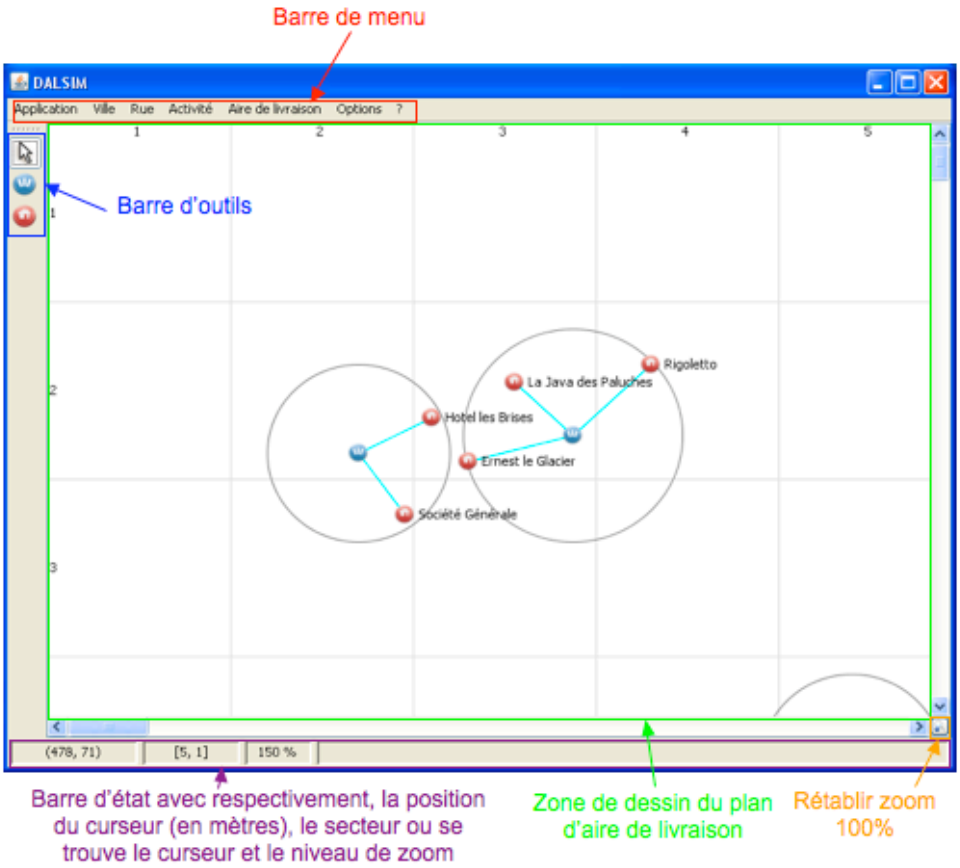


FIG. A.4 – Vue de l'interface pour l'administrateur

alors redessinée. Le menu « Options » offre la possibilité d'afficher une grille de quadrillage dimensionable à volonté, d'afficher les liaisons entre une aire et ses activités voisines et la carte du SIG de la ville si elle est disponible.

Le menu et la barre d'outils de l'interface utilisateur sont différents de ceux de l'administrateur. A partir du menu Ville, l'utilisateur peut uniquement charger une ville. Le menu Scénario lui permet de gérer ses scénarios et le menu Simulation permet de lancer une simulation et de consulter les résultats. La barre d'outils a aussi changé. Les deux boutons rouge et bleu ont disparu et ont fait place a un nouveau bouton violet, il permet d'ajouter une aire « modifiée ».

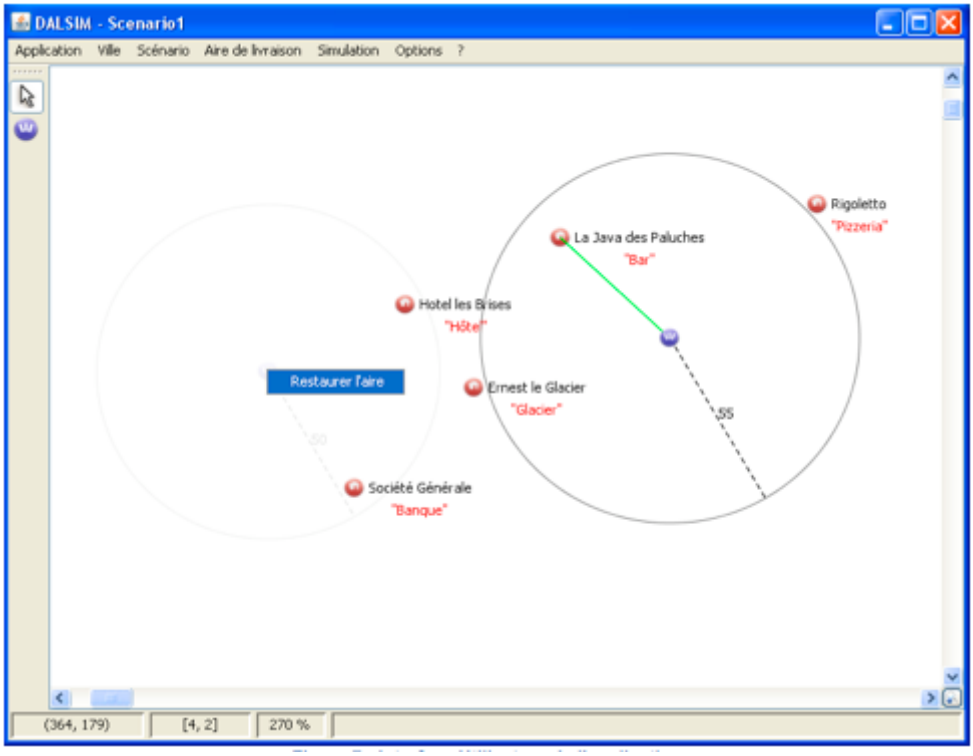


FIG. A.5 – Affichage des détails lors du zoom

Annexe B

Quelques photos...

Dans cette annexe, je fais une parenthèse sur les moments que j'ai pu capturer lors de mes déplacements pour des conférences, séminaires, colloques, simples réunion de travail voire pour des vacances. Il est question pour la plupart de photos de stationnements révélant les caractéristiques des lieux et suggèrent finalement l'adaptation des transporteurs pour l'acheminement des biens dans la ville.

Commençons avec nos voisins outre atlantique Canadiens, et plus précisément à Trois Rivières, ville de taille moyenne à l'échelle européenne mais demeure une petite ville pour un tel pays. Cette photo est prise entre 8h et 9h le matin dans la rue commerçante de Trois Rivières.

On remarque facilement la livraison d'un semi-remorque d'une célèbre marque garé en pleine voie. On sent l'influence américaine où même les rues sont de tailles conséquentes. Ci-contre un zoom sur le camion en question.

La photo ci-contre montre que les deux premières photos ne sont pas un cas isolé... En effet, nous sommes dans la même rue au même moment. Le stationnement est en pleine voirie. Mais vaut-il mieux faire entrer de tels engins une fois que plusieurs petits 3.5t ? Encore faudrait-il connaître la quantité de marchandises déchargées.

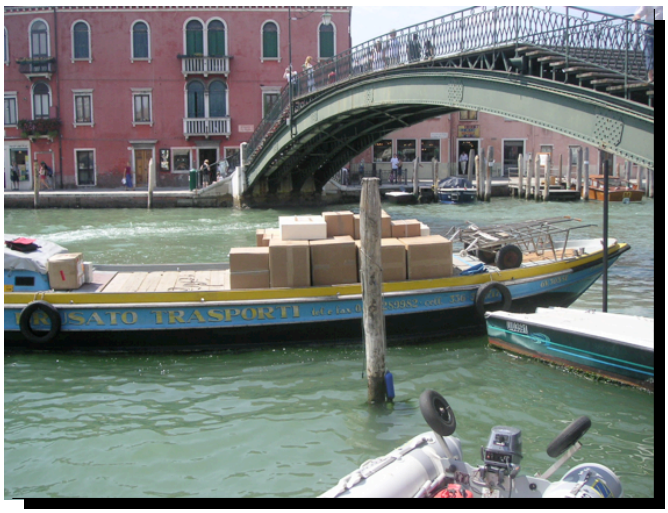
Une dernière photo de Trois Rivières, où le cortège de poids lourds prend fin, nous sommes au même instant et au même endroit, on peut d'ailleurs apercevoir le camion rouge au fond à gauche de la photo ci-contre. Un sondage auprès des habitants permettrait de connaître leurs visions du fret urbain et surtout concernant le caractère discret dans cette ville.

Changement de décor, la photo ci-contre est prise dans l'enceinte du château de Versailles. Rien de particulier sur cette photo, seulement le caractère cocasse d'une livraison royale !

Nous sommes à Londres vers 10h du matin, les rues sont bizarrement désertes, à en juger Regent Street qui croise Piccadilly Circus. On sent déjà à première vue que les livraisons se passent de manière ordonnée.

Cette impression est confirmée par cette photo qui est prise un peu plus haut après le croisement avec Oxford Street. Les véhicules ne peuvent pas stationner dans cette partie de la rue, les chauffeurs livreurs doivent donc être astucieux comme le montre ces deux stationnements dans une rue perpendiculaire en sens unique.

Toujours à Londres, mais dans le quartier chinois, où une fois de plus, les livraisons se passent de manière très ordonnées. Les véhicules sont garés sans provoquer de gêne pour le reste de la circulation et les derniers mètres sont effectués à l'aide de diable.



Partons maintenant au soleil avec une ville atypique qui est celle de Venise en Italie. La ville est fortement contrainte par son environnement, les transporteurs doivent s'adapter à cet environnement si particulier. La première photo est prise vers 14h sur les canaux de l'île de Murano. Le transport de marchandises en ville est donc un transport en majorité fluvial.

Sur le Canal Grande, vers 9h le matin en fin de juillet, où les touristes sont déjà dans les rues pour les visites, les transporteurs, eux, font leur travail dans des conditions difficiles : les pontons sont même congestionnés, ce qui remet aussi en cause la durabilité de ce type de transport...

La foule est oppressante, les terrasses déployées, par conséquent une large partie des quais est occupée comme le montre la photo ci-contre. Le partage de la voirie est une problématique où il ne faut oublier personne.

De retour en Angleterre, et plus précisément dans la ville de Norwich dans le Norfolk. Une ville de taille moyenne à l'échelle européenne. Norwich est une ville du projet CIVITAS SMILE, où un Urban Transshipment Centre a été crée près de la ville. La photo ci-contre est prise le matin vers 9h, où les habitants arpentent déjà les rues pour faire des achats.

Nous sommes dans une rue piétonne du centre-ville, ce qui est manifestement une aire de livraison géante pour tout transporteur. De même la photo ci-contre, nous force à nous poser des questions comme : ne peut-on pas au moins ordonner le stationnement ? Au regard de ces photos on sent qu'il y a des contradictions entre zone réservée aux piétons et aires de livraison.

Une destination, plus exotique où nous nous trouvons à Marrakech au Maroc. Les moyens de transport sont beaucoup plus rudimentaires mais ont un caractère durable sans précédent. En effet, la charrue transporte près de 2 tonnes de ciment sans pollution ni émission de GES avec un niveau de bruit tout à fait raisonnable !

Ci-contre, la photo montre un autre moyen local de transport de marchandises : un diable version longue distance. Il paraît pourtant difficile de proposer ce genre de véhicule aux différents acteurs et un gros travail sur le changement des comportements reste à faire même si ceux-ci commencent à évoluer.

Le stade Panathinaïko d'Athènes est en fond de cette photo. La circulation est dense et les véhicules garés en pleine voie génèrent une gêne importante qui contribue au mauvais écoulement du trafic.

A Athènes, le parc de véhicules est plus ancien et donc pollue plus. Il est difficile d'accéder à certains endroits de la ville tant la congestion est importante. Une compétence appréciée chez le chauffeur est de trouver un bon chemin entre deux points parce qu'il connaît la ville et les conditions de circulation à l'heure près.

Résumé :

La distribution de marchandises dans les secteurs urbains est indispensable au fonctionnement et au développement de ces derniers. Avec leur rôle économique majeur, ils ne peuvent exister sans un système adapté de distribution des marchandises. Cependant, des problèmes liés à la distribution de biens en ville contraignent l'adaptabilité et l'efficacité du système de transport des marchandises. Les principaux impacts retenus sont la pollution sous forme de bruit et d'émissions de polluants comme le NO_x (oxyde d'azote) et les particules, la contribution au réchauffement climatique par des émissions de gaz à effet de serre tel que le CO_2 (dioxyde de carbone) et le ralentissement de la circulation des autres usagers de l'espace public.

Dans ce cadre, cette thèse a pour objectif de proposer un modèle conceptuel et une approche de simulation du Transport de Marchandises en Ville (TMV), pour, in fine, développer un outil d'aide à la décision au profit des autorités organisatrices de transports avec pour objectif l'amélioration du TMV. Nous proposons de présenter cette démarche en nous appuyant sur le projet européen SUCCESS du programme CIVITAS où l'agglomération de La Rochelle est prise comme pilote pour la validation de nos travaux.

A partir des modèles présentés dans cette thèse, il est possible de concevoir des outils de diagnostic et d'aide à la décision qui peuvent jouer un rôle majeur dans l'identification de solutions à moyen terme. Ces outils permettent de formaliser des situations hypothétiques afin de mesurer les conséquences des futures décisions que doivent prendre irrémédiablement les autorités pour faciliter la circulation urbaine. Le retour d'expériences de la Communauté d'Agglomération de Poitiers indique que ces outils sont particulièrement appréciés pour leur capacité à fournir une base de réflexion lors des dialogues et débats avec les acteurs impliqués dans la logistique urbaine.

Mots-clés : logistique urbaine, approche système, modélisation, aires de livraison

Abstract :

The distribution of goods in urban areas is essential for their prosperity. With their economic role, they cannot work without an appropriated system of goods distribution. Unfortunately, problems related to the distribution of goods in the city slow down the adaptability and the efficiency of the transportation system. The main impacts are the pollution because of noise, the emissions of pollutants such as NOx (nitrogen oxide), the contribution to global warming by emissions of greenhouse gases such as CO2 (carbon dioxide) and the physical obstruction of flows of city users.

In this context, this thesis aims to propose a conceptual model and a simulation approach of urban freight transport, in order to, ultimately, develop a decision aid tool for urban communities. We propose to present this approach by relying on the European project SUCCESS from the CIVITAS programme in which the urban community of La Rochelle is used to validate our work.

Thanks to the models presented in this thesis, it is possible to develop diagnostic tools and decision aid tools that can play a major role in identifying solutions in a medium term vision. In combination with the skills of technical services of the cities, these tools can formalize hypothetical situations to measure the consequences of future decisions. The feedback from the urban community of Poitiers indicates that these tools are mainly required for their ability to provide a basis for reflection during the dialogues and discussions with the various actors of city logistic.

Keywords : city logistic, comprehensive approach, modelling, delivery areas