

Un système d'aide à la régulation d'un réseau de transport multimodal perturbé : réponse au problème de congestion

Hinda Mejri

▶ **To cite this version:**

Hinda Mejri. Un système d'aide à la régulation d'un réseau de transport multimodal perturbé : réponse au problème de congestion. Autre. Ecole Centrale de Lille, 2012. Français. NNT : 2012ECLI0008 . tel-00803231

HAL Id: tel-00803231

https://theses.hal.science/tel-00803231

Submitted on 21 Mar 2013

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.

N° d'ordre : 180

Ecole Centrale de Lille

THESE

Présentée en vue d'obtenir le grade de

DOCTEUR

Spécialité : Automatique, Génie Informatique, Traitement du signal et des images

Par

Hinda MEJRI

Doctorat délivré par l'École Centrale de Lille

Un système d'aide à la régulation d'un réseau de transport multimodal perturbé : réponse au problème de congestion

Soutenue le 22 Juin 2012 devant le jury :

Président :	**Christophe DI POMPEO**	Professeur, Université de Lille 2
Rapporteurs :	**Pierre LOONIS**,	Professeur, Directeur Général ESIEE-Amiens
	Alassane B. NDIAYE,	Professeur Université Libre de Bruxelles,
Examinateurs :	**Christophe DI POMPEO**	Professeur, Université de Lille 2
	Marie-Reine BAKRY	Consultant expert CETE du Sud-Ouest Toulouse
Directeurs :	**Slim HAMMADI**	Professeur, École Centrale de Lille
Co-encadreur	**Nesrine ZOGHLAMI**	Dr, Ecole Centrale de Lille

Thèse préparée dans le laboratoire LAGIS FRE 3303 à l'École Centrale de Lille
Ecole Doctorale SPI 072,
PRES Université Lille Nord-de-France

A mes chers parents,

à ma chère sœur et mes frères,

à mon époux bien-aimé,

et à notre petit Raed.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude au Professeur Slim HAMMADI, Professeur à l'Ecole Centrale de Lille et Directeur de cette thèse, pour l'énorme soutien scientifique et moral qu'il m'a adressée durant la période de l'élaboration de ce travail au sein du LAGIS. Je le remercie aussi pour ses qualités humaines et scientifiques et de m'avoir toujours encouragée à aller de l'avant.

Je tiens également à remercier Docteur Nesrine ZOGHLAMI, enseignante à l'Ecole centrale de Lille et co-encadreur de cette thèse, pour ses précieux conseils qui ont énormément contribué à la réalisation de ce travail.

Je ne saurais oublier de remercier Professeur Alassane B. NDIAYE, Professeur à l'Université Libre de Bruxelles et Directeur du laboratoire Qalinca-logistics, d'avoir accepté d'évaluer ce travail et être un membre de jury.

Que Professeur Pierre LOONIS, Professeur et Directeur Général de l'ESIEE à Amiens, reçoive mes plus sincères remerciements pour l'honneur qu'il m'a fait d'être le rapporteur de cette thèse.

Un témoignage de ma profonde reconnaissance s'adresse à Professeur Christophe Di POMPEO, Professeur à l'université Lille 2, d'avoir présidé ce jury et à Madame Marie- Reine BAKRY, Consultante expert CETE du Sud-Ouest à Toulouse, pour avoir accepté d'examiner ma thèse et également pour leurs remarques et critiques constructives.

Dans la crainte d'oublier quelqu'un, je remercie toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse, en particulier, tout le personnel du LAGIS et de l'Ecole Centrale de Lille pour leur bonne humeur et leur disponibilité.

Finalement, je ne peux qu'être infiniment reconnaissante envers mon mari pour son soutien indescriptible, sa patience et ses nombreux sacrifices. Je lui dédie avec plaisir ce travail ainsi qu'à toute ma famille et belle-famille.

Table des matières

GLOSSAIRE **10**

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES **13**

INTRODUCTION GENERALE **16**

CHAPITRE I : LA MULTIMODALITE : SOLUTION POUR LA CONGESTION DANS LES RESEAUX DE TRANSPORT **20**

I.1. INTRODUCTION 21

I.2. LES TRANSPORTS : EVOLUTION, IMPORTANCE ET TYPOLOGIE 21

I.2.1. Evolution des transports 21

I.2.1.1. Le développement de l'urbanisation 22

I.2.1.2. L'augmentation du niveau de vie 22

I.2.1.3. L'accroissement de la mobilité 23

I.2.2. Importance des transports 23

I.2.2.1. Pour l'économie 23

I.2.2.2.Pour la société 24

I.2.2.3. Pour l'aménagement du territoire 24

I.2.2. Classification des transports 25

I.2.2.1. Classification fonctionnelle des moyens de transport 26

I.2.2.1.1. Les transports individuels 26

I.2.2.1.2. Les transports collectifs 26

I.2.2.2. Classification du transport selon la nature du service rendu 27

I.2.2.2.1. Le transport à la demande 28

I.2.2.2.2. Le transport occasionnel 28

I.2.2.3. Classification des transports selon le(s) mode(s) adopté(s) 29

I.2.2.2.1. Le transport uni-modal (ou monomodal) 29

I.2.2.2.2. La complémentarité modale : le transport comodal 29

I.2.2.2.3. Le transport multimodal 30

I.2.2.2.3.1. Le transport intermodal 31

I.2.2.2.3.2. Le transport combiné 32

I.3. LE TRANSPORT : UN VECTEUR POUR LE DEVELOPPEMENT DURABLE 32

I.3.1. …Vers une ville durable 34

I.3.2. Les effets négatifs du transport : une menace au développement durable 35

I.3.2.1. Définition des externalités 35

I.3.2.2. Les externalités négatives du transport 37

I.3.2.2.1. les effets négatifs du transport sur l'environnement 37

I.3.2.2.1.1. La pollution atmosphérique et l'effet de serre 37

I.3.2.2.1.2. Autres effets négatifs du transport sur l'environnement 39

I.3.2.2.2. les effets négatifs du transport sur les individus 40

I.3.2.2.2.1. Le bruit 40
I.3.2.2.2.2. Les accidents 41
I.3.2.2.3. Les effets négatifs du transport sur l'économie 42
I.3.2.2.3.1. La consommation énergétique 42
I.3.2.2.3.2. La congestion 42
I.4. EVOLUTION DE L'AUTOMOBILISME ET PHENOMENE DE CONGESTION 43
I.4.1. Prédominance de l'automobile privée 43
I.4.2. Les avantages de l'automobile 46
I.4.3. Les effets négatifs de l'usage de la voiture privée 47
I.4.3.1. Impact de l'automobile sur l'environnement de la ville et les habitants 47
I.4.3.2. L'impact de l'automobile sur l'environnement 49
I.4.3.3. L'impact de l'usage de l'automobile sur les autres usagers de la route 49
I.4.3.4. L'impact de l'automobile sur la société 49
I.4.3. La congestion : principale conséquence négative de l'usage de l'automobile 50
I.4.3.1. Définition de la congestion 50
I.4.3.2. Raisons d'apparition du phénomène de la congestion 51
I.4.3.3. Conséquences de la congestion 52
I.5. NECESSITE D'UNE POLITIQUE DE TRANSPORT SOUTENABLE POUR UNE MOBILITE DURABLE 53
I.5.1. La multimodalité et l'intermodalité : un instrument efficace pour une mobilité durable 55
I.5.1.1. Pourquoi opter à l'usage des transports collectifs ? 56
I.5.1.1.1 : Les pertes liées à l'usage de la voiture privée 56
I.5.1.1.2. Les avantages du transport en commun 57
I.5.1.2. Importance du transport multimodal 58
I.5.2. Caractéristiques et représentation graphique d'un réseau de transport multimodal 59
I.6. CONCLUSION 61

CHAPITRE II: LES SYSTEMES DE REGULATION DES PERTURBATIONS DANS LES RESEAUX DE TRANSPORT MULTIMODAL 62

II.1. INTRODUCTION 63
II.2. LES PERTURBATIONS 64
II.2.1. Définition d'une perturbation 64
II.2.2. Les perturbations dans les réseaux de transport 64
II.2.2.1. Classification des perturbations 65
II.2.2.1.1. Classification par niveau d'impact 65
II.2.2.1.2. Classification selon l'origine de la perturbation 65
II.2.2.1.3. Classification selon l'impact spatio-temporel 66
II.2.2.2. Les perturbations dans les réseaux de transport collectifs 67
II.3. LA CONGESTION, UNE PERTURBATION QUI NECESSITE DES SOLUTIONS 69
II.3.1. fondements théoriques du phénomène de congestion 70
II.3.2. Les instruments d'internalisation de la congestion 73
II.3.2.1. Les instruments tarifaires 73
II.3.2.2. Instruments réglementaires et incitatifs de lutte contre la congestion 74

II.3.2.3. Le développement de l'infrastructure 76
II.4. PROBLEMATIQUES LIEES AU RESEAU DU TRANSPORT MULTIMODAL 77
II.4.1. Aménagement des réseaux 77
II.4. 2. Gestion conjointe 77
II.4. 3. Système d'information multimodale 78
II.4. 4. Planification du trafic 78
II.4. 5. Régulation du trafic 78
II.5. PROCESSUS DE PLANIFICATION 79
II.5.1. Problématique de la planification 79
II.5.2. Approches de planification 81
II.6. PROCESSUS DE REGULATION 83
II.6.1. Les intervenants dans le processus de régulation d'un système de transport 84
II.6.2. Rôle du régulateur 85
II.6.3. Sources principales d'identification d'une perturbation 87
II.6.4. Logiques et manœuvres de régulation 87
II.6.4.1. Logiques de régulation 87
II.6.4.2. Les manœuvres de régulation 88
II.7. LES SYSTEMES D'AIDE A LA REGULATION 90
II.7.1. Phases de développement des systèmes d'aide à l'exploitation et à l'information (SAEI) 91
II.7.2. Architecture et mise en place d'un SAEI dans les réseaux de transport collectifs 92
II.7.3. Rôle et importance des systèmes d'aide à l'exploitation 93
II.7.3.1. Garantir une meilleure exploitation 93
II.7.3.2. Assurer la multimodalité et l'intermodalité des systèmes de transport 95
II.7. 3.3. Garantir aux usagers une meilleure qualité de service 96
II.8. LES SYSTEMES D'AIDE A LA DECISION (SAD) 97
II.8.1. Importance d'un outil d'aide à la décision pour le régulateur 97
II.8.2. Définition d'un SAD 98
II.8.3. Etapes de l'aide à la décision et rôle du SAD 98
II.9. OUTILS ET APPROCHES DE REGULATION D'UN RESEAU DE TRANSPORT PERTURBE 100
II.9.1. Approche par séquentialisation temporelle 101
II.9.2. Approche cinématique de régulation 102
II.9. 3. Le cas du VAL 102
II.9.4. Algorithme flou 103
II.9.5. Approche multi-agents évolutionniste 104
II.10. CONCLUSION 104

CHAPITRE III : MODELISATION DES CRITERES DE REGULATION ET DES PERTURBATIONS : VERS UNE CONCEPTION D'UN SAD A BASE D'AGENTS 105

III.1. INTRODUCTION : 106

III.2. FORMULATION MATHEMATIQUE 106
III.2.1. Les variables de décision 106
III.2.1.1. Affectation des nœuds et des arcs 107
III.2.1.2. Les horaires de passage 107
III.2.1.3. Les durées de parcours 107
III.2.1.4. Les durées de stationnement 108
III.2.1.5. Relation entre les variables de décision 108
III.2.2. Les critères de régulation 109
III.2.2.1. Critère de régularité 109
III.2.2.1.1. Calcul de l'attente à un arrêt 109
III.2.2.1.2. Calcul de l'attente totale sur l'horizon de régulation 110
III.2.2.2. Critère de correspondance 111
III.2.2.3. Critère de ponctualité 112
III.2.2.3.1. Nombre de passagers montants 112
III.2.2.3.2. Nombre de passagers descendants 112
III.2.2.3.3. Calcul de la charge 113
III.2.2.3.4. Calcul de la durée de parcours totale 113
III.2.2.3.5. Les kilomètres commerciaux 113
III.2.2.3.6. La qualité de service 114
III.2.3. Les contraintes 114
III.3. HORIZON SPATIO-TEMPOREL DE REGULATION 115
III.3.1. Détermination de l'horizon de régulation 115
III.3.2. Détermination de l'horizon de régulation pour des perturbations simultanées 118
III.4. MODELISATION DES RESEAUX DE TRANSPORT : 120
III.4.1. Modélisation par graphes : 120
III.4.2. Modélisation par réseaux de Pétri 121
III.4.3. Modélisation par systèmes multi agents : 122
III.4.4. Comparaison entre les modèles : 124
III. 5. MODULE D'AIDE A LA REGULATION PROPOSE : MODELISATION PAR SYSTEMES MULTI AGENTS 124
III.5.1. Définition d'un agent : 124
III.5.2. Définition d'un système multi-agents : 125
III.5.3. Les systèmes multi-agents et l'Intelligence Artificielle 127
III.5.4. Le système d'aide à la régulation proposé 128
III.5.4.1. Architecture globale du système 128
II.5.4.2. Les bases de données locales 132
III.5.4.3. Diagrammes d'activité 133
III.5.4.3.1. L'agent INTERFACE 133
III.5.4.3.2. Agent HORIZON 134
III.5.4.2.3. Agent OPTIMISATEUR (AO) 135
III.5.4.2.4. Agent EVALUATEUR 136
III.5.4.3. Diagramme de séquence : comportement global du système d'aide à la régulation proposé 137
III.6. CONCLUSION 140

CHAPITRE IV : APPROCHE EVOLUTIONNISTE PROPOSEE POUR LA REGULATION DES RESEAUX DE TRANSPORT 141

IV.1. INTRODUCTION : 142
IV.2. LES METAHEURISTIQUES 142
IV.2.1. Recuit simulé 143
IV.2.2. Recherche Tabou 143
IV.2.3. Algorithme à colonies de fourmis (ACF) 144
IV.2.3.1 Principe de l'algorithme 144
IV.2.3.2. La fonction coût 145
IV.2.3.3. Génération d'une solution 145
IV.2.3.3. Mise à jour de la quantité de phéromone 146
IV.2.3.4. ACF pour la reconfiguration spatiale (ACFRS) 146
IV.2.3.5. ACF pour la régulation des horaires(ACFRH) 147
IV.2.4. L'approche évolutionniste 147
IV.3. PRESENTATION DE L'APPROCHE EVOLUTIONNISTE 148
IV.3.1. Principe général 148
IV.3.2. Architecture de l'algorithme évolutionniste 149
IV.3.3. Mise en œuvre d'un algorithme évolutionniste 150
IV.3.4. Caractéristiques des algorithmes évolutionnistes : 153
IV.3.5. Application des algorithmes évolutionnistes dans le domaine du transport 154
IV.4. AGENT OPTIMISATEUR : PROPOSITION ET INTEGRATION D'UNE APPROCHE EVOLUTIONNISTE 156
IV.4.1. Objectif de l'intégration d'une approche évolutionniste 156
IV.4.2. Choix du codage 157
IV.4.3. L'opérateur de sélection choisi 159
IV.4.4. L'opérateur de croisement utilisé 160
IV.4.5. L'opérateur de mutation adopté 163
IV.5. AGENT EVALUATEUR : PROPOSITION ET INTEGRATION D'UNE APPROCHE AGREGATIVE 163
IV.5.1. Approche agrégative classique 163
IV.5.1.1. Résolution du problème d'évaluation multicritère 163
IV.5.2. Approche agrégative basée sur l'intégrale de Choquet 170
IV.5.2.1. Insuffisance de la somme pondérée 170
IV.5.2.2. Présentation de l'intégrale de Choquet 171
IV.5.2.3. Notion d'importance globale d'un critère 172
IV.5.2.4. Notion d'interaction entre deux critères 173
IV.6. CONCLUSION 175

CHAPITRE V : SIMULATIONS ET RESULTATS DES APPROCHES PROPOSEES 176

V.1. INTRODUCTION 177
V.2. IMPLEMENTATION DU SYSTEME D'AIDE A LA REGULATION 178
V.2.1. Choix de la plateforme multi agents 178

V.2.2. Outils et paramétrages :..... 180
V.2.3. Base de données 180
V.2.4. Les tableaux utilisés : 181
V.3. DIAGRAMMES DE CLASSES :..... 182
V.4. LES INTERFACES DU SYSTEME D'AIDE A LA REGULATION : 185
V.5. LES SCENARII DE SIMULATIONS..... 189
V.5.1. Scénario 1 : Perturbation touchant une seule ligne..... 189
V.5.2. Scénario 2 : Détermination de l'horizon de régulation pour des perturbations simultanées et séparées 197
V.5.3. Scénario 3 : Détermination de l'horizon de régulation pour des perturbations chevauchantes 201
V.6. COMMUNICATION INTER- AGENTS..... 204
V.6.1. Cas d'une perturbation familière 204
V.6.2. Cas d'une perturbation non familière 205
V.6. 3. Cas de deux perturbations simultanées..... 206
V.7. CONCLUSION : 207
CONCLUSION GENERALE 208
BIBLIOGRAPHIE..... 211
ANNEXES 222

Glossaire

PDU : Plan des déplacements urbains

TM : Tableau de marche

TMT : Tableau de marche théorique

TMR : Tableau de marche régulé

TMP : Tableau de marche perturbé

SAE : Système d'Aide à l'Exploitation

SAEI : Systèmes d'aide à l'exploitation et à l'information

SAD : Système d'Aide à la Décision

V : Vitesse de circulation des véhicules

X : Débit de trafic.

t_{pert} : Horaire de détection de l'incident

H : Horizon de la régulation

S^H : Ensemble des stations considérées dans l'horizon H

V^H : Ensemble des véhicules considérés dans l'horizon H

S_j^m : *j* ème station de la ligne *m*

V_i^l : *i* ème véhicule de la ligne *l*

a_{ij}^{lm} : Variable de passage associée au véhicule V_i^l et à l'arrêt S_j^m

x_{ijk}^{lmr} : Variable de destination associée à V_i^l entre S_j^m et S_k^r

ta_{ij}^{lm} : Horaire d'arrivée du véhicule V_i^l à l'arrêt S_j^m

td_{ij}^{lm} : Horaire de départ du véhicule V_i^l de l'arrêt S_j^m

t_{ijk}^{lmr} : Durée du trajet direct du véhicule V_i^l de la station S_j^m à la station S_k^r

δ_{ijk}^{lmr} : Modification du temps de parcours de V_i^l entre S_j^m et S_k^r

ε_{ij}^{lm} : Temps supplémentaire de stationnement imposé sur le véhicule V_i^l à l'arrêt S_j^m

ts_{ij}^{lm} : Temps de stationnement de V_i^l à la station S_j^m

$Veh^+(V_i^l, S_j^m, S_k^r)$: Premier véhicule qui succède V_i^l à S_j^m et qui passe également par S_k^r après S_j^m

$\mu_{S_j^m}(t)$: Distribution des arrivées des voyageurs a l'arrêt S_j^m

$\mu(\Delta t_I, S_j^m, S_k^r)$: Taux constant d'arrivée pendant Δt_I à S_j^m et qui ont S_k^r comme destination

N_{ijk}^{lrm} : Nombre de personnes montant à bord de V_i^l allant de S_j^m à S_k^r

$Nmont_{ij}^{lm}$: Nombre de personnes qui montent à bord de V_i^l à la station S_j^m

$Ndesc_{ij}^{lm}$: Nombre de personnes qui descendent de V_i^l à la station S_j^m

$y_{ii'j}^{ll'm}$: Variable de correspondance de V_i^l à $V_{i'}^{l'}$ dans la station S_j^m

$\omega_{ii'j}^{ll'm}$: Nombre de personnes en transfert de V_i^l à $V_{i'}^{l'}$ dans la station S_j^m

$\rho_{ii'j}^{ll'm}$: Taux de correspondance de V_i^l à $V_{i'}^{l'}$ à l'arrêt S_j^l

C_{ij}^{lm} : Charge du véhicule V_i^l au départ de la station S_j^m

KM : Critère kilomètres commerciaux

QS : Critère qualité de service

$d_i^l(S_j^m, S_{j'}^{m'})$: Distance parcourue par V_i^l entre les deux stations successives S_j^m et $S_{j'}^{m'}$.

AT : Attente totale des passagers aux arrêts dans l'horizon de régulation

TT : Durée totale des transferts dans l'horizon de régulation

RT : Durée totale des routes dans l'horizon de régulation

f_i : Valeur de la fonction coût pour l'individu i

t_{mont} : Temps moyen que prend une personne pour monter dans le véhicule

t_{desc} : Temps moyen que prend une personne pour descendre d'un véhicule

CR : Centre de régulation

AI	: Agent interface
AH	: Agent Horizon
AO	: Agent Optimisateur
AE	: Agent Evaluateur
P_t	: Société d'agents
N	: Ensemble de critères
n	: Cardinal de N
I_{ij}	: Indice d'interaction entre deux critères
I_i	: Indice de Shapley
μ	: Mesure floue

Index des tableaux et figures

Index des tableaux

TABLEAU I. 1 : ÉMISSIONS DE GES DU SECTEUR DES TRANSPORTS (TOUS MODES) 38
TABLEAU I. 2 : ÉMISSIONS DE CO_2 PAR MODE DE TRANSPORT 39
TABLEAU I. 3 : ACCIDENTS CORPORELS DES TRANSPORTS ROUTIERS 41
TABLEAU I. 4 : NOMBRE DE VOITURES ET DE VÉHICULES UTILITAIRES POUR 1 000 HABITANTS AU 1ER JANVIER . 44
TABLEAU I. 5 : RÉPARTITION MODALE DU TRANSPORT INTÉRIEUR TERRESTRE 46

TABLEAU IV. 1 : RÉSULTATS DE L'AGRÉGATION PAR UNE SOMME PONDÉRÉE 171

TABLEAU IV.2 : AGRÉGATION PAR INTÉGRALE DE CHOQUET……..……..174

Index des figures

FIGURE I.1 : CLASSIFICATION FONCTIONNELLE DES MOYENS DE TRANSPORT 27
FIGURE I.2 : PROPORTION DES MÉNAGES POSSÉDANT UNE OU PLUSIEURS VOITURES 44
FIGURE I.3 : EXEMPLE D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT MULTIMODAL 60

FIGURE II. 1 : ANALYSE DES PERTURBATIONS 66
FIGURE II. 2 : EVOLUTION DES PERTURBATIONS EN FRANCE ENTRE LES ANNÉES 2000 ET 2008 68
FIGURE II. 3 : GRAPHIQUE CONGESTION URBAINE 72
FIGURE II. 4 : PROCESSUS CLASSIQUE DE PLANIFICATION 79
FIGURE II. 5 : GRAPHIQUE DES HORAIRES DES VÉHICULES 80
FIGURE II. 6 : EXEMPLE DE PROBLÈME D'ORDONNANCEMENT DE VÉHICULES À DEUX DÉPÔTS 82
FIGURE II. 7 : LA RÉGULATION DANS UN RÉSEAU DE TRANSPORT. 84
FIGURE II. 8 : ÉTAPES DE PRISE DE DÉCISION 87
FIGURE II. 9 : PROCESSUS DE RÉGULATION EN BOUCLE FERMÉE 90
FIGURE II. 10 : LES COMPOSANTES D'UN SAE 93
FIGURE II. 11 : PROCESSUS D'EXPLOITATION D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT COLLECTIF 95
FIGURE II. 12 : ETAPES DE RÉSOLUTION D'UN PROBLÈME D'AIDE À LA DÉCISION 99
FIGURE II. 13 : PROCESSUS DE CONTRÔLE EN TEMPS RÉEL D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT 99

FIGURE III. 1 : PRINCIPE DE LA RÉGULATION EN TERMINUS 116
FIGURE III. 2 : HORIZON SPATIOTEMPOREL DE RÉGULATION 117
FIGURE III. 3 : MODÉLISATION PAR GRAPHES D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT MULTIMODAL 120
FIGURE III. 4 : EXEMPLE DE MODÉLISATION PAR LES RDP D'UN ARRÊT DE BUS 122
FIGURE III. 5 : MODÉLISATION PAR UN SYSTÈME MULTI AGENTS 123
FIGURE III. 6 : NIVEAUX D'UN SYSTÈME MULTI AGENT 127
FIGURE III. 7 : ARCHITECTURE DU SYSTÈME 128
FIGURE III. 8 : COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU SYSTÈME: CRÉATION D'UNE SOCIÉTÉ D'AGENTS INITIALE 130
FIGURE III. 9 : COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU SYSTÈME: CRÉATION D'AUTRES SOCIÉTÉS D'AGENTS 131
FIGURE III. 10 : EXEMPLE DE SCÉNARIO DE CHANGEMENT D'ÉTAT D'UNE SOCIÉTÉ 132
FIGURE III. 11 : DIAGRAMME D'ACTIVITÉS DE L'AGENT INTERFACE 133
FIGURE III. 12 : DIAGRAMME D'ACTIVITÉS DE L'AGENT HORIZON 135
FIGURE III. 13 : DIAGRAMME D'ACTIVITÉS DE L'AGENT OPTIMISATEUR 136
FIGURE III. 14 : DIAGRAMME D'ACTIVITÉS DE L'AGENT EVALUATEUR 137
FIGURE III. 15 : DIAGRAMME DE SÉQUENCE POUR UNE SEULE PERTURBATION 138
FIGURE III. 16 : DIAGRAMME DE SÉQUENCE POUR DEUX PERTURBATIONS SIMULTANÉES ET SÉPARÉES 139
FIGURE III. 17 : DIAGRAMME DE SÉQUENCE POUR DEUX PERTURBATIONS SIMULTANÉES CHEVAUCHANTES 140

FIGURE IV. 1 : GRAPHE DE DÉCISIONS DE LA RÉGULATION 144
FIGURE IV. 2 : ARCHITECTURE GÉNÉRALE D'UN ALGORITHME ÉVOLUTIONNISTE 150
FIGURE IV. 3 : EXEMPLE D'UN CROISEMENT À UN POINT 152
FIGURE IV. 4 : EXEMPLE D'UN CROISEMENT À DEUX POINTS 152
FIGURE IV. 5 : EXEMPLE DE CROISEMENT UNIFORME 152
FIGURE IV. 6 : EXEMPLE DE MUTATION 153
FIGURE IV. 7 : EXEMPLE DE CODAGE DE L'ORDONNANCEMENT DES ATTERRISSAGES 155
FIGURE IV. 8 : EXEMPLE DE CODAGE POUR UN PVC 155
FIGURE IV. 9 : CODAGE GÉNÉTIQUE DES DÉCISIONS DE RÉGULATION 157
FIGURE IV. 10 : CODAGE D'UNE SOLUTION DE TYPE « RÉGULATION EN LIGNE » 159
FIGURE IV. 11 : EXEMPLE DE CROISEMENT UNIFORME SUR LES LIGNES 161
FIGURE IV. 12 : ALGORITHME DE CROISEMENT UNIFORME UTILISÉ 162
FIGURE IV. 13 : APPLICATION FLOUE DANS LA RÉSOLUTION DU PROBLÈME D'ÉCHELLE. 164
FIGURE IV. 14 : FONCTIONS D'APPARTENANCE POUR LES CRITÈRES À OPTIMISER 167
FIGURE IV. 15 : ALGORITHME ÉVOLUTIONNISTE DE RÉGULATION 170

FIGURE V. 1 : RÉSEAU DE TRANSPORT MULTIMODAL DE LILLE 177
FIGURE V. 2 : TABLE UTLISATEUR 181
FIGURE V. 3 : TABLE DONNEESLIGNES 181

FIGURE V. 4 : TABLE BUS_43_1. 182
FIGURE V. 5 : DIAGRAMME DE CLASSES DE L'INTERFACE GRAPHIQUE 183
FIGURE V. 6 : DIAGRAMME DE CLASSES 184
FIGURE V. 7 : INTERFACE AUTHENTIFICATION 185
FIGURE V. 8 : INTERFACE ADMINS 186
FIGURE V. 9 : INTERFACE DÉCLARATION 187
FIGURE V. 10 : INTERFACE HORIZON 188
FIGURE V. 11 : INTERFACE VISUALISER 189
FIGURE V. 12 : FLUX DE VOYAGEURS DE LA LIGNE 43 SENS 1 190
FIGURE V. 13 : HORIZON SPATIO-TEMPOREL DE RÉGULATION 190
FIGURE V. 14 : AFFICHAGE DE L'HORIZON DE RÉGULATION 191
FIGURE V. 15 : DÉGRADATION DES VALEURS DES CRITÈRES AVEC L'ÉVOLUTION DU RETARD 192
FIGURE V. 16 : EVALUATION DES CRITÈRES PAR L'APPROCHE AGRÉGATIVE CLASSIQUE 193
FIGURE V. 17 : MOYENNE DE LA FONCTION COÛT 193
FIGURE V. 18 : FLUX DE VOYAGEURS AUX ARRÊTES DE LA LIGNE 43 SENS 2 194
FIGURE V. 19 : MANŒUVRE RÉGULATION AU TERMINUS 195
FIGURE V. 20 : IMPACT DE LA CONGESTION SUR LES VALEURS DES CRITÈRES 195
FIGURE V. 21 : EVALUATION DES CRITÈRES PAR INTÉGRALE DE CHOQUET 196
FIGURE V. 22 : MOYENNE DE LA FONCTION COÛT 196
FIGURE V. 23 : PERTURBATIONS SIMULTANÉES 197
FIGURE V. 24 : FLUX DE VOYAGEURS AUX ARRÊTES DE LA LIGNE 43 198
FIGURE V. 25 : EVALUATION DES PRÉFÉRENCES PAR INTÉGRALE DE CHOQUET 199
FIGURE V. 26 : EVALUATION DES CRITÈRES PAR INTÉGRALE DE CHOQUET 199
FIGURE V. 27 : CONVERGENCE DE L'ALGORITHME 200
FIGURE V. 28 : EXEMPLE DE PLUSIEURS PERTURBATIONS SIMULTANÉES ET SÉPARÉES. 201
FIGURE V. 29 : FLUX DE VOYAGEURS AUX ARRÊTES DE LA LIGNE 44 SENS 1 202
FIGURE V. 30 : PERTURBATIONS SIMULTANÉES ET CHEVAUCHANTES 203
FIGURE V. 31 : EVALUATION DES CRITÈRES PAR INTÉGRALE DE CHOQUET 203
FIGURE V. 32 : EVALUATION DES CRITÈRES PAR INTÉGRALE DE CHOQUET 204
FIGURE V. 33 : COMMUNICATION DES AGENTS DANS LE SAR (PERTURBATION FAMILIÈRE) 205
FIGURE V. 34 : COMMUNICATION DES AGENTS DANS LE SAR (PERTURBATION NON FAMILIÈRE) 206
FIGURE V. 35 : COMMUNICATION INTER-AGENTS DANS LE SAR (PERTURBATIONS SIMULTANÉES) 207

Introduction générale

Le transport est une question essentielle et complexe des politiques des villes. Cette question est indissociable des mécanismes économiques et sociaux, des politiques d'aménagement du territoire et des choix comme des contraintes de la vie quotidienne. En effet, la mondialisation de l'économie et le développement du commerce international ont intensifié les déplacements des voyageurs. De même, l'émergence des régions et la croissance des économies régionales ont développé à la fois les transports régionaux et interrégionaux. Par ailleurs, la nouvelle organisation des processus de production basée sur le concept du « juste à temps » qui fait que l'entreprise est obligée de répondre, en temps réel à la demande, a nécessité le développement des transports. Par conséquent, les systèmes de transport devraient offrir des services et des installations rentables. Ils sont appelés aussi à être abordables financièrement pour chaque génération et à soutenir une activité économique durable et dynamique.

Le transport est certes nécessaire pour le développement économique et social. Mais il engendre des externalités négatives qui peuvent affecter les villes, l'économie, la société et l'environnement. Comme conséquence immédiate de l'expansion du transport, on note la congestion urbaine. Celle-ci est un phénomène qui touche aussi bien les pays développés que les pays émergents. Il se traduit par des coûts sociaux et environnementaux importants.

Différents instruments peuvent être utilisés pour faire face à la défaillance du marché des transports. Les pouvoirs publics peuvent adopter des instruments tarifaires comme : l'éco- taxe. Ils peuvent aussi adopter des mesures réglementaires de nature à augmenter les coûts pour les agents responsables des externalités négatives du transport (fixer des normes d'émission, des normes techniques, ou des normes de produits) ou incitatives (les subventions et l'amélioration de la qualité du transport public). Enfin, ils peuvent s'orienter vers l'expansion et l'amélioration de la qualité des infrastructures routières.

D'un autre côté, les opérateurs économiques peuvent adopter volontairement ou suite aux incitations étatiques des mesures pour contribuer à la solution du problème de congestion (covoiturage, park and ride, transport collectif pour les ouvriers, localisation de certaines activités économiques loin du centre-ville,…).

Parmi ces solutions, le développement des transports collectifs représente une solution efficace qui pourrait résoudre le problème de congestion. Ainsi, l'utilisation des

réseaux de transport collectif ne cesse de croitre de nos jours, surtout dans les zones urbaines à forte densité. L'intérêt pour ce domaine est devenu de plus en plus important à cause des enjeux économiques et environnementaux d'une part, et de l'augmentation du nombre d'utilisateurs et leurs exigences d'une autre part. Le transport en commun s'avère donc être un service indispensable et primordial pour la collectivité ce qui explique les multiples travaux de recherche réalisés pour l'amélioration de ce secteur.

Parallèlement à l'augmentation de la demande, les réseaux de transport se sont amplifiés par l'accroissement du nombre des véhicules et des stations ainsi que l'apparition de nouvelles notions essentiellement la multimodalité et l'intermodalité. A cause de cette prolifération de la taille du réseau et la présence de plusieurs modes, la tâche de gestion du réseau de transport collectif est devenue très complexe et difficile pour les régulateurs.

Pour faire face à ces difficultés, le développement des systèmes d'aide à la décision apparait comme une solution efficace de régulation de la circulation. Ces systèmes permettent de transmettre en temps réel les informations concernant le trafic sur les réseaux de transport.

Pour faciliter la tâche de gestion et améliorer leurs prestations afin de satisfaire une clientèle de plus en plus exigeante, les exploitants des réseaux de transport ont eu recours au développement des moyens technologiques et des solutions informatiques sophistiquées et avancées. Ces solutions informatiques leur permettent de planifier les itinéraires et établir une offre prévisionnelle en temps anticipé et de trouver des solutions aux perturbations aléatoires et imprévisibles en temps réel.

Le processus de planification s'effectue en temps anticipé et se base sur des prévisions, des estimations de la demande, de la durée des trajets et des conditions de circulation. Il en résulte une sorte de tableau de marche théorique qui indique le temps de passage théorique des véhicules par les stations du réseau. Cependant, des évènements aléatoires et complexes tel que le cas d'une forte congestion, peuvent subvenir dans le réseau introduisant des écarts importants entre l'état théorique et l'état réel. Ainsi, un processus de régulation en temps réel s'avère être primordial pour dissiper les effets des perturbations gênantes et éviter la dégradation de la qualité du service offert. Le principal objectif de la régulation est de faire en sorte qu'il y ait une adéquation en temps réel entre les tableaux de marche théoriques et les conditions réelles d'exploitation.

Notre travail s'inscrit dans ce cadre. Il se base sur la conception d'un système d'aide à la décision pour la régulation des réseaux de transport multimodal. Il peut se révéler comme un outil primordial pour apporter des solutions efficaces et en temps réel à la problématique de la congestion routière. En effet, cet outil peut communiquer l'information nécessaire à l'usager afin de prendre sa décision de déplacement avec ou sans sa voiture. De cette façon, plus l'information est complète et précise sur les différents modes substituts à l'automobile, plus on renonce à l'usage de la voiture.

Le système proposé est une approche hybride entre une modélisation par graphes du réseau et un système multi-agents. Ceci sera appuyé par une approche évolutionniste pour la génération d'une solution de régulation optimale. Ce choix est justifié par le caractère ouvert, distribué et complexe des réseaux de transport multimodal. Le choix d'un algorithme évolutionniste, une métaheuristique, au dépend d'une méthode déterministe s'explique par le temps de calcul très important mis par les méthodes de résolution exactes pour les problèmes NP-complet. Les méthodes de résolution approchées, quant à elles, présentent des solutions proches de l'optimum dans un temps beaucoup plus court.

Ce travail comporte cinq chapitres. Dans le premier chapitre nous montrons l'importance du transport, plus particulièrement le transport multimodal, et son rôle dans le développement durable. Il constitue une alternative à l'usage de la voiture privée. Dans le deuxième chapitre, nous analysons les différentes sources de perturbations susceptibles d'affecter un réseau de transport dont plus particulièrement la congestion urbaine. Nous présentons aussi, les différents systèmes et méthodes de régulation qui permettent de gérer ces perturbations. L'importance des systèmes d'aide à la décision pour la tâche du régulateur est détaillée à la fin de ce chapitre. Au niveau du troisième chapitre, nous proposons notre système d'aide à la régulation. En effet, la tâche de régulation est assimilée à un problème d'optimisation. La première étape de résolution est la formulation mathématique du processus de régulation qui consiste à établir des expressions pour les variables de décision, les critères et les contraintes. La deuxième étape est la détermination de l'horizon spatio-temporel de régulation. La troisième étape consiste en la modélisation distribuée des réseaux de transport à travers les systèmes multi agents. A la fin de ce chapitre, nous présentons l'architecture de notre système, les différents intervenants et leur interaction.

Au niveau décisionnel, les algorithmes évolutionnistes sont utilisés pour déterminer et générer la solution de régulation optimale. Nous présentons cette approche (son principe et ses caractéristiques) au niveau du quatrième chapitre. Nous présentons aussi notre approche agrégative adoptée basée sur l'intégrale de Choquet.

Dans le cinquième et dernier chapitre, nous procédons à l'implémentation de notre système proposé et à la réalisation de quelques simulations basées sur des scénarios de perturbations pouvant affecter les réseaux de transport. Nous traitons différents cas : cas de perturbations séparées, cas de perturbations simultanées et cas de perturbations simultanées et chevauchantes. Ces simulations portent sur le réseau multimodal de la ville de Lille.

Chapitre I : La multimodalité : solution pour la congestion dans les réseaux de transport

I.1. Introduction

Le transport constitue une activité de production dont le capital est constitué par les infrastructures et les véhicules et les produits sont les trafics et la qualité de service. Cette activité a des effets socio-économiques positifs très importants. Du côté environnemental, les transports représentent un élément essentiel qui peut contribuer d'une façon importante à la protection des ressources rares et de l'environnement et par conséquent, assurer un développement durable. L'importance de ce domaine se confronte aux effets négatifs causés par l'utilisation des moyens de transports. La congestion routière et plus particulièrement urbaine est la principale conséquence négative engendrée suite à la sur-utilisation des voitures particulières. Ce phénomène qui prend de plus en plus d'ampleur, affecte le développement économique et social des pays. Ce qui nécessite l'intervention de tous les acteurs concernés pour lutter contre ce problème.

Dans ce chapitre, nous présentons le domaine de transport et son importance ainsi que le phénomène de congestion en tant que conséquence immédiate de l'usage des moyens de transport. Nous montrons par la suite, l'importance de la multimodalité pour réduire les effets néfastes de la congestion et assurer par conséquent, une mobilité durable.

I.2. Les transports : évolution, importance et typologie

I.2.1. Evolution des transports

Selon le commissariat général au développement durable (juillet 2011), la circulation routière augmente en 2010 avec une croissance de 1,5 % en véhicules-km. Cette augmentation concerne l'ensemble des types de véhicules : + 0,9 % pour les véhicules particuliers, + 3,4 % pour les véhicules utilitaires légers et + 4,0 % pour les véhicules lourds (poids lourds, bus, cars). Concernant les voitures particulières, la poursuite des avantages procurés par l'usage de ce moyen de transport a favorisé l'accroissement du parc et son rajeunissement.

Cette augmentation continue des déplacements urbains est expliquée par différents facteurs:

I.2.1.1. Le développement de l'urbanisation

L'explosion récente du taux d'urbanisation s'est appuyée en grande partie sur l'extension des réseaux urbains et de la motorisation populaire ; cette dilatation spatiale a ainsi donné naissance à une nouvelle forme d'urbanité uniquement tributaire de l'automobile. « L'offre abondante de terrains à bâtir ou de logements neufs, bon marché, les aides à l'accession à la propriété, la création de zones d'activités et de centres commerciaux en grande périphérie entraînent, en effet, un recours massif aux modes motorisés » [Heran 2001].

Les conséquences directes de l'accroissement démographique en zones urbaines sur la mobilité des citadins ont été amplifiées par deux caractéristiques particulières de l'urbanisation moderne : la dispersion des fonctions urbaines et la montée rapide des valeurs foncières.

I.2.1.2. L'augmentation du niveau de vie

L'augmentation du niveau de vie a multiplié les occasions d'achat, de loisirs, d'affaires personnels à traiter et de relations sociales,…et donc de déplacements. D'autre part au niveau des entreprises l'évolution des activités vers la tertiarisation a entraîné la multiplication des échanges d'informations et des déplacements d'affaires. Enfin, la diminution de la durée de travail et l'augmentation générale du pouvoir d'achat dans les pays développés ainsi que dans les pays émergents ont eu un impact important sur la progression des déplacements urbains pour motifs autres que les liaisons domicile- lieu de travail: achats, loisirs, affaires personnelles,…

Avec l'accroissement des revenus au cours du siècle dernier, l'achat d'une automobile par le chef du ménage et même une autre par le conjoint dès leur entrée dans la vie active et la naissance du premier enfant, fait désormais partie de la norme de consommation du ménage.

La motorisation a ainsi envahi toutes les couches de la population même si les personnes à revenus élevés se déplacent toujours nettement plus en voiture que les personnes à revenus modestes (la voiture peut être considérée comme un bien de luxe).

I.2.1.3. L’accroissement de la mobilité

La mobilité est à la fois la conséquence et la cause directe de l’augmentation du taux de motorisation des populations et plus précisément de l’augmentation du taux d’utilisation de l’automobile. En effet, dans une agglomération donnée, plus la motorisation est élevée, plus la mobilité de la population sera élevée ; c'est-à-dire que plus le nombre moyen de voitures particulières par ménage (ou par personne) y est élevé, plus le nombre moyen de déplacements motorisés par ménage (ou par personne) y est également élevé.

En outre, « la dérégulation de l’emploi et la flexibilité de l’organisation du travail, fondées sur la flexibilité des horaires, ont bouleversés les scansions traditionnelles de la vie sociale et ont remis en question les flux temporels qui reposaient sur des pratiques homogènes » [Godard 2000, cité dans Banos 2001].

La croissance des déplacements urbains suite à l’évolution des motifs de déplacement a dépassé la croissance urbaine ce qui a posé des problèmes de circulation occasionnés principalement par l’expansion de la voiture particulière. Toutes les considérations économiques, sociologiques ou démographiques convergent pour expliquer l’extension et le renforcement de la dépendance automobile.

La facilité de déplacement est un facteur primordial pour la croissance économique. Il s’avère dès lors très important de mettre en place des politiques rigoureuses permettant de bien gérer la mobilité qui « n’est plus seulement un coût qu’il convient de minimiser, mais elle est aussi productrice d’une utilité » [Banos 2001].

I.2.2. Importance des transports

I.2.2.1. Pour l’économie

Le transport est une activité fondamentale qui joue un rôle complexe et multiple dans le fonctionnement et dans le mécanisme du développement d’un pays. Il permet les échanges de biens et de personnes entre les différentes parties du territoire ainsi qu’avec l’extérieur. Sans le transport, les relations entre personnes ou entre unités de production

seraient impossibles. La production ne serait pas diversifiée, le commerce serait très limité et l'échelle de la vie sociale ne pourrait être que fortement réduite.

Les transports jouent dans notre univers un rôle décisif et exercent une influence déterminante sur les échanges internationaux. Ils sont indispensables pour l'économie et son expansion. En effet, les systèmes de transport devraient offrir des services et des installations rentables. Ils sont appelés aussi à être abordables financièrement pour chaque génération et à soutenir une activité économique durable et dynamique.

Par ailleurs, le transport est de plus en plus un moyen puissant d'assurer le développement économique harmonieux de la nation et de l'intégrer pour lui permettre de jouer son rôle dans la structure économique mondiale. Il est l'instrument essentiel de la coopération économique internationale au niveau de sa relation à l'heure où l'on souligne l'interdépendance des économies.

I.2.2.2.Pour la société

Les systèmes de transport sont, à la fois la condition et le résultat des relations sociales car ils créent le cadre spatial et temporel des échanges entre les acteurs et forment ainsi la base de toute société. Ils sont appelés à répondre aux besoins fondamentaux des humains : santé, confort, commodité, sécurité…Il s'agit d'une activité qui doit se produire avec le minimum de stress pour le tissu social. En plus, le transport doit offrir un choix raisonnable de modes de transport.

I.2.2.3. Pour l'aménagement du territoire

Les transports ont un caractère structurant qui fait du système de transport un élément essentiel de l'aménagement du territoire. A travers les choix des investissements, il est possible d'éviter une concentration accrue des populations et des activités autour des grandes agglomérations et un dépérissement des régions excentrées. On peut par exemple, voir se dessiner une discrimination de l'espace selon l'accessibilité aux modes rapides des transports (avion, TGV, autoroutes,…). Ainsi les transports modifient la géographie physique et humaine par l'organisation des villes et des localisations industrielles. « Les transports collectifs participent ainsi indirectement à des missions d'aménagement spatial en permettant d' « insérer » dans la ville certaines zones urbaines périphériques jusque- là

isolées, désenclavées et de fait économiquement fragiles » [Mirabel 99]. Ainsi, le rôle du système de transport dans la structuration de la ville est important et peut être prévisible en fonction d'un plan d'aménagement conçu et appliqué.

Malgré l'importance qu'occupe le transport maritime dans le commerce international (des marchandises surtout), ainsi que celle du transport aérien dans le transport de personnes au niveau surtout mondial, la place du transport routier dans l'économie des pays reste toujours prépondérante. C'est ce qui explique l'intérêt qu'attribuent les pouvoirs publics aux questions des véhicules routiers (et principalement la voiture particulière) et la nécessité de la gestion et du contrôle de la route.

I.2.2. Classification des transports

Un mode de transport, ou moyen de transport, ou système de transport, est une forme particulière de transport qui se distingue principalement par le véhicule utilisé, et par conséquent par l'infrastructure qu'il met en œuvre. Un mode de transport désigne le moyen utilisé pour transporter un objet (un bien ou une personne) d'un lieu à un autre[1]. Lorsque plusieurs modes de transport sont associés pour concourir à la réalisation d'une opération de transport, c'est le terme multimodalité qui est utilisé.

Dans un sens plus général, un mode de transport est un accessoire utilisé par un être humain afin de se déplacer d'un point A à un point B. A cet effet, il existe différents moyens de transport, tel que la voiture, la motocyclette et le vélo, qui sont des moyens de transports individuels. Il y a également les moyens de transport en commun, tels que l'autocar, le métro, le train, le taxi,... Il y a également le bateau et l'avion, qui sont en général des moyens de transport de masse utilisés pour le déplacement sur de longues distances. Tous ces moyens utilisent pour leur circulation, différentes infrastructures (route, chemins de fer, air, mer,..). Par conséquent, on note une diversité des modes de transport : le transport routier, le transport ferroviaire, le transport maritime, le transport aérien,….

[1] *www.businessdictionary.com*

Par ailleurs, nous pouvons distinguer les transports selon différents critères : le nombre de personnes transportées (les transports individuels et les transports collectifs), la nature du service rendu, et le nombre de modes utilisés.

I.2.2.1. Classification fonctionnelle des moyens de transport

I.2.2.1.1. Les transports individuels

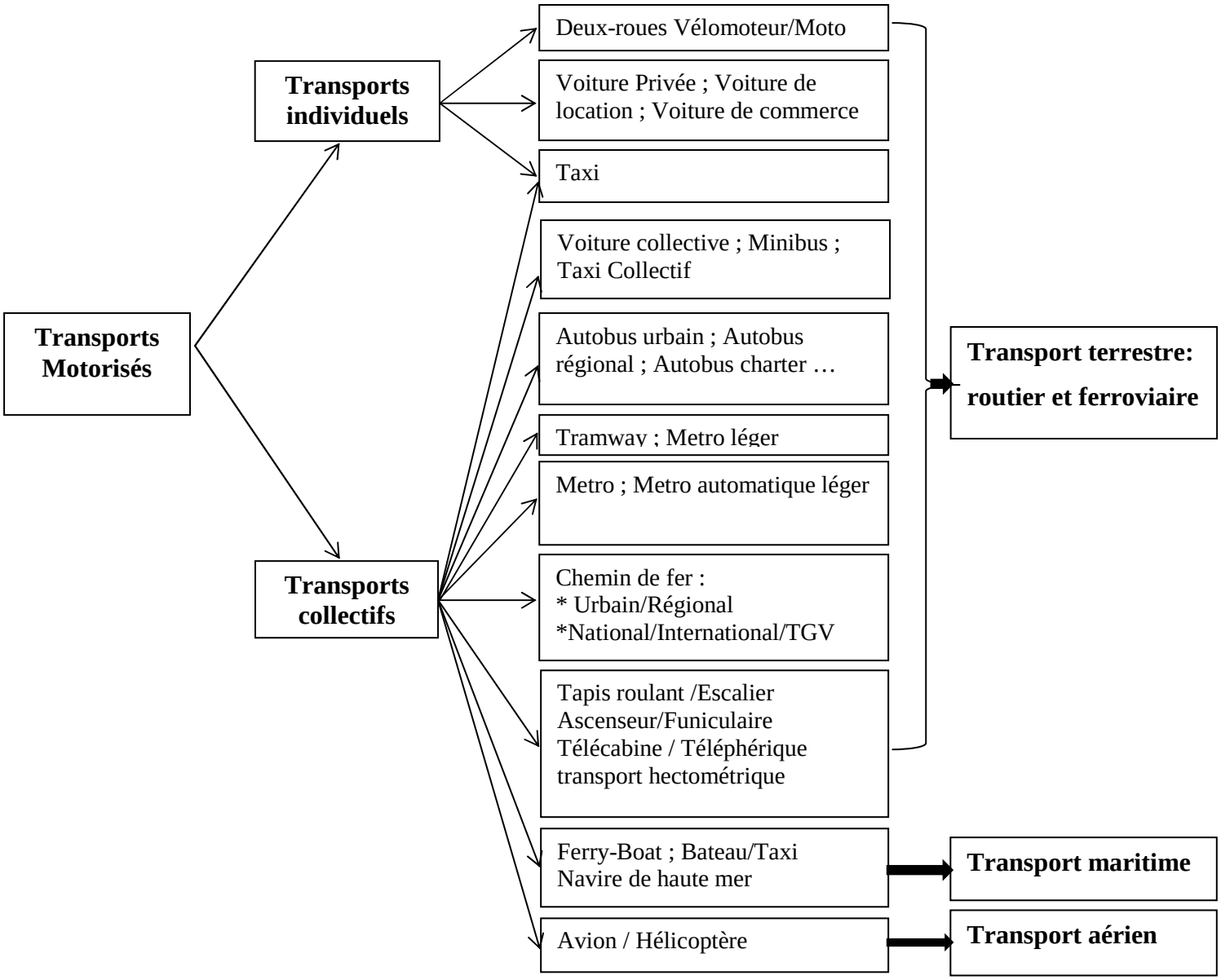
C'est le cas où une seule personne utilise, pour son déplacement, outre les transports non motorisés (marche à pied, vélo,…), un moyen de transport particulier et pour son propre compte tels que l'automobile privée, les taxis publics…. La voiture particulière représente le mode de transport individuel le plus émergent.

I.2.2.1.2. Les transports collectifs

Les transports collectifs ou en commun, consiste à transporter plusieurs personnes ensemble sur un même trajet. Ils incluent tous les moyens de transport en commun dont à titre d'exemple les métros, bus, trains, tramway, les services réguliers publics tels que les transports scolaires, etc. Il est généralement accessible en contrepartie d'un titre de transport (billet, ticket, carte).

Les transports collectifs regroupent des moyens qui sont destinés à la collectivité d'autres peuvent être utilisés d'une façon individuelle. Cette catégorie de transports offre des services ouverts au grand public et dont toutes les informations (les trajets, les itinéraires, les points d'arrêt, les fréquences, les horaires et les tarifs) sont connues à l'avance et disponibles à tout le monde. Ce mode de service implique toutes les dessertes régulières urbaines et extra-urbaines.

Les taxis traditionnels sont à la fois, un transport collectif et individuel. Tout dépend du nombre d'individus qui les demandent. La figure ci-dessous illustre les différents moyens de transport selon leur fonction.



<u>Figure I.1</u> : Classification fonctionnelle des moyens de transport

I.2.2.2. Classification du transport selon la nature du service rendu

Une autre distinction des transports peut être faite selon la nature du service offert aux usagers. Nous distinguons dans la catégorie des transports publics (collectifs ou individuels) deux services particuliers de transports :

I.2.2.2.1. Le transport à la demande

Il s'agit des services collectifs individualisés déterminés en fonction de la demande des usagers. Leurs règles générales de tarification sont connues au préalable, par contre leurs itinéraires (origines et destinations) et fréquences sont établis en fonction de la demande lorsqu'elle existe [Cordeau 04]. Nous pouvons citer dans ce cas, les bus et minibus à la demande, le transport des personnes handicapées, les urgences [Beaudry 09]… les véhicules utilisés dans ce contexte sont de capacité minimale fixée à quatre places incluant celles du conducteur. Les services publics réguliers et les services publics à la demande de transport routier peuvent considérer de manière spécifique des catégories particulières de personnes : personnes âgées, élèves et étudiants handicapés, personnes handicapée…[2].

I.2.2.2.2. Le transport occasionnel

Ce type de transport n'est utilisé que lors d'occasions particulières (e.g. organisation d'une colonie de vacances, une visite touristique, un évènement spécifique : concert, exposition…). Cette catégorie se dissocie en deux types principaux, à savoir les circuits à la place et les services collectifs. Le premier type concerne les voyages organisés dont les places sont vendues séparément et ramènent généralement les voyageurs à leur point de départ, alors que le deuxième concerne la mise à disposition exclusive d'un ou plusieurs groupes connus, constitués à l'avance d'au moins de dix personnes.

Dans leur diversité, les transports en commun fournissent aux usagers l'occasion de bénéficier de moyens de transport fiables, propres, et économiques de moindre coût. L'amélioration continue de la qualité des services offerts par ces moyens ne cesse d'encourager les personnes à aller vers ces services. Cependant, les véhicules utilisés dans ce contexte restent d'usage restreint à une catégorie spécifique de personnes. En effet, l'usage des modes de transport collectifs reste le lot des personnes à revenus limités, les

[2] *Dans le cadre des problèmes de tournées de véhicules (VRP : Vehicle Routing Problem) (Manuel Iori, Juan José Salsazar Gonzalez, Daniele Vigo, 2007), un problème particulier à citer est celui du problème de ramassage et dépose d'objets ou de personnes (Pickup and Delivery Problem : PDP). Cette classe des problèmes de tournée de véhicules consiste à transporter des « charges » d'une origine à une destination données sans transbordement ni emplacements intermédiaires (M. W. P. Savelsbergh, 1995).*

étudiants, les personnes en recherche d'emplois ou à revenu modeste, etc. Ces personnes plus ou moins *« démunies »* ne peuvent pas accéder à l'usage de la voiture particulière étant donnée l'importance des charges liées à son utilisation (prix d'achat élevé, frais d'entretien importants, frais d'assurance,…).

Une étude récente concernant la mobilité des français vient confirmer cette hypothèse montrant que le transport par voiture personnelle reste le mode de transport le plus utilisé [Mer 07]. Cette étude révèle l'usage abusif de l'automobile particulier (de l'ordre de 81,8% du transport intérieur) [Feki 10].

I.2.2.3. Classification des transports selon le(s) mode(s) adopté(s)

Les moyens de transport qu'ils soient publics ou privés possèdent leurs propres avantages et inconvénients. Parmi les principaux problèmes du transport en commun en particulier, la limitation des zones de desserte qui est en réalité un inconvénient majeur et un principal handicap à la mobilité des personnes. Pour remédier à cet inconvénient, des combinaisons de plusieurs modes de transport permettent de fournir plus de flexibilité et de souplesse dans les déplacements rendant ainsi le réseau de transport plus fiable et beaucoup plus rentable. Dans ce contexte, les services de transport ont connu différentes formes selon qu'il s'agisse d'un ou de plusieurs modes.

I.2.2.2.1. Le transport uni-modal (ou monomodal)

Ce type de transport implique l'usage lors d'un déplacement, d'un seul mode de transport. Il désigne le fait d'utiliser un type spécifique de véhicule (Bus, Métro, Tram, voiture particulière…).

Vu les limites et les inconvénients de l'utilisation d'un seul mode de transport, la combinaison de deux modes ou plus c'est avérée nécessaire.

I.2.2.2.2. La complémentarité modale : le transport comodal

La caractéristique principale des systèmes de transport est la concurrence exacerbée entre différents modes de transport. Cette concurrence a eu tendance à produire un système de transport segmenté et non intégré où chaque mode a cherché à exploiter ses propres avantages en matière de coût, de service et de sécurité. Ce qui a engendré un

déséquilibre modal traduit par des effets négatifs affectant l'environnement, la société et l'économie. Ce résultat a amené à la recherche d'une harmonie et une complémentarité entre les divers modes. Ces efforts d'intégration des systèmes de transport ont abouti à la comodalité.

La comodalité est définie comme étant « la combinaison optimale des différents modes sur la chaine de transport » [Commission 01]. Il s'agit d'un mode particulier adoptant le transport sous toutes ses formes afin de fournir un service souple offrant un maximum de flexibilité à l'usager. C'est dans ce contexte que sont alors envisagées des combinaisons rassemblant les moyens de transports en commun (Tram, Train, Avion, etc.) et privés (automobile privée, etc.). La comodalité vient remédier aux problèmes de la concurrence modale et instaurer un certain équilibre mettant en exergue la complémentarité entre les modes de transports collectifs et privés. L'amélioration de la qualité des services offerts est le but principal visé par les systèmes de transport comodaux. Pour atteindre cet objectif, il est donc, nécessaire d'optimiser les combinaisons en joignant les transports individuels à ceux collectifs pour plus d'efficience [Gille 06]. En effet, passant de la concurrence à la complémentarité, le transport en général et plus particulièrement le transport des personnes ont évolué vers une qualité de service plus satisfaisante alliant les avantages propres à chacun de ces modes. Cette évolution a été ressentie tant sur le plan économique consistant en la minimisation des coûts et budgets alloués au transport que sur le plan environnemental par la minimisation des émissions de polluants par surtout les voitures particulières.

Sous cette forme de transport, apparaissent d'autres formes de transport à savoir la multimodalité et l'intermoidalité

I.2.2.2.3. Le transport multimodal

La multimodalité constitue un moyen de rééquilibrage entre les différents modes de transport à travers la combinaison de plusieurs modes de transport. Elle concerne toute offre de transport faisant usage de plusieurs et différents moyens de transport pour une même demande de déplacement d'une origine vers une destination donnée. Le libre choix revient donc à l'usager de décider du moyen qu'il veut emprunter pour se déplacer.

La multimodalité permet, plus particulièrement, de limiter l'utilisation intensive du transport routier qui engendre des effets externes négatifs et de revitaliser le transport ferroviaire qui est peu exploité. La justification du recours au transport multimodal est par conséquent, plus socio- économique (prise en compte des effets externes) que financière [ROSE 06]. Le transport multimodal s'inscrit dans le cadre du développement durable puisqu'il renforce la sécurité en matière de transport et il limite la pollution.

La majorité des pouvoirs publics ont lancé des politiques visant à promouvoir le développement du transport multimodal afin de faire face à l'augmentation des trafics des marchandises, à la saturation du réseau routier et à l'utilisation efficiente de l'infrastructure existante.

Une multitude de travaux [Zidi 06, Kammoun 07, Zgaya 07,…] ont traité des sujets sur la multimodalité en tant que service de transport de grande ampleur. Plusieurs systèmes d'aide au déplacement des voyageurs existent aussi et ont pour mission de fournir à leurs utilisateurs des solutions indiquant la diversité des modes de transport qu'ils peuvent emprunter lors de leurs déplacements. Des systèmes particuliers peuvent aller jusqu'à choisir pour leurs usagers le mode qu'il convient de prendre selon certaines stratégies de résolution fixées au préalable. Le choix s'effectue alors selon la pertinence du service de transport et l'optimalité des combinaisons.

Le transport multimodal regroupe différentes formes et aspects de transport. On note le transport intermodal et le transport combiné.

I.2.2.2.3.1. Le transport intermodal

Le transport intermodal représente un cas particulier du transport multimodal du fait qu'il s'agit d'utiliser plus qu'un mode de transport pour se déplacer mais dans ce cas sans rupture de charge. Il constitue un système de transport en vertu duquel deux modes de transport ou plus sont utilisés pour permettre une chaîne de transport de porte à porte. Ceci en utilisant des unités de charge spécifiques (pour le transport de marchandises) et des pôles d'échange (pour le transport de personnes).

En effet, à l'opposé du transport monomodal, l'intermodalité désigne le fait d'adopter la possibilité de changer de mode de transport pour effectuer un déplacement

d'une origine à une destination donnée. Ainsi, deux modes de transport ou plus peuvent être utilisés pour réaliser un trajet complet entre deux points.

L'intermodalité constitue donc, une solution efficace aux limites engendrées par les transports en commun dont plus particulièrement, le manque de desserte de quelques zones surtout extra-urbaines.

I.2.2.2.3.2. Le transport combiné

Le transport combiné est une forme de transport intermodal. Par rapport au transport multimodal et intermodal, le transport combiné se limite à l'utilisation de deux modes de transport seulement. Ce mode de transport combine généralement, les modes route-fer et route-mer. Lorsque seuls les modes de transport routier et ferroviaire sont utilisés, on parle de transport combiné rail/route ou ferroutage. Le transport combiné permet d'allier la productivité du fer et de la voie d'eau avec la flexibilité de la route.

I.3. Le transport : un vecteur pour le développement durable

Le rapport Brundtland de 1987 définit le développement durable comme étant « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs» [Raffaud 00]. Le transport constitue le principal vecteur de développement des sociétés en favorisant la mobilité des biens, des personnes, et de l'information.

A la différence de la croissance, le développement durable « mêle intimement l'économique, le social, l'individuel, le culturel, l'écosystème». Il s'agit d'un aspect de la durabilité mondiale :

- Qui permet aux individus et aux sociétés de satisfaire leurs principaux besoins de déplacement d'une manière sécuritaire, équitable entre les générations et qui respecte la santé des humains et des écosystèmes[3].

3 Au sommet de la terre à Rio en 1992, « les êtres humains sont au centre des préoccupations relatives au développement durable : ils ont droit à une vie saine et productive en harmonie avec la nature ».

- Dont le coût est raisonnable, offrant un choix qui appuie une économie dynamique dans une logique d'intermodalité.

- Qui limite les émissions et les déchets de manière qu'ils ne dépassent pas la capacité de la planète à les absorber tout en minimisant la consommation des ressources non renouvelables et l'usage des terres (diminuer la pollution et le bruit)[4].

Le transport représente un élément essentiel au développement durable. Il est indispensable pour l'économie et son expansion. Il devrait offrir des services et des installations rentables et soutenir une activité économique durable et dynamique, du pays. Il est aussi appelé à être abordables financièrement pour chaque génération. Il est de plus en plus un puissant moyen d'assurer le développement économique harmonieux d'une nation et de l'intégrer pour lui permettre de jouer son rôle dans la structure économique mondiale. Le degré de développement des transports et leur infrastructure et le niveau des prestations des moyens de transport constituent de nos jours, le facteur décisif et la condition préalable du fonctionnement efficace couronné de succès de tout le système économique, ainsi que tout le système social.

Par ailleurs, le système de transport constitue un des facteurs qui sont responsables des différences des situations ou des relations spatiales entre les acteurs de la vie économique en fonction du temps ou de l'accessibilité. Il est appelé à répondre aux besoins fondamentaux des humains : santé, confort, commodité, sécurité…dont le but est d'éviter le stress pour le tissu social et offrir un choix raisonnable de modes de transport, de type d'habitation, de mode de vie tout en étant le moins bruyant possible.

---

4 *Le texte fondateur du sommet de Rio (1992) récapitule les principes généraux du développement durable et qui sont :*

- Le principe de prévention à la source et de précaution : ce principe cherche à éviter la dégradation de l'environnement.

- Le principe du pollueur- payeur : qui fait imputer au pollueur les dépenses relatives à la prévention ou à la réduction des pollutions dont- il pourrait être l'auteur.

- Le principe de participation : implique l'adhésion sociale.

- Le principe de rationalité : prend en considération toutes les conséquences sociales des décisions suite à la répartition équitable des avantages et des inconvénients des réalisations.

- Le principe d'intégration ou d'intervention : ce principe valorise l'intégration à tous les niveaux : environnemental, économique, social et humain.

- Le principe de solidarité : se préoccupe de la consommation énergétique. Il cherche de remplacer les énergies non renouvelables et renouveler les énergies renouvelables.

- Le principe de liberté des générations future : préconise de laisser aux générations la marge de manœuvre nécessaire pour qu'elles puissent faire des choix en matière de développement.

- La combinaison des principes d'équité sociale, d'efficacité économique, d'amélioration de l'environnement, de simplicité de l'appareil de contrôle et de gestion.

En outre, les transports ont un caractère structurant qui fait du système de transport un élément essentiel de l'aménagement du territoire. A travers les choix des investissements, il est possible d'éviter une concentration accrue des populations et des activités autour des grandes agglomérations et un dépérissement des régions excentrées.

Une politique de développement durable vise à concilier la demande de mobilité- présente et future- avec les impératifs d'efficience économique, de justice sociale et de sauvegarde de l'environnement. « La mobilité durable est considérée comme un des clés pour réussir à concilier les besoins et les attentes de mobilité (présents et futurs) avec les impératifs d'équité, de justice sociale et de sauvegarde de l'environnement » [Pini et al 2000].

I.3.1. …Vers une ville durable

Comme on parle de mobilité durable on parle aussi de ville durable. La ville est un « point nodal relayé d'une façon régulière par un ensemble d'axes de circulation, matérialisant spatialement plusieurs types d'échange […]: local, régional et national, ce qui crée un problème d'articulation des seuils de circulation sous la menace permanente de la saturation » [Belhareth 2004].

Il est à noter que la différence des volumes circulatoires en fonction de la taille de la ville est liée étroitement au volume de l'activité économique et à l'importance des entreprises installées dans l'espace urbain, au poids démographique ainsi qu'aux infrastructures que représente chaque ville.

Les problèmes d'accès à certains centre- villes congestionnés sont très aigus ce qui nuit à leur fonctionnement. D'où la nécessité de maîtrise de la durabilité des agglomérations. En effet, la ville durable est définie en 1996 par la Commission Française pour le Développement durable comme une ville « dont les habitants disposent des moyens d'agir pour qu'elle soit organisée et fonctionne dans des conditions politiques, institutionnelles, sociales et culturelles satisfaisantes pour eux et équitables pour tous.

- Dont le fonctionnement et la dynamique satisfont à des objectifs de sécurité des conditions biologiques de vie, de qualité des milieux et de limitation de consommation des ressources.
- Qui ne compromet ni le renouvellement des ressources naturelles, ni le fonctionnement, des relations et la dynamique des écosystèmes micro- régionaux englobant, ni enfin les grands équilibres régionaux et planétaire indispensables au développement durable des autres communautés ;
- Et qui s'attache à préserver les capacités de vie et les potentialités de choix des générations futures » [Raffaud 00].

Pour l'amélioration de l'environnement et la recherche du développement durable, plusieurs objectifs de base doivent être réalisés :

- Réduction du nombre de kilomètres parcouru individuellement.
- Améliorations techniques des véhicules.
- Subventions publiques pour certains modes de transport.
- Réduction des vitesses pour les polluants liés à l'ozone ou à l'effet de serre.
- L'accroissement des taux d'occupation des véhicules par de nouvelles gestions.
- Incitations fiscales.
- Recours à de nouvelles énergies.

I.3.2. Les effets négatifs du transport : une menace au développement durable

Alors que le transport constitue un vecteur important de croissance économique, il présente divers inconvénients qui affectent l'usager, la collectivité, l'économie et l'environnement. L'ensemble de ces effets (positifs et négatifs) est appelé des externalités du transport.

I.3.2.1. Définition des externalités

La notion d'externalité a été mise en évidence par A. Marshall. En outre, [Mankiw 98] définit l'externalité comme étant « l'impact des actions de quelqu'un sur le bien-être

d'autrui sans que cet impact soit pris en considération par le marché ». Les externalités sont donc, des effets secondaires engendrés suite à une décision d'un agent économique sur d'autres agents. Ce concept correspond pour A. Pigou à une situation où « une personne A, alors qu'elle est en train de rendre un certain service, contre paiement, à une personne B affecte incidemment, en bien ou en mal d'autres personnes (non productrices de services similaires) et cela de telle manière qu'un paiement ne puisse être imposé à ceux qui en bénéficient, ni une compensation prélevée au profit de ceux qui en souffrent » [Pigou 1920, cité dans Reymond 05]. Le concept d'externalité tel que l'entendent les économistes désigne « les sous-produits d'activité économique qui ont des conséquences négatives ou positives mais sont sans effet sur le bien-être et les coûts de ceux qui en sont à l'origine » [Nelson 04].

Techniquement, une externalité existe lorsque la fonction d'utilité (de production ou de consommation) d'un agent économique (A) entre en tout ou en partie dans la fonction d'un autre agent (B) qui ne participe pas à la décision [Mejri 2009].

Les externalités se regroupent en deux catégories :

Les externalités négatives : On parle d'externalité négative lorsqu' un acte (ou une décision) d'un agent économique entraîne un effet négatif sur un autre agent économique qui ne prend pas part à cet acte. Il s'agit de déséconomie externe. On peut retenir l'exemple des gaz d'échappement émis par les automobilistes. Ce sont une externalité négative puisque chaque conducteur crée de la pollution que les autres doivent respirer.

L'existence d'une externalité négative suppose deux conditions. La première est que l'activité d'un agent impose une perte de bien-être à un autre agent. La deuxième suggère que cette perte de bien-être n'est pas compensée (absence de transaction).

Les externalités positives : Lorsqu'un acte (ou une décision) d'un agent économique entraîne un effet positif sur un autre agent économique qui ne prend pas part à cet acte, on parle d'une externalité positive. Il s'agit, dans ce cas, d'économie externe. La recherche technologique par exemple, est porteuse d'externalités positives puisqu'elle génère un savoir que tout le monde peut utiliser.

Outre la distinction externalités positives/ externalités négatives, autres classifications des externalités ont été réalisées par les économistes[5].

En présence d'externalités (positives ou négatives), l'équilibre concurrentiel n'est plus un optimum au sens de Pareto[6].

I.3.2.2. Les externalités négatives du transport

Les externalités négatives du transport sont nombreuses. On note la pollution acoustique, la pollution atmosphérique, la congestion, les accidents, la pollution de l'eau, la pollution du sol, l'occupation de l'espace, les déchets...ces externalités peuvent être classées selon qu'il s'agisse d'effets sur l'environnement, les individus ou l'économie.

I.3.2.2.1. les effets négatifs du transport sur l'environnement

I.3.2.2.1.1. La pollution atmosphérique et l'effet de serre

La qualité de l'environnement est devenue une des préoccupations majeures des publics ces dernières années. « Sous l'effet d'une prise de conscience sociale, politique et d'une médiation importante, la prise en compte de l'environnement devient essentielle dans tout projet d'infrastructure et plus particulièrement dans le domaine sensible de transport » [CETUR 1994]. On distingue trois niveaux de pollution à savoir la pollution locale, la pollution régionale et la pollution planétaire (effet de serre). Ces niveaux différents de pollution ayant divers effets négatifs, trouvent leur origine dans la consommation excessive de l'énergie.

Le nombre important des menaces affluant sur la terre et l'environnement ont engendré des problèmes d'une incidence assez grave sur les êtres vivants[7]. L'impact péjoratif de ces problèmes touche principalement l'équilibre environnemental, le climat[8], la

---

[5] *A. Bonnafous (cité dans M. Reymond, 2005) a établi une la classification suivante :*

- Les externalités marshalliennes : sont au cœur de la sphère marchande en amont ou en aval de la firme (perte financière liée à un retard dû aux encombrements).

- Les externalités qui obligent à une intervention publique suite à la dégradation d'un bien collectif (route dégradée).

- Les externalités inter- individuelles : pertes de temps dans les encombrements ou l'insécurité routière.

- Les effets sur l'environnement.

[6] *Une allocation est dite optimale au sens de Pareto lorsqu'il est impossible d'augmenter le bien être d'un agent sans diminuer celui d'un autre (voir Varian [2002]).*

[7] *http://www.grida.no/publications/other/geo3/?src=/geo/geo3/*

[8] *http://www.unep.org/climatechange/*

qualité de la vie, etc. Le réchauffement climatique est entre autre à l'origine de ces menaces engendrant un déséquilibre biologique et écologique tel que la fonte des glaciers par exemple. Les données recensées par l'Agence pour l'Environnement de l'union européenne[9] révèlent que pratiquement le quart (23,8%) des émissions totales de gaz à effet de serre et légèrement plus d'un quart du total des émissions CO_2 (27,9%) dans l'UE-27 sont dus aux engins utilisés dans les transports en 2006. Ce taux n'a pas considérablement changé malgré les mesures et dispositions prises en ce sens quelques années auparavant. En effet, le secteur des transports symbolisait le principal acteur dans les émissions de gaz à effet de serre et était responsable de 28% des rejets de CO_2 dans l'atmosphère à l'échelle européenne en 2003 et 35% à l'échelle nationale [Clavel 07].

Plusieurs chercheurs et praticiens se sont particulièrement intéressés aux problèmes de transport. Ce domaine en particulier se trouve être un facteur pivot dans l'importance des rejets de dioxyde de carbone et émissions de gaz à effet de serre (GES) qui impliquent des conséquences péjoratives sur la qualité de la vie. En effet, Le secteur des transports émet quatre gaz à effet de serre différents (CO_2, N_2O, CH_4, HFC), dont le CO2 est le principal et représente à lui seul plus de 95 % des émissions. Le tableau ci-dessous montre l'évolution des émissions de GES du secteur des transports entre 1990 et 2008 et la part importante d'émission de CO_2.

	1990	**2008**
Émissions de GES (millions de tonnes)	117,2	131,4
dont CO2	116,0	131,1

Source : Citepa/Inventaire CCNUCC avril 2010, format PNLCC en France

Tableau I. 1 : Émissions de GES du secteur des transports (tous modes)

Cette évolution peut être expliquée par l'augmentation de la mobilité urbaine engendrée surtout par le transport routier qui est le premier mode d'émission de GES et plus particulièrement, de CO_2 tel que montre le tableau ci-dessous.

[9] *http://www.eea.europa.eu/fr*

Émissions de GES (millions de tonnes)	1990	2007	2007 en %	2008	2008 en %
Transport routier	108.8	124.4	93.6	122,0	93,9
Transport aérien Domestique	3.5	3.6	2.7	3.6	2.7
Transport maritime Domestique	1.5	1.1	0.8	1.0	0.8
Autres (dont transport fluvial)	1.2	3.3	2.5	2.7	2.1
Transport ferroviaire	1.1	0.6	0.4	0.6	0.5
Total	116.0	133.3	100.0	129.9	100.0

Source : Citepa/Inventaire CCNUCC avril 2010, format PNLCC en France

Tableau I. 2 : Émissions de CO_2 par mode de transport

On remarque à partir de ce tableau, l'importance des émissions de CO_2 par le transport routier. Cette importance peut être expliquée essentiellement par l'augmentation du taux de motorisation des individus.

I.3.2.2.1.2. Autres effets négatifs du transport sur l'environnement

D'autres effets négatifs des transports ne doivent pas être négligés. Nous pouvons citer la pollution de l'eau (Par rejet de certaines substances par les péniches et les bateaux, rejet accidentel de substances dangereuses….). La préservation par évitement ou par des mesures de protection très strictes (aménagement physiques, mesures réglementaires de restriction de circulation des véhicules transportant des matières dangereuses) des zones sensibles constitue à cet égard un enjeu extrêmement important pour la collectivité.

De même, nous pouvons noter la pollution du sol (rejet opérationnel ou accidentel de substances dangereuses qui peut atteindre les écosystèmes de l'eau et de l'air), l'occupation de l'espace (le développement des transports, de nouvelles infrastructures, des équipements de régulation du trafic,…constitue des nuisances pour l'espace urbain), les déchets (on note les déchets de construction, les pneus, la tôle et les ferrailles, les huiles de moteurs, les batteries,…).

I.3.2.2.2. les effets négatifs du transport sur les individus

Outre la pollution atmosphérique qui affecte la santé des individus, les systèmes de transport engendrent autres effets.

I.3.2.2.2.1. Le bruit

Selon de nombreuses enquêtes, la nuisance sonore constitue l'atteinte à la qualité de la vie la plus mal supportée[10]. Les effets du bruit routier se manifestent essentiellement par :

- Des effets physiologiques extra- auditifs : modification des rythmes cardiaques, des débits sanguins, des rythmes respiratoires, qui permettent de considérer le bruit comme un facteur de stress pour l'individu.

- Une modification du sommeil : altération des cycles de sommeil et modification des temps passés dans les différentes phases, sans accoutumance observable, qui provoquent des fatigues, frustrations, anxiété, agressivité et parfois même des dépressions nerveuses plus ou moins graves.

- Une modification des comportements sociaux, perte d'informations, réduction du temps de vigilance, etc.

En plus de son impact social, le bruit constitue une distorsion économique. Il permet une dépréciation de la valeur de vente des logements. Différentes mesures peuvent être prises. Il est possible de réduire les niveaux sonores des moteurs thermiques grâce à des techniques telles que l'encapsulage des moteurs et l'adaptation de l'hydraulique pour la commande des pièces en mouvement.

---

[10] *Les transports routiers, le rail et l'avion sont à l'origine de la plus grande partie de cette nuisance. On distingue différents types de bruit : bruit de propulsion, bruit de roulement (pneu et chaussée, roue et rail,…), bruit aérodynamique (variations rapides de pression provoquées par l'interaction entre l'air et le train aux vitesses supérieures à 250km/heure), bruit de jet (se fait sentir lors du décollage et le bruit du compresseur lors de l'atterrissage mais qui dure plus longtemps).*

La solution la plus efficace pour diminuer le bruit des véhicules routiers passe par l'utilisation de l'énergie électrique. De même la technologie des réacteurs a progressé de façon spectaculaire : l'apparition de moteurs à double flux dans un deuxième temps a permis de réduire les niveaux de bruit de façon importante. Les bruits externes et les vibrations représentent également des nuisances à traiter.

I.3.2.2.2.2. Les accidents

L'insécurité automobile demeure une cause importante de décès, réduisant considérablement l'espérance de vie[11]. Les divers usagers de la voirie urbaine (voitures particulières, bus, camions, deux roues, piétons) sont en effet en perpétuel conflit potentiel.

Les accidents de la route ont causé la mort de 4273 personnes en France en 2009 tel que indiqué dans le tableau suivant.

	1995	**2000**	**2005**	**2008**	**2009**
Accidents	132 949	121 223	84 525	74 487	72 315
Tués	8 412	7 643	5 318	4 275	4 273
Blessés	181 403	162 117	108 076	93 798	90 934

Sources : ONISR, RFF, BEA, DGITM/DAM

Tableau I. 3 : Accidents corporels des transports routiers

Entre 1995 et 2000, les coûts externes d'accidents, d'environnement et de congestion ont augmenté de plus de 12% au niveau mondial. Les causes directes de cette augmentation sont d'abord la croissance des volumes transportées surtout dans les transports routiers et aériens, ainsi que l'accroissement des coûts de pollution atmosphérique en transport routier. La route est à elle seule responsable de 87.7% des coûts externes [Liesbeth et al 2004].

[11] *Au Québec, en 30 ans (de 1973 à 2002) ,35600 personnes sont mortes sur les routes.*

I.3.2.2.3. Les effets négatifs du transport sur l'économie

I.3.2.2.3.1. La consommation énergétique

Le secteur des transports urbains a une forte « dérive » de consommation énergétique il représente, lui seul 40% de la consommation énergétique du transport de voyageurs [Morcheoine et al. 1994 cité dans Mirabel 2005]. A cela d'autres problèmes environnementaux se sont ajoutés et sont directement liés aux consommations excessives de carburant et aux émissions induites de polluants : oxyde de carbone, oxyde d'azote, particules, plomb,…. Afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre, un accord international a été signé par plus de 180 pays à Kyoto en décembre 1997. Il s'agit d'une coopération mondiale qui vise la réduction des charges assumées par les industries, la minimisation des maladies et des malaises causées par la pollution de l'air et qui coûtent très cher au système de santé et l'amélioration du rendement énergétique des pays.

En outre, l'énergie constitue une ressource rare et non renouvelable qui nécessite une maîtrise de sa consommation[12]. Une solution complémentaire et efficace pour diminuer les émissions polluantes c'est d'agir sur les véhicules et les carburants. Les systèmes de gestion du trafic participent également, à la lutte contre la pollution.

I.3.2.2.3.2. La congestion

La congestion touche surtout les déplacements en zones urbaines. Elle représente un phénomène très visible et sensible et n'intéresse qu'une faible partie du territoire à un instant donnée et qu'une faible partie de la population. Elle est généralement de courte durée, de 2 à 4 heures/jour. En revanche, là où elle se manifeste (dans les agglomérations ou sur les principaux itinéraires), elle freine la liberté de mouvement.

Ce problème économique (des millions d'heures perdues dans les embouteillages), social (irritation, stress,…), est de plus en plus environnemental, soit à l'égard des urbains eux-mêmes (pollution, stress, bruit), soit à l'égard du climat de notre planète (pollution à effet de serre).

[12] *Le succès d'Airbus a reposé, pour partie sur le fait que ses avions consomment moins de carburant.*

En plus des effets négatifs, le transport engendre aussi des externalités positives. Nous pouvons noter ainsi, les effets structurants du transport. En fait, le développement d'une route peut modifier la structure du territoire traversé. Des villages et des marchés peuvent apparaître à proximité de l'infrastructure. De même le développement du réseau de transport augmente l'accessibilité de certaines parties du territoire. Cette amélioration de l'accessibilité a pour effet de générer une augmentation de la valeur foncière des terrains, de limiter la dépopulation des zones de faible densité, et de rendre plus attractifs les centres et certaines villes ou villages. Ces effets ont pour conséquence de développer et agrandir la fonction commerciale et les services. Aussi les infrastructures du transport ont une grande importance dans la sécurité nationale et les services civils comme elles peuvent jouer le rôle de coupe-feu.

I.4. Evolution de l'automobilisme et phénomène de congestion

I.4.1. Prédominance de l'automobile privée

L'évolution de l'industrie automobile constitue un facteur qui contribue fortement à l'augmentation de l'utilisation de l'automobile privée. Cette industrie est souvent appelée l'industrie des industries, elle est le premier investisseur au monde dans la R&D[13]. Elle constitue le moteur des économies des pays développés. En effet, la poursuite de l'augmentation du nombre d'automobiles ces dernières années s'explique essentiellement par la généralisation progressive de la seconde voiture.

La production de l'automobile est en expansion (une voiture neuve est produite par seconde dans le monde). Plusieurs études sur l'appréhension de l'usage des véhicules particuliers ont été faites de par le monde démontrant le succès sans limite de ce mode. Des statistiques révélées dans [Fraichard 05] comptabilisent le nombre d'automobiles en l'an 2000 à 740 millions dans le monde. La plupart d'entre eux sont dans les pays industrialisés avec une moyenne énoncée de 500 voitures pour 1000 habitants et 1500 kilomètres de distance parcourue chaque année. Par ailleurs, cette prédominance de la voiture particulière n'est pas tout à fait nouvelle et ne représente pas un phénomène émergent dans la mesure où en 1999, [Dupuy 99] annonçait déjà une dépendance aux transports automobiles.

[13] *Certains constructeurs automobiles comme Ford, Daimler- Chrysler, Toyota ou Général Motors dépensent annuellement plus que 5 milliards de dollars en R&D.*

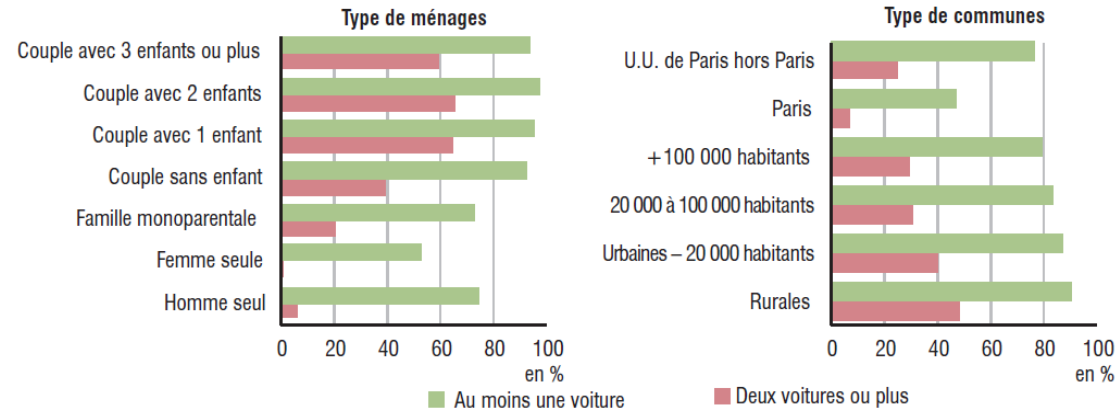
Le tableau ci-après montre l'évolution et la densité de l'usage de la voiture particulière dans quelques pays du monde entre 1985-2010.

	1985	1990	1995	2000	2005	2010
États-Unis	708	752	759	774	819	814
Italie	412	507	541	615	656	688
Espagne	276	403	430	517	569	610
Allemagne	450	512	529	553	593	545
France	**446**	**495**	**520**	**564**	**596**	**599**
Japon	375	456	527	566	586	592
Canada	559	617	562	573	584	619
Belgique	363	419	463	505	531	562
Suède	400	455	445	481	507	525
Pologne	117	160	229	287	378	509

Source : comité des constructeurs français d'automobiles (CCFA).

Tableau I. 4 : Nombre de voitures et de véhicules utilitaires pour 1 000 habitants au 1er janvier

Selon ce tableau, la France occupe la quatrième place en termes de nombre de voitures utilitaires pour 1000 habitants. La figure ci-dessous démontre la proportion des ménages qui possèdent une ou plusieurs voitures jusqu'à 2006.



Champ : France métropolitaine
Source : Insee, enquête budget de famille 2006

Figure I.2 : proportion des ménages possédant une ou plusieurs voitures

L'importance de la proportion du nombre de voitures privées par ménage peut être expliquée par l'amélioration du pouvoir d'achat des ménages. En effet, le revenu disponible brut des ménages est de +2.2% en 2004. En 2006, ce revenu a accéléré de +2.2% (contre 1.1% en 2005). Ceci s'appuie essentiellement sur le renforcement de la dynamique des salaires des individus (+3.5% entre 2004 et 2006)[14]. La part du transport dans les dépenses de consommation des ménages est de 14,9 % en 2005.

Par ailleurs, le biais en faveur du choix du mode de transport privé plus commode et plus prestigieux est source de déséquilibre entre l'offre et la demande des différents modes de transport. Toute personne devant rejoindre une opportunité localisée évalue les avantages et les inconvénients des différents moyens de transports dont elle dispose pour y accéder. Le choix du mode de transport est fortement influencé par les critères qui caractérisent l'opportunité cherchée. Les habitants devraient toujours, disposer d'un éventail de solutions de transport dont ils choisissent. Les critères qui influencent la demande du transport et orientent le choix modal des usagers sont très connus. Ce sont : les données socio- économiques (âge, revenu, sexe,…). Les coûts monétaires (ce critère présente un manque de conscience de sa valeur réelle surtout pour la voiture), le temps total de déplacement (en général sur- estimé pour les transports collectifs), la distance de trajet, la commodité, la sécurité, la capacité, la régularité, la fiabilité, la liberté, la fréquence,…

Si nous faisons une comparaison selon ces critères, la voiture semble être le moyen de déplacement le plus privilégié pour les usagers. Selon [Heran 01] : « la dépendance automobile trouve sa source, non pas dans les aspirations à vivre au vert, dans la généralisation de la motorisation ou même dans l'étalement urbain, mais dans l'efficacité du système automobile par rapport aux autres systèmes de transport ». Il considère le temps de déplacement, la sécurité et le confort comme les critères majeurs qui définissent la dépendance automobile.

Le tableau suivant montre la dominance de l'usage de la voiture particulière par rapport aux autres modes de transport terrestre.

[14] *Statistiques INSEE, 2006.*

Milliards de voyageurs-km			Parts en %	
	2008	2009	2008	2009
Voitures particulières	720,2	723,9	82,9	83,0
Autobus-autocars	48,5	48,9	5,6	5,6
Transports ferrés	99,9	99,2	11,5	11,4
TOTAL	**868,6**	**871,9**	**100,0**	**100,0**

Source : SOeS, rapport CCTN juin 2010

Tableau I. 5 : Répartition modale du transport intérieur terrestre

L'augmentation de l'usage de la voiture particulière peut être aussi, expliquée par sa capacité à répondre aux différents critères exigés par les individus et aussi par ses avantages.

I.4.2. Les avantages de l'automobile

Les avantages de l'automobile privés sont nombreux. Il s'agit d'un moyen de transport extrêmement souple, confortable et flexible qui permet une liberté de mouvement tout en offrant un service de porte à porte sans discontinuité (pas de changement de véhicule d'un point à un autre du milieu urbain). La voiture assure des temps de déplacement relativement stables et prévisibles. Elle permet de desservir les zones les plus reculées ou dispersées, ne disposant pas du service des transports en commun à cause des contraintes de rentabilité économique. En plus, l'automobile est considérée comme le moyen d'exprimer le bonheur individuel. C'est un symbole de standing et de marque qui prouve la réussite sociale.

Différentes enquêtes menées auprès des populations confirment la préférence des individus pour les déplacements en véhicules privés. Les avantages de l'automobile privée sont nombreux. Il s'agit d'un moyen de transport extrêmement souple, confortable et flexible qui permet une liberté de mouvement tout en offrant un service de porte à porte sans discontinuité (pas de changement de véhicule d'un point à un autre du milieu urbain).

La voiture assure des temps de déplacement relativement stables et prévisibles. Elle permet de desservir les zones les plus reculées ou dispersées, ne disposant pas du service des transports en commun à cause des contraintes de rentabilité économique. En plus, l'automobile est considérée comme le moyen d'exprimer le bonheur individuel. C'est un symbole de standing et de marque qui prouve la réussite sociale. De même, « l'automobile laisse indéterminés à la fois le moment de départ et la destination. Elle diffuse une possibilité où l'individu est le centre à partir duquel se construit un réseau » [Rémy 96, cité dans Bannos 01].

C'est pour ces différents points que l'automobile a progressivement supplanté les autres moyens de déplacement. Mais, malgré ses avantages déterminants allant jusqu'à modifier les comportements et modes de vie des individus, l'automobile privée présente des effets inconvénients. Elle empêche les perspectives de mobilité avancée et soutenable et handicape la mise en place d'un processus de développement propre et durable.

I.4.3. Les effets négatifs de l'usage de la voiture privée

L'automobile, elle menace la centralité de l'organisation urbaine, affecte les relations entre les gens, comme elle détruit la sociabilité urbaine engendrant par conséquent, des distorsions économiques.

I.4.3.1. Impact de l'automobile sur l'environnement de la ville et les habitants

La ville est le lieu d'échanges, de communication, c'est un "commutateur social". Dans la période des trente glorieuses, les orientations politiques étaient d'adapter les agglomérations à l'automobile. Cette dernière a façonné l'aspect et le fonctionnement des villes. A partir des années 70, la multiplication des rocades, des autoroutes, des réseaux routiers suburbains et l'augmentation de l'équipement automobile des ménages ont encouragé de nombreux citadins à quitter les centre- villes aux loyers dont les prix sont trop élevés, pour rejoindre les cités pavillonnaires de la périphérie. La voiture contribue à la dissolution des limites de la ville (péri- urbanisation) et c'est la naissance des « rurbains », qui dépendent de la voiture pour aller travailler ou faire leurs courses.

Ainsi l'émergence de cette civilisation automobile a provoqué une transformation brutale de la ville classique (composée d'un centre de quartiers formant un habitat dense) vers une ville où la voiture progresse irrésistiblement causant par conséquent une séparation croissante des zones d'activité des zones d'habitat ce qui augmente la distance à parcourir.

Ce résultat s'explique par le fait que les transports collectifs, conçus traditionnellement pour des trajets radiaux (de la périphérie vers le centre) sont peu adaptés à la desserte des zones limitrophes moins denses, où les déplacements sont particulièrement diffus. C'est le réseau de transport motorisé qui conçoit les villes centrales et c'est le degré de congestion de ce réseau qui conçoit son efficacité.

Aujourd'hui, le constat est préoccupant : « les conditions de déplacement en ville se sont dégradées, les citoyens subissent quotidiennement les nuisances engendrées par l'automobile (bruit, pollution,…) et les grandes artères de circulation ont favorisé l'exclusion spatiale et sociale de groupes de population peu à peu isolés et encerclés par des flux d'automobiles toujours plus denses» [Mirabel 05].

Divers effets sont à l'issue de la croissance du trafic automobile : une augmentation de la consommation d'espace, de la tolérance envers l'éloignement, des nuisances directes pour les habitants. Tous ces effets négatifs contribuent à la dispersion et à l'éloignement de l'habitat, des commerces, des services, des lieux de travail et des équipements de loisir qui provoquent à leurs tours une augmentation des besoins de déplacement et une croissance du trafic automobile.

Il s'agit d'un cercle vicieux dont le phénomène se voit renforcé par ailleurs, par le fait que la dispersion et l'éloignement des différentes fonctions conduisent à une réduction de l'accessibilité pour les usagers non motorisés et pour ceux des transports en commun. La perte d'attractivité des déplacements non motorisés dans ces zones et la réduction de l'offre de transport en commun qui en résulte entraînent un report sur la voiture particulière et donc une croissance du trafic automobile. D'où le phénomène de congestion.

I.4.3.2. L’impact de l’automobile sur l’environnement

L’usage abusif du véhicule privé engendre une consommation déroutante d’énergie extériorisée sous forme de CO2 et GES. Par ailleurs, le regroupement d’une collectivité dans un seul moyen de locomotion (Bus, Train, Métro…) réduit largement les consommations et par la suite les expulsions en termes de gaz polluants dans l’air.

I.4.3.3. L’impact de l’usage de l’automobile sur les autres usagers de la route

Le nombre important de voitures sur les routes engendre des impacts négatifs non seulement sur l’environnement mais aussi sur la fluidité des trafics créant de ce fait des bouchons et un encombrement pouvant être à l’origine d’accidents ou tout autre type d’incident. En effet, le nombre de morts du fait d’accidents de la route en union européenne était de l’ordre de 41000 individus en l’an 2000 avec plus de 1,7 millions de blessés. Le même ordre de grandeur a été observé aux états unis. Les pertes humaines et matérielles dues aux accidents de trafic routier sont de ce fait énormes et engendrent par ailleurs des coûts économiques très importants [Fraichard 05].

I.4.3.4. L’impact de l’automobile sur la société

Sur le plan social, la voiture personnelle se distingue nettement des transports en commun par son aptitude d’adaptation. Même si les transports en commun peuvent s’avérer plus rapides que l’automobile privée quand les conditions sont favorables (réseaux équipés de voies réservées..) et beaucoup moins coûteux, ils n’ont toujours pas réussi à lui usurper sa place. En effet, il y a d’ores et déjà beaucoup de voitures en circulation dans le monde. De plus, l’usage de l’automobile a créé une sorte de dépendance chez les individus. L’adaptation des modes de déplacement et des organisations des infrastructures n’est pas loin d’être à l’origine de cette dépendance à l’automobile outre la facilité d’accès qu’elle représente. Toutefois, des problèmes d’ordre sociétal subsistent (bruit, stress, pollution, manque d’espace pour les piétons…) principalement dus aux encombrements (embouteillage, difficulté de parking, etc.).

L’importance du transport routier (surtout le transport urbain), justifie aussi notre orientation vers l’étude de la problématique des déplacements urbains qui réside principalement dans l’aggravation du phénomène de congestion.

I.4.3. La congestion : principale conséquence négative de l’usage de l’automobile

Alors que le transport constitue un vecteur important de croissance économique, il présente diverses externalités et coûts qui affectent l’usager, la collectivité, l’économie et l’environnement. Les coûts liés aux secteurs de l'automobile sont les plus importants. Ils peuvent être définis comme l'ensemble des coûts de construction, d'exploitation et de maintenance du réseau routier et des coûts, souvent qualifiés de coûts externes, induits par la circulation automobile.

Les coûts externes sont nombreux. Ils peuvent être liés aux infrastructures (investissements, entretien, exploitation), à l'environnement (pollution de l'air, effet de serre, bruit), à la sécurité (accidents), à la congestion, à la dépense énergétique et à d'autres facteurs (dégradation de l'environnement, coûts urbains, aménagement du territoire, consommation d'espace, coûts de la dépendance énergétique, coût de rebut). La congestion représente l’externalité immédiate des déplacements.

I.4.3.1. Définition de la congestion

La congestion peut être définie comme « la gêne que les véhicules s’imposent les uns aux autres en raison de la relation existant entre la vitesse et l’écoulement du trafic dans des conditions où l’utilisation du système de transport se rapproche de la capacité de ce système»[15]. Elle est liée principalement à l'étroitesse des voies, à l'occupation irrégulière de la voie publique et au non-respect du Code de la route. La situation qu'offrent certaines artères à certaines heures de la journée, est révélatrice de ce phénomène sans cesse croissant. En effet, en présence de congestion, la vitesse des véhicules sera réduite sensiblement (ce qui fait que l'on peut parcourir une dizaine de kilomètres en plus d'une heure de temps).

[15] *« L’étendue de la congestion en Europe », conclusion de la table ronde 110, Paris 199.*

Cette nuisance concerne les coûts supportés par les usagers eux-mêmes d'un ralentissement du trafic du fait d'un dépassement des capacités des infrastructures. Certaines études ne prennent pas en compte la congestion comme une externalité, estimant qu'elle concerne les seuls usagers. Par contre, si la congestion en tant que telle ne constitue pas une externalité pour les non usagers, il s'agit bien de la nuisance principale occasionnée par le système actuel de transports **(**livre vert de la Commission européenne sur les transports (1995)). Cette nuisance doit faire l'objet de politiques publiques appropriées.

I.4.3.2. Raisons d'apparition du phénomène de la congestion

La congestion est apparue avec l'urbanisation dans les pays occidentaux. Jusqu'au milieu du XIX ème siècle, la congestion est vécue comme un effet positif du transport: elle est signe de richesse. Les embouteillages signifient que les villes sont actives[16]. Au XX è siècle, des problèmes d'interférences modales entre les trafics (automobiles, piétons, cyclistes) ont engendré des problèmes de congestion caractérisant essentiellement les grandes villes. Dès le début de ce siècle, toute une idéologie autour de l'automobile a été mise en place. En 1907, les congrès internationaux de la route sont créés. Des questions relatives au développement de l'automobile (embouteillages et congestion) apparaissent.

Après la deuxième guerre mondiale, les autorités de tous les pays ont encouragé la possession de la voiture d'où une production croissante de véhicules automobiles et par voies de conséquence, l'équipement des ménages en voitures particulières ont amorcé une croissance forte et régulière jusqu'à nos jours.

Actuellement, la croissance des villes, la localisation de plusieurs activités économiques près du centre-ville pour des raisons de commodité et/ou de coût, le maintien jusqu'à une période récente des prix du carburant à un niveau relativement faible et l'augmentation excessive du stock de véhicules ont fait que le problème de la congestion

[16] *L'apparition de la congestion revient aux années 1850. Ce terme, appliqué à la ville, vient du vocabulaire médical, elle signifie un excès d'artères. Le terme « embarras » vient du vocabulaire urbain. Les deux termes se rejoignent au cours du dernier quart de XVIII è lorsque les embarras deviennent des embarras gastriques ou intestinaux et évoquent ce qui est de l'ordre de l'abondance, de l'excès de nourriture. Nous pouvons constater dès lors l'existence d'une corrélation significative entre les deux vocabulaires urbain et médical, qui mérite d'être soulignée.*

est devenu de plus en plus menaçant pour l'avenir des grandes villes. Autant de facteurs qui, malgré un développement des réseaux de voirie, ont généré dans la plupart des pays, des problèmes d'engorgement et de saturation en zones centrales des agglomérations et sur leurs voies d'accès. La congestion est plus grave dans les pays où la conscience environnementale est faible, le taux d'urbanisation est élevé, et où les pouvoirs publics ont -consciemment ou non- encouragé le transport privé par opposition au transport collectif. Elle gagne aujourd'hui, les villes de moins de 100 000 habitants.

I.4.3.3. Conséquences de la congestion

Les conséquences de la congestion sont nombreuses. Nous pouvons noter en premier lieu, les conséquences environnementales qui sont difficiles de les apprécier. Les véhicules en circulant, émettent des polluantes. La concentration de ces polluants en certains lieux amène le franchissement de seuils à partir desquels la pollution a des effets nocifs considérables. Ce sont les conducteurs des véhicules qui sont les premiers exposés aux conséquences de ces franchissements. De même, la pollution de l'air générée par l'automobile est une autre grande cause de mortalité. Malgré les innovations technologiques, ces émissions restent importantes.

D'autres effets négatifs résultent de la congestion. Ce sont les nuisances sonores, la détérioration de la qualité de service de transport, l'augmentation du coût d'utilisation des véhicules, l'augmentation des coûts liés à la perte de temps et de productivité, la hausse des coûts résultant d'accidents et la consommation accrue de carburant.

D'un autre côté, la congestion lorsqu'elle est créée, provoque plusieurs effets négatifs tant pour les usagers de l'infrastructure, outre que les automobilistes, que les non usagers.

Pour les déplacements en transports collectifs : La congestion se traduit par :

- Une baisse de la vitesse commerciale entraînant une augmentation des coûts d'exploitation.
- Une grande irrégularité des temps de déplacement et des temps d'attente ce qui contraint les usagers à provisionner un temps plus important pour leur déplacement.

- Un surdimensionnement des parcs de véhicules et des moyens logistiques liés notamment aux activités de maintenance et de remisage.

- Un accroissement des coûts d'exploitation et diminution des recettes par perte de clientèle au profit de l'automobile.

Pour les non- usagers : Les effets négatifs de la congestion touchent aussi les non-usagers de la voirie. Elle engendre des coûts importants aux entreprises suite à la perte de productivité des employés. Ceci s'accompagne par conséquent, par des coûts sociaux expliqués par l'effet sur l'état physique des personnes (maladie, énervement, fatigue,…). Aussi, la congestion affecte la fréquentation et la qualité des activités urbaines (professionnelle, culturelle,…). De même, la saturation des routes détériore la qualité des infrastructures ce qui augmente les coûts d'entretien du réseau routier.

I.5. Nécessité d'une politique de transport soutenable pour une mobilité durable

La loi sur l'air et la consommation rationnelle de l'énergie suite à l'augmentation des pollutions émises principalement par les systèmes de transport confrontée avec l'obligation de la réalisation des Plans de Déplacement Urbain pour les agglomérations de plus de 100 000 habitants, ont amené à la mise en place des politiques innovantes et décisives dans le domaine de transport afin d'assurer une mobilité durable. L'atteinte de cet objectif nécessite une forte cohérence de gestion complémentaire de tous les modes de transport. Il s'agit d'internaliser les effets externes de transport et d'optimiser les déplacements des personnes en tant qu'un facteur d'efficacité économique.

Plusieurs travaux ont été basés sur le développement d'outils et solutions pour résoudre les problèmes de transport et assurer par conséquent, une mobilité durable. Ces travaux ont visé le développement de plateformes logicielles d'aide à la décision offrant des solutions économiques et flexibles. Ces plateformes proposent des solutions de facilité avec des connaissances requises (informations en temps réel sur les conditions du trafic, mesures des émissions des gaz nocifs…). Aussi dans le cadre de projets innovants de mobilité avancée, certains organismes proposent d'aider les voyageurs dans leurs

déplacements sur la base de calculs des temps de parcours par exemple. Ces solutions permettent une gestion plus efficace des déplacements, une maitrise de l'impact environnemental, une incitation à l'usage des transports en commun ou encore la minimisation des coûts, etc.

En outre, les exploitants des réseaux de transport ont collaboré avec les chercheurs pour développer des moyens technologiques et des solutions informatiques sophistiquées et avancées pour faciliter la tâche de gestion et améliorer leurs prestations afin de satisfaire une clientèle de plus en plus exigeante. Il s'agit de planifier les itinéraires et établir une offre prévisionnelle en temps anticipé et de trouver des solutions aux perturbations aléatoires et imprévisibles en temps réel.

Les efforts déployés dans ce sens ont amené à la conception et l'implémentation de nouveaux systèmes d'aide à la régulation pour les modes alternatifs à l'automobile et plus particulièrement pour le transport multimodal. Cette solution multimodale permet de réduire l'impact global du transport sur l'environnement. Elle représente la base d'une politique soutenable des transports de personnes et propose une réponse adaptée à chaque besoin de mobilité. Les réseaux devront être intégrés dans des plates-formes d'échange réellement multimodales permettant des transferts rapides et efficaces entre les différents modes. Ce fonctionnement efficace du réseau maillé de transport collectif implique une meilleure intermodalité sur l'ensemble de l'aire urbaine. Cette intermodalité traduit une qualité de connexion entre tous les modes au service de l'usager. Elle est assurée par les composantes suivantes :

- Une prise en compte d'une très bonne accessibilité des piétons essentiel pour les transports en commun.
- Des pôles d'échanges bien dimensionnés entre les différents modes de transport assurant les correspondances entre réseau urbains et non urbains. Ceci nécessite la création de distances de marche à pied « raisonnables ».
- Une création d'interface avec le transport individuel tels que parcs vélo, des aires de dépose-minute,…
- Un système d'exploitation qui présente une meilleure gestion des correspondances.
- Une billettique intégrée à l'aire urbaine.

- Une information voyageur intégrée pour l'ensemble de l'aire urbaine qui prend aussi en compte la problématique des voyageurs interurbains.
- Des services associés aux déplacements développés essentiellement dans les pôles d'échanges.

C'est dans ce contexte que se situe notre travail. Il a pour objectif de concevoir et implémenter un système d'aide à la régulation des réseaux de transport multimodal en tant qu'alternative à la voiture particulière. Cette solution basée sur l'amélioration des réseaux de transport multimodal peut être une solution efficace au problème de la congestion qui représente une perturbation importante aux réseaux de transport.

I.5.1. La multimodalité et l'intermodalité : un instrument efficace pour une mobilité durable

Plusieurs études liées à la multimodalité et l'intermodalité ont été réalisées ces dernières décennies. Elles traitent des problématiques allant de l'aménagement des réseaux jusqu'à leur exploitation en temps réel en passant par la planification du trafic. Ainsi, lors de l'aménagement des infrastructures routières et des réseaux de transport, l'intermodalité a pour objectif de faciliter et d'optimiser les déplacements et les échanges entre les modes de transport public et individuel par l'aménagement des pôles d'échange. A titre d'exemple, offrir aux usagers des parkings gratuits au niveau des terminus des lignes de métro ou de tramway favorisera l'emprunt du transport en commun. D'autre part, en phase de planification, pour garantir aux usagers un service de qualité optimale et éviter les conflits dues à une gestion décentralisée, il est très utile de prévoir un échange à travers un support intermodal entre les différents systèmes d'aide à l'exploitation du réseau de transport surtout en conditions dégradées ou de crise (congestion, panne, grève, etc.). L'autre axe de recherche lié aux notions de la multimodalité et d'intermodalité, concerne les systèmes d'information multimodale de voyageurs. En fait, l'apparition de nouveaux médias et les avancées en termes de collecte et de diffusion d'informations issues des nouvelles technologies font que les usagers de transport collectif souhaitent être informés davantage et d'une manière fiable avant et pendant leurs déplacements. Ainsi, quelques études récentes [Danflous, 01] [Meskine, 01] [Ben et al. 05] ont traité ces systèmes d'information multimodale qui visent, entre autres, à réduire l'incertitude des voyageurs et dans la mesure du possible, à accroître l'attractivité du transport en commun au bénéfice d'une utilisation optimale des infrastructures et d'une priorité aux transports collectifs.

La notion d'intermodalité est plus globale puisqu'elle consiste à conjuguer les réseaux de transport terrestres, dits aussi de surface, avec d'autres modes de transport individuels tels que les voitures ou les bicyclettes. Dans ce cadre et pour des raisons écologiques et énergétiques, différentes mesures ont été mises en place afin d'encourager l'utilisation des moyens de transport en commun en dépit des moyens personnels et leur réussite dépend essentiellement d'une exploitation coordonnée et efficace des différents modes de transport. [Ould Sidi, 06].

I.5.1.1. Pourquoi opter pour l'usage des transports collectifs ?

Le recours aux transports en commun peut être expliqué principalement par les pertes que peut engendrer l'utilisation de la voiture particulière mais aussi par les avantages procurés de l'usage des transports collectifs.

I.5.1.1.1 : Les pertes liées à l'usage de la voiture privée

L'usage de l'automobile privée est source de gaspillage économique, environnemental et urbain.

- ***Un gaspillage économique***

Nombreux consommateurs immobilisent leur capital dans une automobile qui n'est utilisée que de façon très marginale par rapport aux possibilités techniques. Ils ne rationalisent pas l'utilisation de leurs voitures privées. Il a été établi que les automobiles sont utilisées en moyenne, en France, pendant seulement 8 % de leur durée de vie. En effet, elles restent, la plupart du temps, garées sans être utilisées. Cela constitue bien évidemment, une allocation sous-optimale des ressources des ménages. En outre, le consommateur sous-estime le coût de l'utilisation de son automobile. Il ne prend pas en compte l'amortissement du véhicule, sa maintenance et le coût de son stationnement et de son assurance.

- ***Un gaspillage des ressources environnementales***

Un consommateur ayant possédé une automobile sera incité à l'utiliser dans tous ses déplacements même dans des situations où d'autres modes seraient plus performants sur le plan de l'intérêt général (transports en commun, taxis, déplacement à pied...). La

multiplication du nombre de véhicules par rapport à ce que demanderait une utilisation optimale, consomme de façon inutile les matières premières nécessaires à leur construction. En outre, un nombre élevé de véhicules entraîne nécessairement une consommation accrue de carburant ce qui engendre une pollution plus importante.

- ***Un gaspillage de l'espace urbain***

La multiplication du nombre de voitures particulières qui, pour l'essentiel de leur durée de vie, sont immobilisées en stationnement, est très consommatrice d'espace, ce qui conduit à dégrader la qualité de l'environnement urbain. En outre, cette perte d'espace se fait également au détriment des autres modes de transport de surface.

Tous ces niveaux de gaspillage engendrés par l'usage de l'automobile amène à penser à d'autres moyens de déplacement comme alternative à la voiture sans faire perdre l'usager les avantages procurés de l'automobile. Cette solution peut être offerte par l'usage des systèmes de transport collectif.

I.5.1.1.2. Les avantages du transport en commun

Les transports collectifs peuvent remédier aux principaux problèmes de l'usage abusif de la voiture. Ceci en créant des modes de transport propres et très économes en matière d'énergie, moins encombrant et surtout moins polluant. Parallèlement, les transports en commun aide à améliorer la fluidité du transport routier en transportant des nombres importants de personnes sur des voies spécifiques diminuant ainsi le nombre de voitures sur les routes.

Le recours aux réseaux de transport en commun présente plusieurs avantages dont principalement :

- La diminution du nombre de véhicules en circulation et par conséquent des accidents.
- La minimisation du coût de déplacement : tarifs réduit par rapport au déplacement par véhicule privé.
- La diminution des places de parking : pour 60 personnes transportées par bus, la surface occupée ne dépasse pas celle destinées à supporter deux voitures.

- Une meilleure adaptation de la voiture aux besoins du fait de son usage pour les trajets non desservis par des lignes de transport en commun. D'où une complémentarité avec l'usage de la voiture privée.

L'efficacité d'un réseau de transport collectif urbain dépend de trois caractéristiques principales qui doivent être validées :

- La couverture spatiale ou démographique importante.
- La densité de réseau à l'intérieur du périmètre desservi.
- L'intensité moyenne de service sur le réseau.

Les avantages procurés par l'utilisation des moyens de transport en commun peuvent être plus importants si on opte pour une meilleure combinaison de ces moyens.

Par ailleurs, la limitation de l'espace urbain affectée à la circulation et au stationnement de la voiture est susceptible d'entraîner des transferts importants vers le transport collectif si celui-ci offre une alternative crédible.

I.5.1.2. Importance du transport multimodal

Les avantages liés aux transports collectifs ont été à l'origine de deux concepts importants à savoir la multimodalité et l'intermodalité. Ils représentent une solution aux problèmes engendrés par les moyens de transport en commun ou les véhicules privés considérés séparément. L'objectif de la multimodalité est d'arriver à un rééquilibrage entre les différents modes de transport à travers la combinaison de plusieurs modes et de limiter l'utilisation intensive du transport routier qui engendre des effets externes négatifs et de revitaliser le transport ferroviaire qui est peu exploité. La justification du recours au transport multimodal est par conséquent, plus socio- économique (prise en compte des effets externes) que financière [ROSE 06].

Par ailleurs, le transport multimodal s'inscrit dans le cadre du développement durable puisqu'il renforce la sécurité en matière de transport et il limite la pollution par la minimisation du nombre des déplacements en voiture privée. Pour cela, la majorité des pouvoirs publics s'occupent de plus en plus de ce domaine et lance des politiques qui visent à promouvoir le développement du transport multimodal afin de faire face à l'augmentation des trafics, à la saturation du réseau routier suite à l'usage excessif de la voiture privée et à l'utilisation efficiente de l'infrastructure existante.

Un réseau de transport multimodal peut être donc, une alternative efficace à l'usage de la voiture particulière et par conséquent, une solution efficace au problème de congestion. Mais pour que le transfert modal ait un impact positif, il convient de s'assurer que le trajet multi- modal ne soit pas beaucoup allongé par rapport au trajet routier pur et que les taux de remplissage soient suffisants.

I.5.2. Caractéristiques et représentation graphique d'un réseau de transport multimodal

Un réseau de transport multimodal de personnes est caractérisé par la présence simultanée de différents modes de transport tels que les bus, les métros et les tramways. La liaison entre ces modes et aussi avec l'usage de la voiture particulière et même les voitures partagées, est traduite par la présence de pôles d'échange ou de nœuds de correspondance, au niveau desquels il y a des échanges de voyageurs entre deux ou plusieurs véhicules à différents horaires de la journée. Ce genre de réseau devient indispensable dans les zones à haute densité de population qui nécessitent alors un plus grand nombre de déplacements. La figure I.3 présente un exemple d'un réseau de transport multimodal.

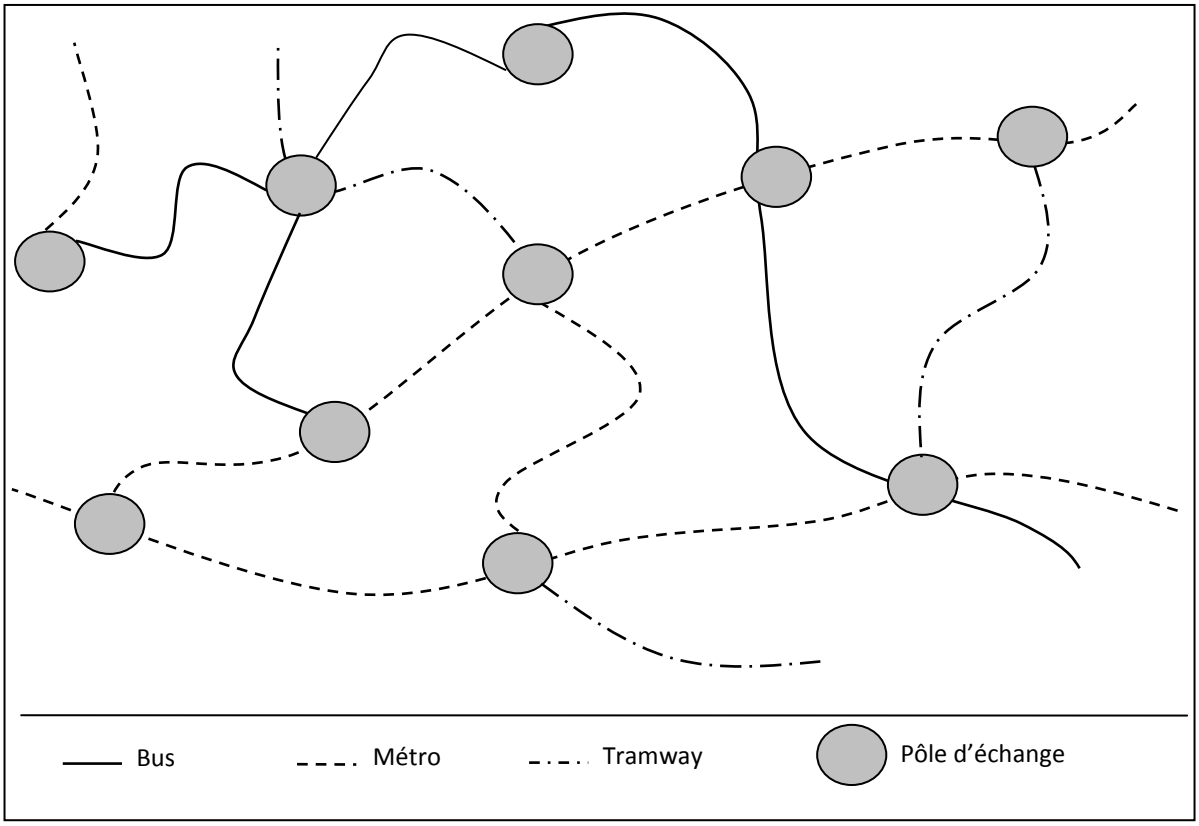


Figure I.3 : Exemple d'un réseau de transport multimodal

En fait, les systèmes de transport peuvent être guidés ou non guidés. Le mode non guidé le plus répandu est l'autobus. Le choix des itinéraires des réseaux de transport par bus est nettement plus flexible et ces réseaux permettent de desservir des zones à faible densité avec un coût d'exploitation peu important. Cependant, le principal inconvénient de ces réseaux réside dans leur dépendance des conditions de circulation, ce qui n'est pas le cas des systèmes de transport guidés tels que le métro. Par contre, ce dernier nécessite une importante infrastructure. Le tramway est aussi un mode de transport guidé mais qui dépend plus ou moins des conditions de circulation puisqu'il emprunte généralement les voies routières. Ainsi, l'exploitation simultanée de ces différents modes résulte en un réseau fortement maillé et donc, plus difficile à gérer en hors-ligne et en ligne.

Par ailleurs, les Plans de Déplacement Urbain (PDU) affichent aujourd'hui, des objectifs ambitieux quant à l'amélioration de l'usage des transports en commun et à la diminution de l'usage des voitures particulières. Ainsi un usager qui habite une zone de faible densité moins desservie par les transports en commun, peut utiliser sa voiture

jusqu'au point où il peut accéder facilement aux autres modes de transport. La réussite de ces plans repose sur une politique d'exploitation coordonnée des différents modes de transport aboutissant à une amélioration significative des conditions de circulation et de la qualité de service des transports publics de surface.

I.6. Conclusion

Le transport urbain pourrait jouer un grand rôle dans le développement durable des pays et ceci sur tous les niveaux : social, économique et environnemental. Son développement ainsi que la bonne gestion de ses infrastructures constituent une condition sine qua none pour sa durabilité. Or, l'utilisation de l'automobile privée a envahi tous les autres modes de transport et constitue la principale source d'externalités négatives dont principalement la congestion des voiries. Ainsi, pour assurer la durabilité de transport, la réduction de l'utilisation du transport privé s'avère une tâche importante. Cet objectif doit se faire en tenant compte des enjeux de la vie urbaine qui préconisent l'amélioration et le développement des autres modes de transport alternatifs à l'automobile et une répartition modale socialement optimale. Par conséquent, on note le développement de la multimodalité qui devient de plus en plus essentielle dans les zones urbaines de grande densité surtout pendant les heures de pointe.

Chapitre II: Les systèmes de régulation des perturbations dans les réseaux de transport multimodal

II.1. Introduction

Le problème de congestion est un phénomène complexe qui nécessite l'intervention de différents acteurs pour limiter ses effets négatifs économiques, sociaux et environnementaux. La principale cause de congestion est l'usage de la voiture privée. Parmi les mesures qui peuvent être prises, on note la gestion et l'amélioration des réseaux de transport collectifs. En effet, le développement de ces réseaux reflète le développement d'une ville ou d'une région ainsi que sa compétitivité et justifie l'intérêt que portent les responsables et les chercheurs pour la planification et la régulation de ces réseaux.

La tâche de gestion des réseaux de transport commence par la planification théorique qui demeure de plus en plus difficile dans un réseau multimodal constitué de différents itinéraires assez complexes. En effet, le processus de planification des réseaux de transport ne s'appuie que sur des estimations prévisionnelles des durées de parcours et des conditions de circulation. Cependant, en temps réel, divers aléas peuvent affecter le trafic. Il est donc, nécessaire de prendre des mesures de régulation pour pallier aux perturbations. La tâche principale du processus de régulation est la proposition de décisions qui adaptent les horaires et les itinéraires des véhicules aux conditions d'exploitation, comme les flux des voyageurs et les conditions de circulation, en temps réel.

L'apparition des Systèmes d'Aide à l'Exploitation (SAE) a beaucoup aidé les régulateurs à mieux accomplir cette tâche. Ces systèmes permettent le suivi en temps réel de l'exploitation d'un réseau de transport urbain et ils ne cessent d'évoluer grâce notamment aux progrès technologiques dans les domaines des communications et du traitement de l'information. Ils permettent de transmettre en temps réel, l'information au voyageur. On parle aujourd'hui, des systèmes d'aide à l'exploitation et à l'information au voyageur (SAEI ou SAEIV) étant donnée la capacité de ces système à transmettre en temps réel, les informations concernant leur déplacement.

En outre et pour mieux maîtriser leur métier et par conséquence, prendre des décisions pertinentes pour la régulation du trafic, le travail du régulateur nécessite l'intervention des systèmes d'aide à la décision (SAD).

Dans ce chapitre, nous définissons en premier lieu, les perturbations qui peuvent affecter les systèmes de transport multimodaux comme principalement la congestion qui peut modifier les temps prévus de déplacement. En second lieu, nous présentons les différentes problématiques liées à l'aménagement de ces réseaux, à la gestion conjointe des différents modes de transport, à l'information multimodale, et à la planification et la régulation du trafic. Les processus de planification et de régulation ainsi que les différentes approches et systèmes intervenant dans la tâche de régulation, sont détaillés à la fin de ce chapitre.

II.2. Les perturbations

II.2.1. Définition d'une perturbation

Nous pouvons définir une perturbation comme étant l'apparition imprévue, brusque ou progressive, d'informations, d'idées, d'événements ou d'objets qui peuvent modifier ou annuler un programme. Celui-ci peut être un phénomène naturel, localisé ou généralisé, physique ou organique, individuel ou collectif. Comme il peut s'agir d'une programmation d'origine humaine fixe ou aléatoire, limitée ou non dans le temps et dans l'espace, à tendance sociale, économique, politique, scientifique, technologique ou autre.

Une perturbation consiste alors, en une modification du fonctionnement d'un système et donc un déséquilibre dans son état normal. Il devient par conséquent perturbé. Selon la force de son impact, la perturbation provoque des répercussions plus ou moins profondes sur les structures-mêmes du système programmé pouvant aller jusqu'à leur disparition immédiate ou progressive et, dans l'hypothèse opposée, vers leur optimisation, leur transformation ou leur diversification.

II.2.2. Les perturbations dans les réseaux de transport

Les perturbations peuvent affecter le domaine de transport d'une manière aléatoire ayant pour effet de créer un écart entre l'état sur lequel il doit être et son état réel.

Le fonctionnement normal du réseau consiste à suivre les tableaux de marche théoriques (qui indiquent l'arrivée des véhicules aux stations) ainsi que les affectations du

personnel et des ressources matérielles (des véhicules sont mis en circulation, d'autres sont en réserve dans les dépôts). Ce mode de fonctionnement peut être affecté par des perturbations qui touchent les différents modes du réseau de transport. Ce qui provoque par conséquent, son passage d'un mode de fonctionnement normal à un mode de fonctionnement perturbé. L'aspect le plus visible de cette perturbation réside dans le non-respect des tableaux de marche théoriques [Melki 09]. L'impact de tels accidents peut se voir à un écart enregistré entre le Tableau de Marche Théorique (TMT) et le Tableau de Marche Réel (TMR) [Zidi 07].

Divers facteurs existent et sont probablement à l'origine des perturbations dans les réseaux de transport. Parmi ces facteurs, nous pouvons citer par exemple les problèmes techniques touchant le matériel ou le personnel comme facteurs internes, et les aléas dus aux changements de la demande ou des données sur le trafic comme facteurs externes. En outre, les causes de perturbations peuvent être d'ordre naturel, technique ou humain [Coquio 08].

II.2.2.1. Classification des perturbations

Il existe plusieurs façons de classification des perturbations.

II.2.2.1.1. Classification par niveau d'impact

La perturbation peut avoir lieu à partir de trois niveaux :

- Au niveau des pôles d'échange : insécurité, capacité des flux, manque de cohérence, etc.
- Au niveau des lignes : dysfonctionnement d'une ligne de train, etc.
- Au niveau de l'ensemble du réseau : exemple : manifestation sociale, congestion, etc.

II.2.2.1.2. Classification selon l'origine de la perturbation

Les perturbations sont classées selon le milieu qu'elles affectent. Il peut s'agir des véhicules ou du personnel de la compagnie de transport (perturbations internes). Aussi, les perturbations peuvent affecter l'ensemble du réseau de transport (perturbations externes). La figure ci-dessous illustre les facteurs qui peuvent être à l'origine d'une perturbation dans les réseaux de transport.

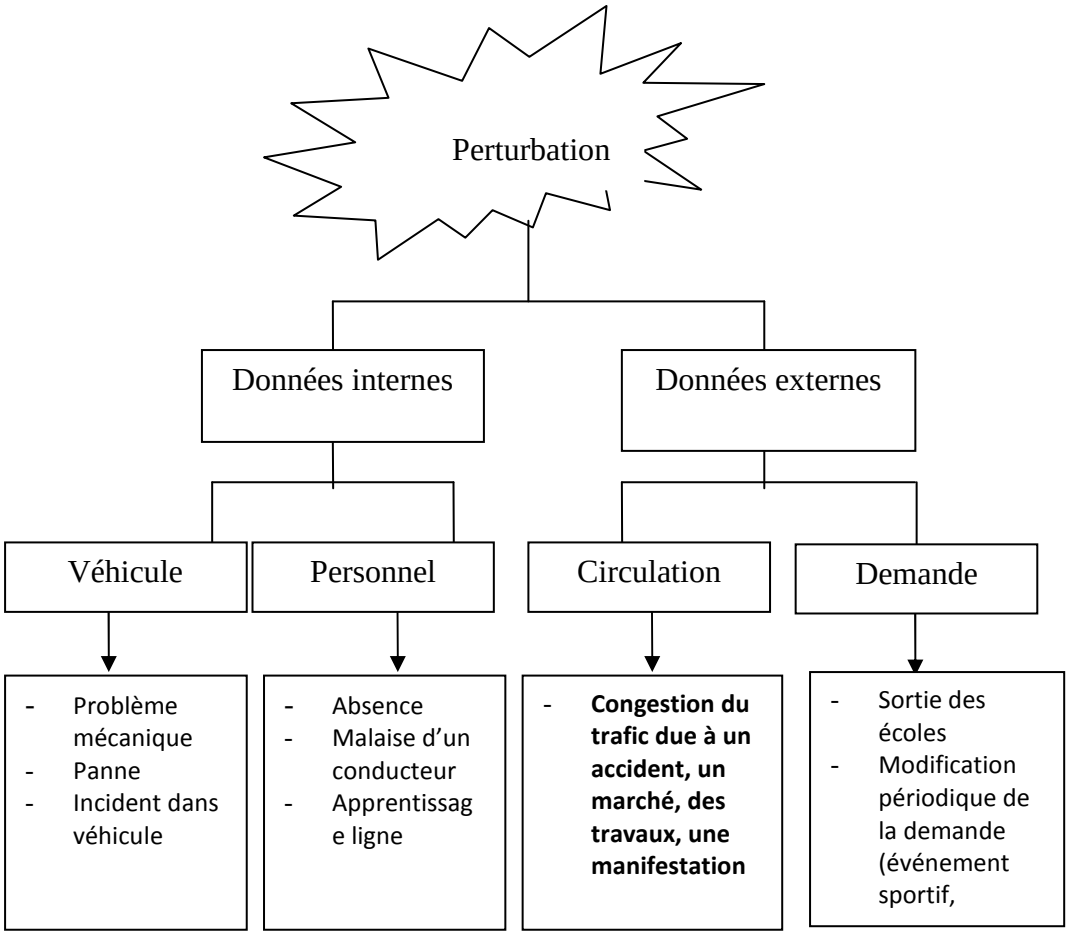


Figure II. 1 : Analyse des perturbations

II.2.2.1.3. Classification selon l'impact spatio-temporel

Une autre classification plus généralisée peut être considérée. Il s'agit de considérer l'impact des perturbations sur le trafic. Nous distinguons ainsi les perturbations qui ont pour effet de causer une ou plusieurs modifications du comportement des acteurs de transport (insécurité dans les véhicules, accidents, problèmes techniques,…) et celles qui causent une ou des modifications affectant l'aspect général du trafic (modification de la demande, congestion, défaillance de l'infrastructure,…) [Melki 09].

D'une manière générale, une perturbation engendre des irrégularités suite au changement des spécifications de circulation prévue d'un mode de transport. Son effet peut être vu par exemple en la modification des intervalles de passage des véhicules et par conséquent en un prolongement des temps d'attente des usagers dans les stations. Ce qui a

pour effet de détériorer la qualité du service pouvant notamment créer un déséquilibre au niveau de la répartition des charges entre les véhicules.

Dans notre travail, nous nous intéressons aux perturbations externes liées à la circulation et plus particulièrement, à la congestion cette perturbation a un impact aussi bien sur les acteurs du transport que sur l'aspect général du réseau.

Par ailleurs, que l'on considère l'une ou l'autre de ces classifications, les conséquences possibles des perturbations demeurent les mêmes, donnant lieu à des irrégularités plus ou moins importantes dans les services de transport.

La tâche d'identification de la perturbation est confiée au régulateur qui opère dans un processus de régulation.

II.2.2.2. Les perturbations dans les réseaux de transport collectifs

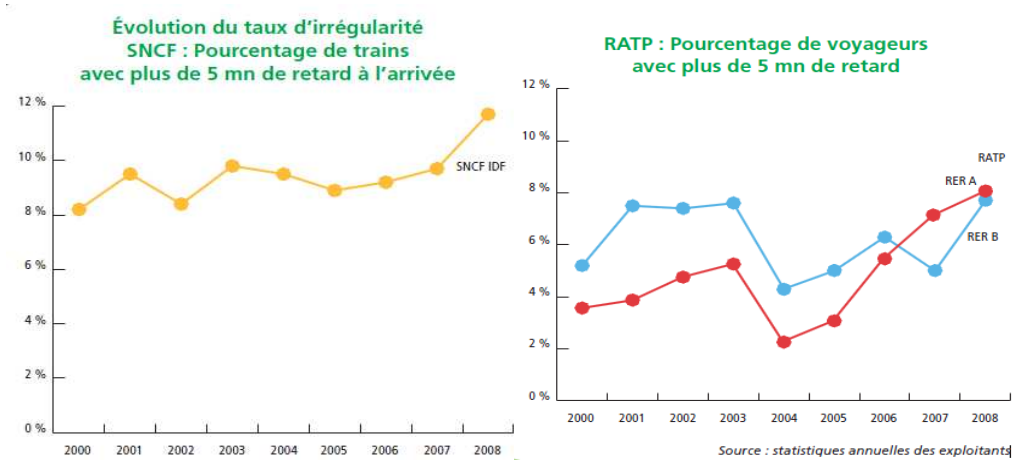
Le transport collectif opère dans un univers essentiellement aléatoire. Au rang des perturbations majeures qui peuvent affecter le trafic, il convient d'inscrire les différents types d'aléas qui peuvent rendre invalides les plans de service préétablis (tableaux de marche et de service) et justifier la mise en place de plans de production provisoires ou dégradés. Le non- respect du TMT à travers ces multiples manifestations apparaît comme la conséquence de l'instabilité qui se développe à la suite de l'apparition de perturbations ou du fait d'une mauvaise prévision des plans de marche [Cure 84].

Pour respecter le tableau de marche (TM) initial, les SAE actuels peuvent déclencher des alarmes lors de situations où les écarts entre les horaires théoriques et les horaires réels sont plus au moins importants. On note :

- Avance/retard : Il s'agit d'une alarme primaire servant d'indicateur de l'état d'une ligne. Elle détermine pour chacun des véhicules en activité sur le réseau, son avance ou son retard sur son horaire théorique.
- Respect des correspondances : Il s'agit d'une alarme plus élaborée, indiquant qu'une correspondance ne peut, ou risque de ne pas être assurée.
- Train de bus : Certains SAE permettent la signalisation du risque de train de bus (au moins deux véhicules se suivent de trop près).
- Prochain départ non assuré : Il s'agit de prévenir le poste de commande qu'un véhicule ne peut pas assurer son prochain départ.

Ces différentes alarmes reposent sur le principe qui consiste à mesurer l'écart entre l'horaire théorique et l'horaire réel.

Qu'il s'agisse d'une interruption d'une ou de plusieurs lignes, d'un changement des heures d'arrivée ou de l'arrêt de desserte d'une ou plusieurs stations, les perturbations n'ont de fait que de déranger le bon cours du service et d'inciter les usagers à annuler leurs voyages ou à favoriser d'autres services. De plus, les observations de perturbations vont en croissant, ce qui a pour effet de détériorer encore plus la qualité du service offert. Pour le cas de la France par exemple, et plus particulièrement les opérateurs de transports SNCF et RATP, la dernière décennie a témoigné d'une évolution rétrogradante observée de par une croissance de l'indice d'irrégularité. Cette évolution est illustrée au niveau de la figure II.2. et a été démontrée de par les statistiques faites utilisant un indice d'irrégularité se basant sur la détermination des pourcentages de trains, métros, bus et trams arrivant à leurs destinations avec cinq minutes de retard [Ould Sidi 06].



<u>Figure II. 2</u> : Evolution des perturbations en France entre les années 2000 et 2008

Pour remédier aux problèmes des perturbations, les systèmes de transport ont opté pour la mise en place d'une qualité de service optimale leur permettant de gérer l'ensemble des perturbations survenant sur le réseau et même les anticiper. Outre les modules de maintenance améliorative et préventive mises en place par la majorité des systèmes de transport pour essayer de prévenir tout type d'incident pouvant survenir, les réseaux de transport ne sont toutefois jamais à l'abri des irrégularités. C'est dans ce contexte que la

notion de gestion en temps réel intervient pour essayer de minimiser au maximum les « dégâts » et offrir des services compétitifs à une grandeur d'échelle souhaitable.

C'est sur cette lancée et dans le cadre d'une gestion dynamique que s'est renforcée la notion d'« Information Voyageur » pour devenir de première importance offrant aux usagers un maximum de transparence et des informations actualisées en continu. Plusieurs travaux de recherche en coopération avec le secteur industriel, notamment avec les opérateurs de transport, se sont focalisés sur l'offre de tels services pour aider les usagers dans leurs déplacements [Feki 10, Borne 03, Laurent 10,…].

Par ailleurs, gérer l'information multimodale à elle seule reste insuffisante, et c'est ainsi que la pratique comodale est devenue un maillon essentiel dans cette problématique.

II.3. La congestion, une perturbation qui nécessite des solutions

La congestion routière est une externalité négative, non prise en compte par le marché. Elle résulte de la sur- utilisation d'un réseau routier à un moment donné et entraîne par conséquent, une diminution de la vitesse de circulation. Le rapport Boiteux en 2001 [cité dans Reymond 05] esquisse la définition suivante : « La congestion se définit comme la gêne que les véhicules s'imposent les uns aux autres en raison de la relation qui existe entre la densité de circulation sur un itinéraire ou sur un réseau et la vitesse d'écoulement des trafics, compte tenu de la capacité ». **Ainsi, la congestion routière correspond à un temps ou à un retard de déplacement qui excède le temps ou le retard qui est normalement associé à une circulation fluide. Une congestion excessive correspond à un temps ou à un retard de déplacement qui excède une norme convenue qui peut varier selon le réseau de transport, le mode de déplacement, l'heure et l'emplacement géographique. La congestion se traduit donc, par une différence entre le temps de parcours observé et le temps de référence pendant une période de temps déterminée (heures de pointe notamment) pour une infrastructure donnée.**

Par conséquent, on peut déduire que **la congestion routière représente une perturbation (externe) qui modifie l'état de circulation normal sur un réseau de transport.**

II.3.1. fondements théoriques du phénomène de congestion

Dans une approche microéconomique, [Vickery 69, cité dans M. Reymond 05] distingue plusieurs types de congestion:

- ***L'interaction simple :*** Il s'agit d'un type de congestion basique où sur une voie homogène, un véhicule ralenti par un autre ne peut pas doubler. L'allongement du temps de déplacement est une fonction du volume de trafic.

  $V= f(x)$; où V : La vitesse de circulation et x : Le débit de trafic.

- ***L'interaction multiple :*** Dans ce cas, il est impossible de doubler, la vitesse moyenne diminue avec l'augmentation de l'intensité de la circulation.

  $Z= t- t_0 = a X^{k}$;

  Où Z : retard moyen par véhicule.

  t : temps requis pour effectuer le trajet souhaité compte tenu des conditions actuelles du trafic.

  t_0 : temps requis pour effectuer le trajet en situation de circulation fluide.

  a et k : des paramètres constants.

- ***La situation de files d'attente :*** (« bottleneck situation ») : plusieurs véhicules sont ralentis par un rétrécissement de la chaussée. En l'absence d'un itinéraire alternatif, la demande de trafic excède l'offre et des files d'attentes seront construites. Différents modèles ont été inspirés de ce cas. Le modèle de files d'attente le plus connu c'est celui de [Arnott et al. 90a].

- ***Goulot d'étranglement :*** (« triggerneck congestion ») : Lorsqu'une file d'attente entraînée par un rétrécissement crée une queue sur une autre voie et ainsi de suite.

- ***Congestion propre à la régulation du réseau :*** Les automobilistes ne sont pas responsables des phénomènes de congestion de la route. La circulation peut être handicapée par la multiplicité des feux, de routes à sens uniques et de stops dans les intersections,…

- ***Congestion de réseau :*** ce cas concerne l'interaction permanente entre plusieurs types de transport (ex. transport ferroviaire / transport urbain,…). Notre intérêt porte essentiellement sur ce type de congestion.

Deux autres approches se distinguent au niveau de la nature du phénomène de congestion: l'approche des ingénieurs du trafic et celle des économistes.

L'approche des ingénieurs du trafic **:** c'est une approche technique qui se fonde sur l'analyse de la relation de trois grandeurs caractérisant l'exploitation de la route : la vitesse (v) à laquelle les véhiculent circulent sur une route ; la densité (d) de véhicules sur cette route et le flux (f) de véhicules c'est-à-dire le nombre de véhicules par heure. Selon cette approche, et comme le flux est le produit de la vitesse par la densité, il existe une relation inversement proportionnelle entre ces deux grandeurs : plus il y a de véhicules sur la route, moins on roule vite. A cela, les ingénieurs du trafic ajoutent qu'il existe une vitesse v_i et une densité associée d_i pour lesquelles le flux est maximal.

L'approche économique : pour les économistes, en plus des caractéristiques de la route, la demande de l'utilisation de la route influence aussi le flux maximal. Depuis les travaux de [Dupuit 1849], [Pigou 1920], [Boitteux 1956], [Vickerey 1963], [Arnott et al. 1990]…, les économistes proposent plutôt, une solution qui passe par la tarification en tant qu'instrument régulateur du débit de la circulation. Cette idée peut être expliquée par graphique ci- dessous.

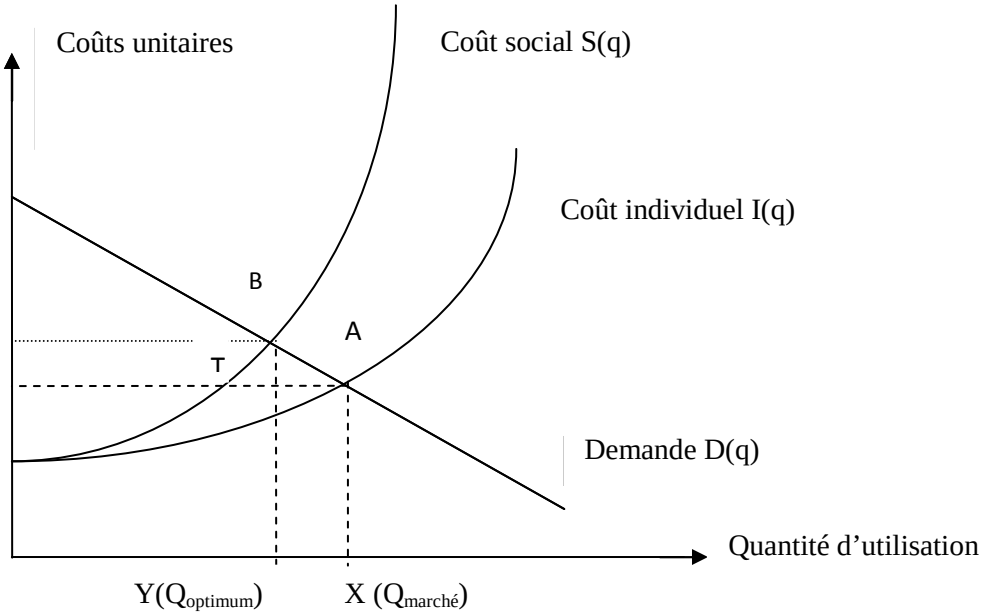


Figure II. 3 : Congestion urbaine

- D (q): plus le coût unitaire d'utilisation est élevé, et moins il y a d'automobilistes prêts à utiliser la route.
- I (q): représente le coût supporté par un automobiliste. Quand l'automobiliste est seul sur la route (q= 0), le coût T qu'il supporte est minimal. Plus le nombre de véhicules sur la route augmente, plus la vitesse diminue et le temps nécessaire pour faire un km augmente ce qui augmente par conséquent le coût de l'utilisation de la route [I (q)].

- Lorsque I (q) et D (q) se coupent, un équilibre va être atteint au point A: L'automobiliste marginal supporte un coût égal au bénéfice marginal qu'il retire de l'utilisation de la route. Au-delà, il renonce à l'utilisation de la voiture (coût supporté plus grand que le gain procuré de l'utilisation de la voiture).

- Le coût d'équilibre (« naturel ») au point A n'est pas optimal. Il n'inclut pas le coût supporté par la société. Ce coût social est égal au coût individuel I (q) supporté par l'usager augmenté du coût que son véhicule a fait perdre à tous les autres usagers en les ralentissant. La solution optimale pour la société est obtenue au point B, où S (q) et D (q) se coupent. Au-delà de Y véhicules, un automobiliste supplémentaire engendre un coût social supérieur au bénéfice social qu'il crée. C'est ce qui se passe réellement sur les routes congestionnées.

Le coût social de la congestion serait particulièrement important. L'approche retenue par les différentes études consiste à comparer le temps effectivement passé à se déplacer avec celui que l'on passerait si la voie était vide, et à multiplier cette différence par une valeur du temps.

Par ailleurs, il existe différentes solutions qui peuvent être appliquée pour résoudre le problème de congestion.

II.3.2. Les instruments d'internalisation de la congestion

Différents instruments peuvent être utilisés pour faire face à la défaillance du marché des transports et réduire les effets de la congestion.

II.3.2.1. Les instruments tarifaires

Ces instruments peuvent être classés en quatre catégories :

- ***Les taxes forfaitaires : La taxe sur les véhicules***

Ce sont des instruments qui agissent sur le stock des moyens de transport en vue de limiter son accroissement On distingue les taxes d'immatriculation, les taxes d'importation d'automobile et la taxe annuelle de l'usage des routes. Le gouvernement peut aussi décider indirectement du nombre de véhicules qui seront en circulation à moyen terme à travers la création d'un système de quotas de véhicule (véhicule quotas system) en fonction de leur cylindrée.

- ***Les péages***

Cette mesure consiste à faire payer l'usager afin d'atteindre un comportement optimal (figure II.3). On distingue différentes formes de péage : le péage d'infrastructure, le péage d'accès ou de zone et le péage de stationnement. Le montant du péage serait fonction du coût de la congestion qui est en principe variable dans le temps et dans l'espace. Le tarif optimal correspond à la différence entre le coût marginal de l'usager et le coût marginal social.

Cette solution permet de réguler la demande en favorisant le détournement des usagers vers le les transports collectifs et, éventuellement, trouver des ressources financières pour d'autres besoins de la collectivité.

- ***Les taxes variables plus ou moins proportionnelles aux distances : la tarification kilométrique: (Pay As You Drive)***

La tarification kilométrique se rapproche de la tarification de la congestion par le péage de zone avec un élément supplémentaire : les automobilistes payent en fonction du nombre de kilomètres parcourus dans cette zone et non plus simplement à leur entrée dans la zone ou pour une durée donnée. C'est un système de péage intelligent mais elle ne permet de réduire que partiellement les encombrements dans les zones.

- ***La surtaxe sur le carburant***

Les dépenses en carburant représentent les coûts d'exploitation directs des véhicules les plus élevés encourus par les automobilistes. Ces coûts peuvent être augmentés par la mise en place d'une taxe, conformément au principe pigouvien, sur l'émission de carbone ou par un certain taux de taxation sur la consommation des carburants. En effet, les modifications du prix des carburants entraînent une hausse du prix de circulation en ville et sont susceptibles de conduire à un changement du comportement de l'automobiliste[17]. Les répercussions à long terme toucheraient fortement la consommation plus que le volume du trafic dans la mesure où les usagers s'orientent vers l'utilisation de véhicules dont les carburants sont moins taxés.

II.3.2.2. Instruments réglementaires et incitatifs de lutte contre la congestion

- ***Réglementer l'utilisation des véhicules***

Cette action consiste à fixer de manière autoritaire un niveau de trafic automobile. Par cela, un nombre d'utilisateurs seront à exclure du réseau. Une telle mesure nécessite de fixer en amont des critères de « sélection » qui permettent de choisir parmi les automobilistes ceux qui seront exclus du trafic. Toutefois cette mesure de fixation autoritaire d'un niveau de trafic socialement optimal pour la collectivité ne permet pas de résoudre le problème du transfert modal.

[17] *En France, la part moyenne de prélèvement sur le prix final du carburant est de 64%, celle de Royaume- Unis est de 80%, en Italie, elle est de 22% et celle des Etats- Unis de 27% [Reymond 03].*

- ***Interdiction de circuler en centre-ville***

Cette solution extrême est praticable dans de petites villes ou des villes moyennes. Elle est difficilement tolérable dans les grandes métropoles où elle présente tous les inconvénients d'une solution « tout ou rien ».

Elle est similaire à celle des plans de cloisonnement de la ville qui rendent le parcours difficile quand on va d'un point à l'autre de la ville et dissuade l'usage de la voiture.

- ***Le contrôle d'accès sur voie rapide urbaine***

Ce type d'action consiste à agir sur les flux au moyen des feux de circulation. On peut ainsi placer des feux sur les bretelles d'accès aux voies rapides et autoriser l'entrée en fonction des conditions de circulation sur la voie en question.

Les feux d'intersection peuvent également être utilisés pour limiter les accès à certaines zones ou favoriser certaines voies, en raccourcissant les durées de vert ou en multipliant les arrêts dans le cas d'une coordination.

- ***Gestion des horaires de travail***

Parmi les mesures que les pouvoirs publics et même les entreprises peuvent adopter c'est l'étalement des horaires de travail. Cette action permet d'alléger le niveau des encombrements pendant les heures de pointe.

- ***Les parcs relais***

Les parcs relais, à la fois système d'accès alternatif à un centre- ville et voie d'optimisation de la productivité d'un réseau de transport en commun, constituent un dispositif d'accompagnement d'une politique globale de déplacement qui est relativement léger, simple à organiser et peu coûteux. La technique des parcs relais permet une meilleure adéquation de l'espace et des moyens de transport qui le desservent, et de l'organisation de la complémentarité entre modes individuels et collectifs.

Parallèlement à ces mesures, les entreprises peuvent inciter les travailleurs au moyen de subventions à utiliser les transports en commun.

- ***La voiture partagée ou l'auto-partage***

L'auto-partage est un service de mobilité avancé qui offre aux usagers les mêmes avantages que la voiture (flexibilité, confort, temps,…) tout en éliminant pour ses adhérents la nécessité d'en posséder une. Il remplace, fondamentalement, la possession d'un bien de consommation usuel (l'automobile) par la vente d'un service. La structure tarifaire qui en résulte a pour effet de remplacer par des coûts variables les coûts fixes (élevés) qui sont normalement attribuables à l'automobile. L'adhésion à ce service incite à réduire l'usage de la voiture privée et à augmenter de manière importante la part des autres modes dans leur comportement en déplacement.

L'auto-partage joue le même rôle que le service public dans le cas où toute personne peut y accéder. Les véhicules ne sont pas possédés par une seule personne mais il ne peut être assimilé au service public dans la mesure où la réglementation des deux modes diffère de l'un à l'autre.

- ***Le covoiturage***

Le covoiturage désigne l'usage d'une seule voiture par plusieurs personnes qui effectuent ensemble un même trajet. Les caractéristiques de ce mode sont définies par le motif de ce trajet (aller au travail, à l'école, faire ses achats, en vacance …), sa fréquence (quotidiennement ou occasionnellement), sa durée (de quelques minutes à plusieurs heures) et sa distance (de quelques mètres à plusieurs centaines de kilomètres)[18].

Le covoiturage est une action qui touche aussi bien le niveau de l'organisation socio-professionnelle que les aménagements de voirie. Il permet à la fois d'économiser individuellement sur les coûts de transport (essence, péage, stationnement,…), de lutter contre la congestion urbaine et de limiter les émissions de polluants causés par l'automobile.

II.3.2.3. Le développement de l'infrastructure

Cette mesure pourrait faciliter la circulation et réduire par conséquent, les nuisances causées par l'automobile. Le développement de l'infrastructure routière pourrait assurer

[18] *Fiche du CNIG n°94-2006*

une circulation fluide et améliore la productivité des entreprises. En outre, cet instrument permet le développement et la croissance économique du pays et réduit les nuisances.

Les limites au niveau de chaque instrument d'internalisation de la congestion ont amené les chercheurs et les exploitants des réseaux de transport à penser à d'autres solutions. Parmi ces solutions, on note la coordination entre les différents modes de transport afin de bénéficier des avantages de chacun. Cette complémentarité ne peut être atteinte qu'à travers le développement du transport multimodal. Cependant, ce mode, présente lui aussi, certaines problématiques qui doivent être bien étudiées et maîtrisées.

II.4. Problématiques liées au réseau du transport multimodal

Les notions de multimodalité et d'intermodalité dans les réseaux de transport collectif font l'objet de différentes thématiques de recherche liées à l'aménagement des réseaux, à la gestion conjointe des différents modes de transport, à l'information multimodale et à la planification et régulation du trafic.

II.4.1. Aménagement des réseaux

Lors de l'aménagement des infrastructures routières ainsi que celles des réseaux de transport, la notion d'intermodalité a pour objectif de faciliter les déplacements et les échanges entre les différents modes de transport public et individuel par l'aménagement des pôles d'échange. Par exemple, des parkings au niveau des terminus des lignes de métro ou de bus sont susceptibles de favoriser l'emprunt du transport en commun au détriment des voitures particulières.

II.4. 2. Gestion conjointe

Dans un réseau multimodal, la qualité de l'offre est principalement perçue par les voyageurs lors des correspondances entre les différentes lignes d'un même mode de transport ou entre les différents modes. Ainsi, pour une qualité de service optimale et pour éviter les conflits qui peuvent surgir d'une gestion décentralisée, il est important d'avoir une vue globale sur l'ensemble du réseau multimodal lors de la planification et surtout lors de l'exploitation. Afin d'avoir une gestion conjointe, une liaison à travers un support intermodal entre les SAE de chaque mode de transport serait nécessaire surtout en conditions perturbées et précisément en cas de congestion.

II.4. 3. Système d'information multimodale

Face à l'augmentation du nombre et de la complexité des déplacements, les usagers souhaitent disposer d'une information fiable sur l'ensemble des modes de transports qui sont mis à leur disposition. De plus, cette demande a tendance à croître, du fait de l'apparition de nouveaux médias et de possibilités de diffusion issues des nouvelles technologies de l'information. De ce fait, plusieurs études récentes ont été réalisées concernant les systèmes d'information multimodale. Ces systèmes ont pour rôle de fournir à l'usager d'un réseau de transport toutes les informations nécessaires à la réalisation de son voyage. Ils visent à réduire l'incertitude des voyageurs sur les itinéraires, les modes de déplacement envisageables, la durée et le coût de ces déplacements et si possible à orienter le comportement des voyageurs au bénéfice d'une utilisation optimale des infrastructures et d'une priorité aux transports collectifs [Danflous, 01] et [Meskine, 01].

II.4. 4. Planification du trafic

Contrairement au cas monomodal, l'affectation et la planification du trafic dans un réseau multimodal sont plus difficiles vu la complexité des déplacements. En effet, ce processus réalise l'ordonnancement des véhicules afin de leur affecter des courses et aussi l'ordonnancement du personnel afin de leur affecter des services. Ainsi, cette problématique de la planification fait l'objet de plusieurs études qui relèvent du domaine de l'ordonnancement et des tournées de véhicules [Desrochers et al 99], [Rousseau 85],….

II.4. 5. Régulation du trafic

Le processus de planification est effectué en général une fois par an et ne s'appuie que sur des estimations de la demande et des durées des trajets entre les différents arrêts du réseau. Par conséquent, la moindre variation, en temps réel, de ces paramètres, est susceptible de contraindre les véhicules à des retards et par conséquent, les passagers à une attente encore plus longue.

Ainsi, la gestion du trafic dans un réseau de transport ne s'arrête pas à l'étape de la planification qui se fait en temps anticipé. Un processus de régulation est réalisé en temps réel afin de gérer les écarts entre les horaires planifiés ou théoriques et les horaires réels de passage, ce qui constitue un autre axe de recherche dans le domaine du transport.

II.5. Processus de Planification

II.5.1. Problématique de la planification

L'objectif du processus de planification est d'établir une offre prévisionnelle de transport qui s'ajusterait à la demande. Le processus traditionnel est illustré par la figure II.4 [Huissman 01]. La configuration initiale des lignes du réseau ainsi que leurs fréquences sont fixées comme données d'entrée. Les durées des trajets entre les différents points du réseau sont aussi considérées connues. Des tableaux horaires sont alors établis et résultent en des « courses » qui correspondent aux temps et lieux d'arrivée et de départ.

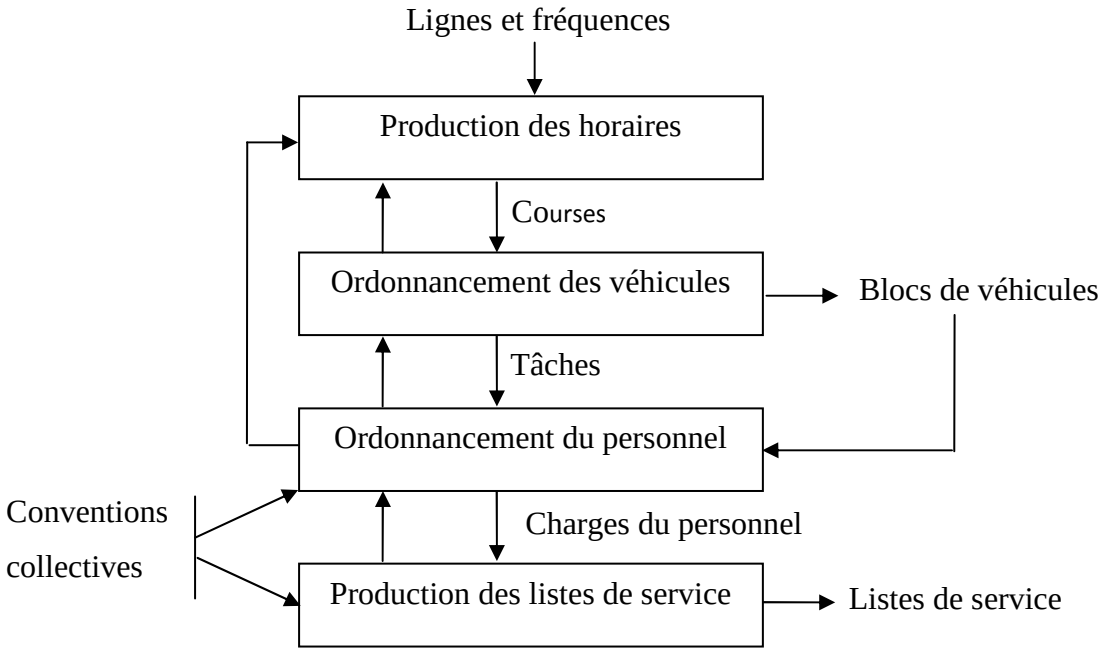


Figure II. 4 : Processus classique de planification

Ensuite, l'affectation de ces courses aux véhicules consiste en une tâche d'ordonnancement statique, à l'issue de laquelle on a des « blocs de véhicules » (ensemble des courses affectées à chaque véhicule). Par ailleurs, l'ordonnancement du personnel est aussi réalisé lors de la planification pour fixer les fiches horaires journalières de service des conducteurs et des régulateurs ainsi que les différentes relèves.

Le résultat de la planification se présente alors sous la forme de listes de service pour les différents intervenants dans l'exploitation et dans les TMT. Ces TMT représentent les

différents horaires de passage des véhicules aux arrêts du réseau et sont établis en tenant compte de la période de la journée (heures de pointe ou creuse), du type de journée (jour férié, dimanche, etc.), de la période de l'année (vacances scolaires, saisons), des conditions météorologiques et surtout selon les contraintes d'exploitation (nombre de véhicules,…).

La création des TMT est effectuée par les graphiqueurs qui les illustrent par des graphiques horaires pour les véhicules, selon le temps et la distance (figure II.5) Chaque véhicule a son évolution présentée par une droite discontinue entre son origine et sa destination et dont la pente traduit la vitesse moyenne entre des arrêts consécutifs. La longueur des segments des lignes horizontales représente les durées des arrêts aux stations.

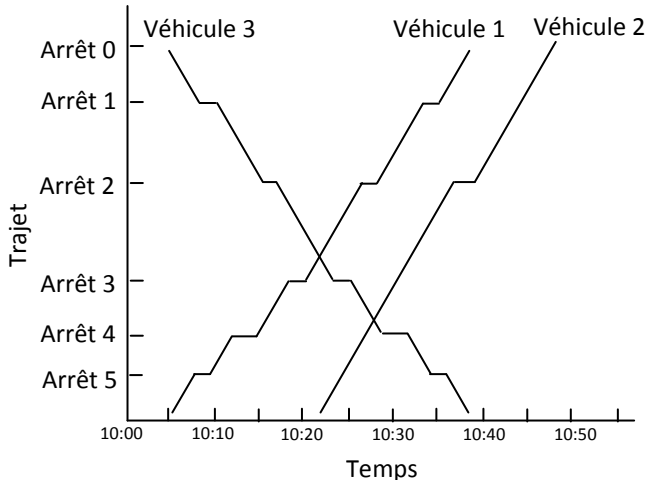


Figure II. 5 : Graphique des horaires des véhicules

Cette problématique étant complexe, et dans le but d'avoir des TMT optimaux qui maximisent la qualité de service et réduisent les coûts d'exploitation, plusieurs chercheurs ont consacré ainsi leurs travaux à la planification du trafic au sein d'un réseau de transport collectif, en utilisant, dans la plupart des cas, des heuristiques inspirées de la Recherche Opérationnelle [Wren, 98]. La planification est en fait souvent considérée comme un axe particulier des problèmes d'ordonnancement et de tournées de véhicules, « Vehicle Routing and Scheduling Problems », qui englobe différents problèmes tels que la livraison de marchandises, de la collecte du courrier ou des déchets ménagers urbains, de l'ordonnancement du transport spécifique aux écoliers ou handicapés, etc. Un modèle

général pour les problèmes d'ordonnancement des véhicules a été développé dans [Desrochers & al, 99]. Aussi, quelques outils informatiques traitant ce type de problèmes sont utilisés par les compagnies de transport par les bus, notamment HASTUS qui a été développé dans les années 80 [Rousseau 85].

II.5.2. Approches de planification

Pour modéliser les déplacements, il faut d'abord estimer les flux de voyageurs et les matrices Origine-Destination (O-D), qui sont en fait issus d'enquêtes auprès des usagers, d'études statistiques et des systèmes de comptage existants au niveau des véhicules et des arrêts. Plusieurs approches de planification du transport s'appuient sur des modèles stochastiques de la demande et sur les principes de files d'attente pour estimer les durées des attentes des voyageurs aux arrêts [Afanassieva & al. 96] et [Barla & al. 00].

Diverses études sur l'intermodalité et la multimodalité se basent sur les principes de l'écoulement du trafic surtout quand les voitures privées sont prises en considération. Elles concernent la recherche de l'équilibre statique entre l'offre et la demande en terme de débit ou de flot sur les différents itinéraires routiers [Lebacque 02a] et [Wynter et al, 03]. Les modèles de trafic peuvent aussi être considérés comme un problème biniveaux en optimisant, en plus du débit, les différentes tarifications liées aux réseaux multimodaux [Lebacque 02b].

Par ailleurs, le choix des lignes d'un réseau de transport public s'appuie sur des techniques d'optimisation qui concernent la longueur des itinéraires et la localisation des dépôts. En fait, l'ordonnancement des véhicules considère aussi leur affectation au dépôt à la fin de leurs courses en minimisant le temps de parcours à vide. L'existence de plusieurs dépôts rend le problème encore plus complexe, il est appelé alors problème d'ordonnancement multi-dépôt [Huissman & al. 01], [Wren 98] et [Zhu 95].

La figure II.6 présente un exemple illustrant les problèmes d'ordonnancement à deux dépôts. Les courses sont caractérisées par leurs horaires de début et de fin. Un arc est susceptible de relier deux courses quand leurs horaires sont compatibles. Autrement dit, il faut que l'horaire de début de la deuxième course soit après l'horaire de fin de la première

additionné à la durée du trajet séparant les lieux correspondant aux courses [Huissman & al, 01].

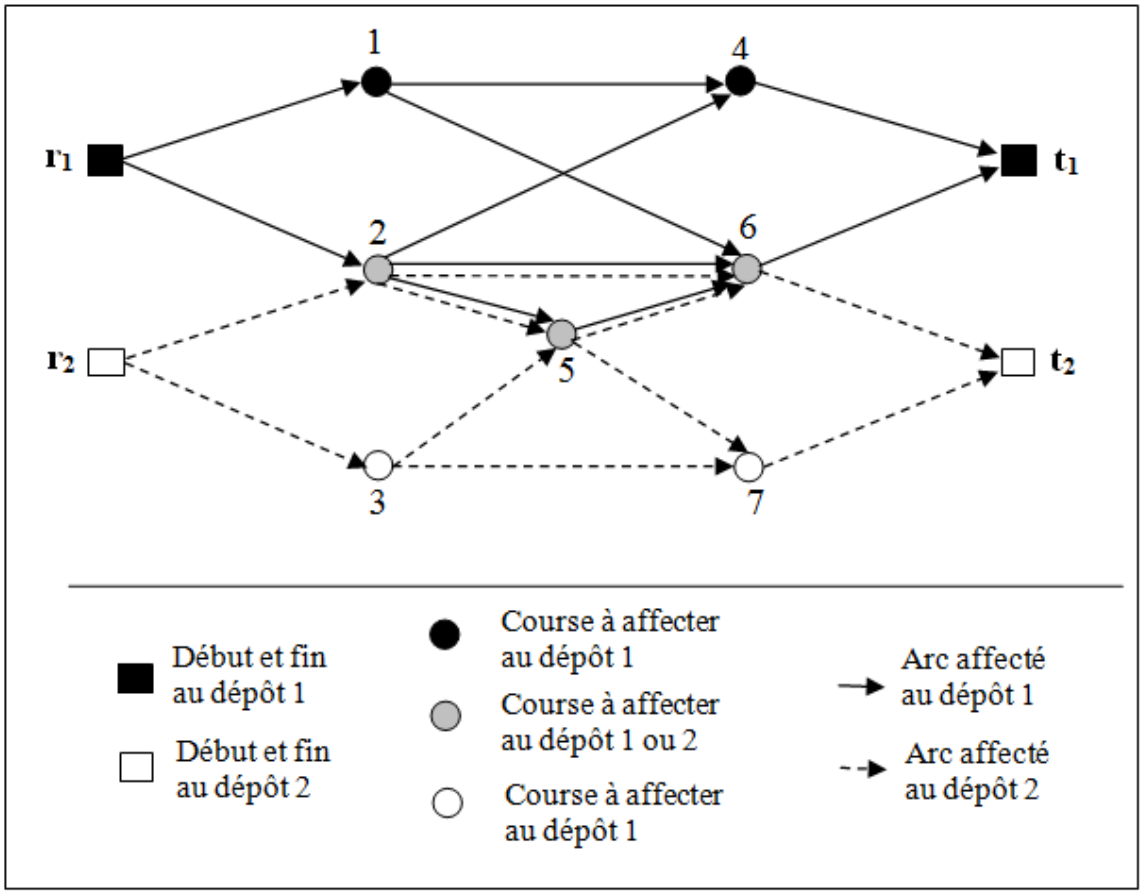


Figure II. 6 : Exemple de problème d'ordonnancement de véhicules à deux dépôts

Des approches basées sur la programmation linéaire ont aussi été développées pour des problèmes de petite taille d'ordonnancement des véhicules. Aussi, la propagation des contraintes a été utilisée dans [Isaai & al, 00] pour une heuristique orientée objet de planification du trafic des trains.

Le problème des correspondances entre les différentes lignes a aussi été considéré par [Deb 98] et [Chakroborty 95] avec une approche s'appuyant sur les algorithmes génétiques. Ces algorithmes ont aussi été utilisés par [Ngamchai & al. 00] pour construire les différentes routes des véhicules en même temps que leurs horaires en optimisant les coûts de la gestion de la flotte des véhicules, de l'attente des voyageurs et des coûts liés à la présence des voyageurs à bord des véhicules (durée du parcours).

D’autre part, l’ordonnancement du personnel a fait aussi l’objet de recherches depuis plus d’une trentaine d’années. Il s’agit de fixer les horaires de service des différents conducteurs ainsi que les heures et lieux de relève, en minimisant les heures supplémentaires et les durées des relèves. [Wren & al. 00] présente une approche génétique hybride pour l’ordonnancement des conducteurs des bus et des trains. Une approche combinée d’ordonnancement des véhicules et du personnel, basée sur la programmation linéaire, est aussi présentée dans [Valouxis 01].

II.6. Processus de régulation

La planification, réalisée en temps anticipé, se base sur les prévisions des conditions de circulation, les durées de trajets et la demande de transport. Ainsi, il est bien difficile en temps réel de respecter les TMT issus de ce processus à cause de l’apparition de phénomènes complexes et aléatoires affectant le trafic du réseau. Afin d’éviter la dégradation de la qualité de service, les perturbations provoquées par ces phénomènes doivent être traitées très rapidement à travers un processus de régulation. A partir de là, nous pouvons définir la régulation comme étant l’adaptation maximale en temps réel des tableaux de marche théoriques aux conditions réelles d’exploitation comme le montre la figure suivante.

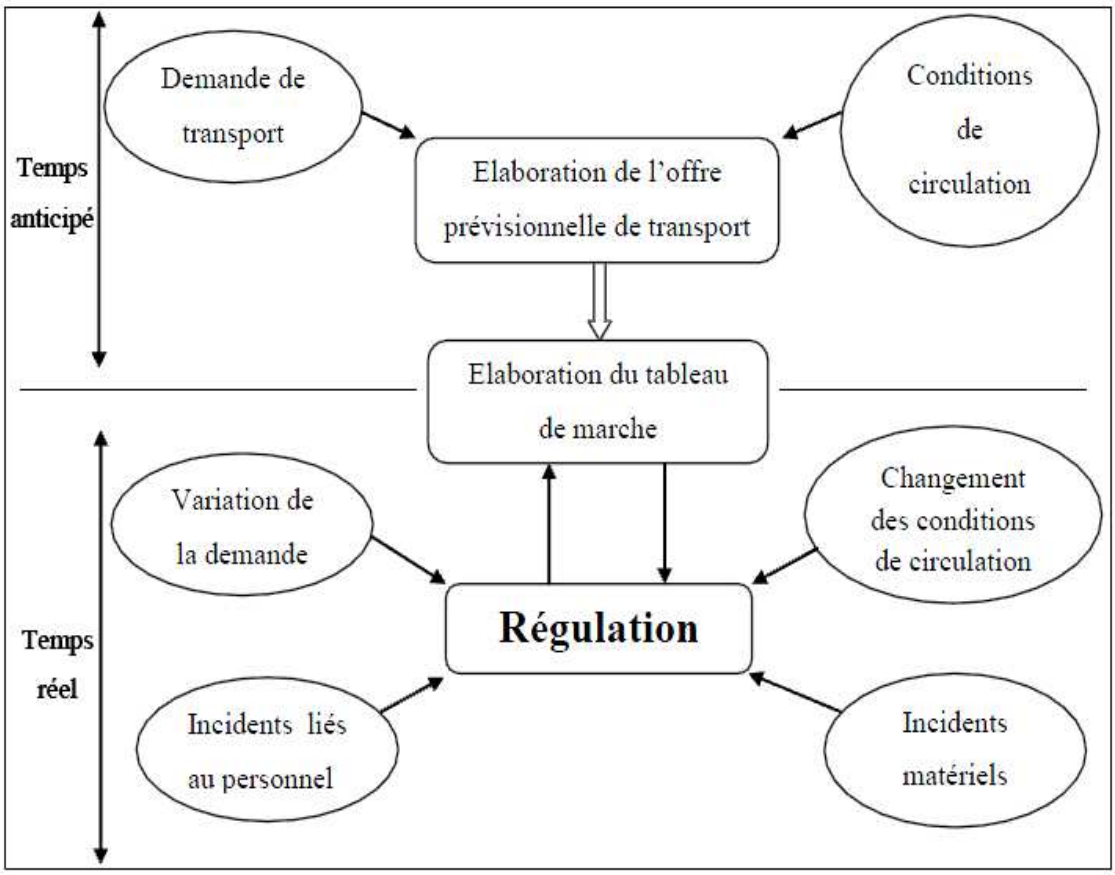


Figure II. 7 : La régulation dans un réseau de transport.

La régulation est réalisée par un ou plusieurs opérateurs humains appelés régulateurs, qui entreprennent des mesures de régulation en cas de perturbation, par les conducteurs mais aussi par les agents de surveillance et d'intervention présents sur l'itinéraire de la ligne [Fayech 03].

II.6.1. Les intervenants dans le processus de régulation d'un système de transport

Trois acteurs principaux interviennent dans le processus d'exploitation d'un réseau de transport en temps réel :

- Les régulateurs, travaillant au Poste de Commande Central (PCC) ou au Poste de Commande Local (PCL) selon le mode d'organisation du réseau : le régulateur est chargé de pilotage du système de transport. IL reçoit les informations et diffuse celles qui sont nécessaires pour exploitation.

- Les conducteurs des véhicules : Ils transmettent les informations aux régulateurs. Ensuite, ils doivent appliquer la stratégie ordonnée par le régulateur.

- Les agents de surveillance et d'intervention présents sur l'itinéraire de la ligne : interviennent en cas où un événement ou une perturbation se produit au niveau de l'exploitation du réseau de transport.

Cependant, la responsabilité première de la régulation incombe au régulateur qui a la vision la plus globale de l'état du réseau, car c'est vers lui que convergent tous les canaux de communication. Les actions des autres intervenants du processus, qui n'ont qu'une version fragmentaire des événements, ne présentent pas le même caractère systématique et ne sont en principe réalisés qu'après accord du régulateur. Leur rôle est par contre déterminant dans l'information du régulateur.

II.6.2. Rôle du régulateur

Le travail d'un régulateur est en fait un travail complexe qui peut être décomposé en quatre phases principales : acquisition des informations, analyse de ces informations, prise de décision et application de cette décision :

- ***Première phase : acquisition et diagnostic des informations***

Cette première étape est cruciale dans le processus de régulation. Le régulateur reçoit les informations concernant les perturbations affectant le système de transport. Ensuite, il les analyse afin d'évaluer leur gravité. Avant de proposer des stratégies de régulation de trafic, le régulateur s'appuie, dans son analyse, sur des critères tels que l'état des véhicules en correspondances (retard/avance) et leur charge. Ces informations représentent la base de la régulation, il est donc nécessaire qu'elles soient bien définies. Elles proviennent de deux sources principales : du SAE, et de la communication directe avec les chauffeurs qui rendent compte au régulateur de toutes les informations disponibles et jugées utiles telles que les incidents, les embouteillages,…

- ***Deuxième phase : Tri des connaissances***

Après la phase de diagnostic le régulateur trie les informations et garde celles qu'il juge déterminantes. Cette opération se fait généralement d'une façon traditionnelle en

s’appuyant sur l’expérience professionnelle ou quelquefois sur des règles de régulations préalablement définies.

- ***Troisième phase : Prise de décision***

Suite à l’opération de l’analyse et de tri des connaissances, le régulateur fait appel à son savoir-faire pour proposer des stratégies de régulation. Tout en respectant les impératifs de qualité de service, prédéfinies en collaboration avec les responsables du réseau, ainsi que les contraintes d’exploitation, il peut donc ordonner des manœuvres aux chauffeurs suivant la nature et la gravité des perturbations. Il peut aussi ne pas intervenir s’il juge que l’incident n’a pas d’impact important sur le réseau ni sur la satisfaction des clients du transport en commun,

- ***Quatrième phase : Mise en application***

Après avoir défini les stratégies de régulation, le régulateur les transmet et ordonne aux chauffeurs d’appliquer les différentes manœuvres de régulation correspondantes par communication directe par le biais de la radio. En retour d’information les chauffeurs rendent compte au régulateur de l’impact des décisions prises sur l’état du réseau et les conséquences sur les véhicules, et éventuellement sur les clients (flux de passagers non absorbé par exemple).

L’ensemble de ces étapes de régulation peut être groupé en trois phases principales (figure II.8). Une phase de diagnostic qui consiste à détecter et analyser les perturbations. Cette phase s’appuie sur les données fournies par le Système d’Aide à l’Exploitation (SAE) qui représente un support de surveillance du réseau. Une phase de décision où le régulateur choisit les mesures de régulation appropriées en tenant compte des contraintes d’exploitation et selon les critères qui conviennent aux objectifs d’exploitation et à la nature des perturbations. Et une dernière phase d’information qui permet d’informer les véhicules et stations concernés par la régulation de la solution finale retenue par le régulateur en vue de l’appliquer.

Une autre caractéristique du travail du régulateur est la nécessité d’anticiper l’évolution des perturbations et leurs conséquences sur le fonctionnement de la ligne. En effet, plus le régulateur agit tôt, mieux il peut prévenir la dégradation de l’état du réseau qui tend à s’éloigner de l’optimum.

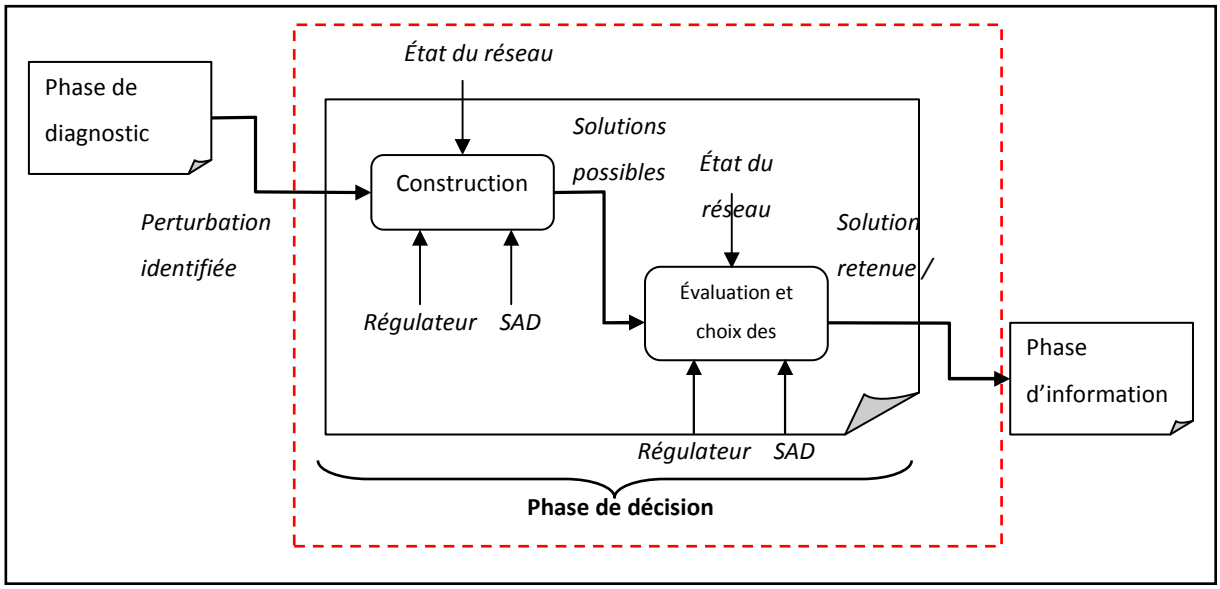


Figure II. 8 : Étapes de prise de décision

II.6.3. Sources principales d'identification d'une perturbation

Le régulateur utilise trois sources principales pour identifier les perturbations au sein du réseau :

- L'analyse des informations issues du SAE : cette analyse fournit plusieurs informations concernant l'état du réseau telles que les horaires de passages, les retards, la localisation des véhicules, le flux des voyageurs…

- Les informations fournies par les conducteurs à l'aide des appels radio ou téléphoniques.

- Son expérience : le régulateur peut juger qu'une perturbation a eu lieu ou peut apparaître ou que la qualité de service offerte s'est dégradée.

II.6.4. Logiques et manœuvres de régulation

II.6.4.1. Logiques de régulation

Ils existent généralement quatre logiques de régulation. Une cinquième logique concernant la gestion du personnel des réseaux de transport ne semble pas être négligeable.

- ***Logique d'enlèvement des voyageurs*** *:* C'est la logique dominante pendant les heures de pointe mais elle est aussi utilisée dans d'autres cas. L'objectif de cette manœuvre

est de servir tous les voyageurs et ne laisser personne dans les arrêts en concentrant les moyens sur le ou les points de montée les plus importants.

- ***Logique de régularité :*** Elle prévaut aux heures creuses lorsque l'arrivée des voyageurs est indépendante des passages des véhicules, ainsi que dans les heures dans le cas où la charge est répartie sur un grand nombre de points d'arrêt. En ce qui concerne la qualité de service offerte, la régularité permet de minimiser le temps d'attente des passagers dans les stations et aussi d'équilibrer la répartition des charges entre les véhicules.

- ***Logique de ponctualité :*** L'objectif de cette logique est d'assurer le passage des véhicules aux horaires prédéfinis. On la trouve sur l'ensemble du réseau dans le cas des horaires à respecter impérativement comme pour le premier et le dernier départ de la journée.

- ***Logique de correspondance :*** L'objectif est de minimiser le temps d'attente des voyageurs entre deux lignes du réseau ou avec des services extérieurs au réseau.

- ***Logique de gestion du personnel :*** Concerne les périodes où se posent les problèmes des fins de services et des relèves du personnel. Ainsi, il faut respecter les conditions statutaires de travail du personnel tout en assurant les relèves et en répartissant au mieux le temps de travail sur l'ensemble du personnel.

II.6.4.2. Les manœuvres de régulation

Les manœuvres de régulation les plus répandues dans la régulation du trafic d'un réseau de transport perturbé sont :

- ***Le haut pied hors ligne*** : C'est la mise hors service d'un véhicule sur un parcours ou une partie de parcours qui emprunte un itinéraire plus rapide hors ligne régulière afin de compenser son retard et de reprendre le service au prochain terminus ou à un arrêt quelconque sur la ligne.

- ***Le direct en ligne :*** Le véhicule suit l'itinéraire de la ligne assurant uniquement les arrêts de descente pour les clients à bord.

- ***Le demi-tour en ligne :*** Il consiste en la suppression d'une partie de course pour remettre un véhicule sur son horaire théorique, à un point de retournement, suite à un retard important de cette voiture.

- ***Le demi-tour avec échange de conducteurs et de véhicules:*** Un véhicule en retard est attrapé par le suivant moins chargé à l'heure. Le véhicule à l'heure transborde ses clients sur le véhicule en retard et on échange de conducteur. Puis, le véhicule en retard continue le service sur l'horaire de la voiture à l'heure qui fait demi-tour et prend l'horaire théorique du véhicule en retard.

- ***Le dépassement et service en descente uniquement :*** Un véhicule en retard est rattrapé par le suivant à l'heure. Le deuxième passe devant la première et assure le service normalement. Le véhicule dépassé continue la course mais n'assure que les arrêts de descente.

- ***Le départ retardé au terminus :*** Dans le cas où un véhicule ayant un retard supérieur à son temps de battement au terminus d'arrivée, on retarde le véhicule précédent au terminus d'arrivée de la moitié de la valeur du retard réel.

- ***L'échange des conducteurs et des véhicules :*** Une voiture en retard est rattrapée par la voiture qui la suit, d'où transbordement des voyageurs de la seconde voiture sur la première qui est plus chargée, et on effectue un échange de conducteurs et des numéros des véhicules. La seconde voiture, qui est vide, repart haut le pied, reprendre l'horaire théorique de la première voiture. Et la première voiture continue les horaires théoriques de la seconde.

- ***Le raccourci:*** Une voiture en retard est à deux minutes devant la voiture suivante qui est à l'heure. Le conducteur de la voiture en retard informe sa clientèle qu'il ne desservira pas une partie de la ligne et que ceux qui désirent descendre sur la partie non

desservie du parcours doivent passer dans la voiture suivante. La voiture en retard repart par le raccourci reprendre son horaire théorique en ligne.

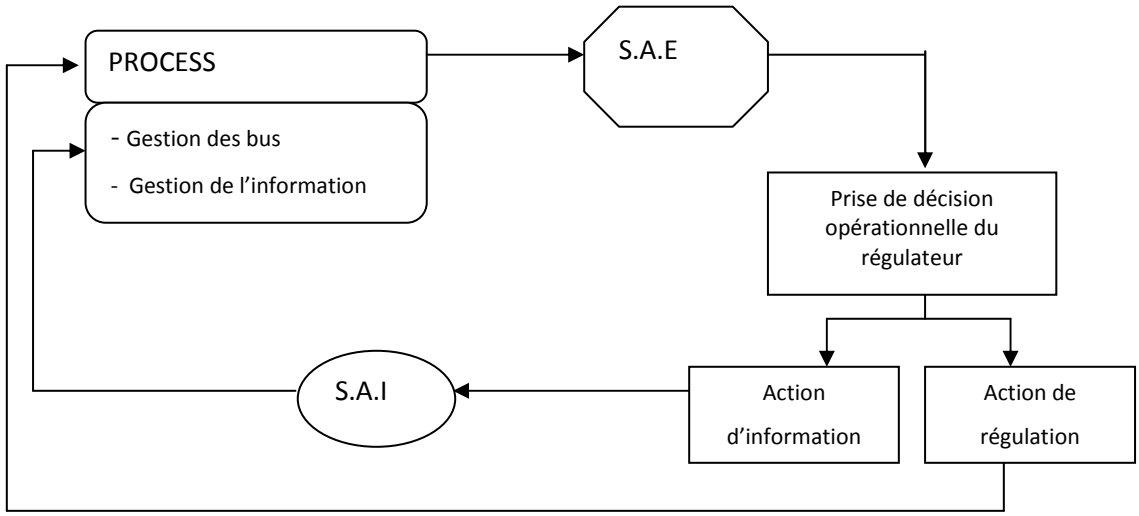
- ***La remise à l'heure par réserve et disponible:*** Elle consiste en l'injection d'une réserve et d'un disponible sur l'horaire théorique d'une voiture en retard ou en panne.
- ***La régulation en terminus :*** Elle consiste à effectuer des départs avancés ou retardés sur un terminus pour rétablir la régularité en ligne.

- ***La régulation en cascade :*** Elle s'applique lors d'une perturbation générale d'une ligne sans boucle. Elle consiste à utiliser une voiture de ligne en navette qui fait la rotation entre un terminus partiel en ligne et le terminus d'arrivée.

- ***La régulation en ligne :*** Cette décision consiste à retarder proportionnellement deux à trois véhicules en amont et en aval d'un véhicule en retard pour éviter la surcharge sur celle-ci et l'aider à ne pas accroître son retard afin de rétablir la régularité.

II.7. Les systèmes d'aide à la régulation

Les systèmes de régulation se basent sur des systèmes d'aide à l'exploitation (SAE) et à l'information (SAI) tel que le montre la figure suivante.



<u>Figure II. 9</u> : Processus de régulation en boucle fermée

II.7.1. Phases de développement des systèmes d'aide à l'exploitation et à l'information (SAEI)

La gestion en temps réel des réseaux de transports urbains a connu plusieurs phases de développement. A l'origine, l'exploitation commerciale du transport urbain était largement décentralisée. Des agents de surveillance étaient placés à certains arrêts stratégiques du réseau afin d'observer les passages réels des bus aux temps convenus dans le Tableau de Marche de base. L'exploitation était gérée sur la base des informations récoltées par ces agents de surveillance. En cas de perturbations très importantes, ils informaient la centrale par des appels téléphoniques.

La principale caractéristique de la deuxième phase du développement de l'aide à l'exploitation réside dans l'utilisation de la radiophonie. L'aide à l'exploitation centralisée et la surveillance ont dès lors pris de plus en plus d'importance. Ainsi, le chauffeur peut communiquer directement au poste central toute perturbation produite sur son trajet ou toute irrégularité du service. Par radio, les régulateurs obtiennent une vue plus au moins globale du réseau et de la localisation des véhicules ainsi que de leur situation à partir du poste de commandement central (PCC). Comme l'a montré la pratique, le fort accroissement des tâches du transport urbain, surtout aux heures de pointe, surcharge les régulateurs qui ne peuvent presque plus garantir le déroulement correct de l'exploitation par la seule radiophonie. Dès lors, les entreprises de transports urbains ont envisagé de nouvelles améliorations possibles de la gestion de l'exploitation. L'application des systèmes informatiques « très » puissants et la transmission par radio des données pour échanger des informations chauffeur/régulateur ont bien vite été considérées comme des solutions possibles pour gérer entièrement l'exploitation, ainsi les SAE ont vu le jour. Cela constitue la troisième phase du développement de la gestion de l'exploitation dans les transports urbains.

L'étape actuelle, consiste à améliorer ces systèmes d'aide à l'exploitation en intégrant un système d'information aux voyageurs.

II.7.2. Architecture et mise en place d'un SAEI dans les réseaux de transport collectifs

Les SAEI sont conçus autour d'architecture en réseau (liaisons Ethernet) plus flexibles de type Client- Serveur, plus ou moins complexes suivant la taille du réseau. Généralement, un SAEI est constitué d'un ensemble de sous-systèmes :

- Serveur « Temps Réel » : permet le suivi d'exploitation (régulation) et la gestion des informations voyageurs, alimente la base de données d'exploitation.
- Serveur « Temps Différé » : permet de fournir les données utilisées pour les statistiques, la mise en forme des données recueillies,… Il est généralement connecté au logiciel de graphicage.
- « Frontal de communication » : frontal radio permettant de communiquer avec l'ensemble des bus, des bornes d'informations,…et par lequel toutes les informations transitent.
- Bases de données : ensemble de données d'exploitation (temps-réel), des référentiels, données topologiques, données horaire,…

Les SAEI comportent deux principaux composants (figure II.10). Les composants matériels et les composants logiciels.

Les composants matériels du SAEI sont :

- Les moyens de localisation.
- Les supports de communication.
- Les équipements embarqués.
- Les équipements du PCC.
- Les différents terminaux d'information aux clients.
- Les équipements de commande de priorité aux feux.

Les traitements logiciels constituent la base de l'aide à la décision. Ils présentent différentes fonctionnalités qui vont être traitées ultérieurement.

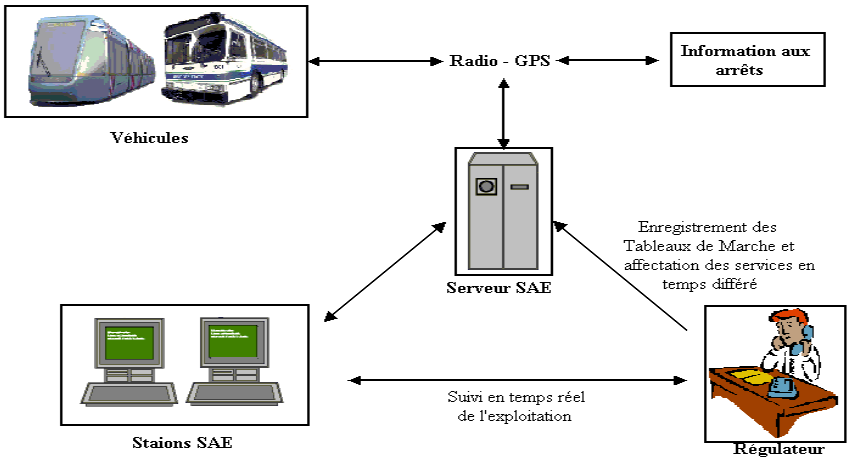


Figure II. 10 : Les composantes d'un SAE

II.7.3. Rôle et importance des systèmes d'aide à l'exploitation

Comme son nom l'indique, un SAEI possède deux fonctionnalités « l'aide à l'exploitation » et « l'aide à l'information » [CERTU 03]. Chacune de ces fonctionnalités regroupe différentes fonctions à travers des quelles, on peut déduire le rôle et l'importance des SAEI.

II.7.3.1. Garantir une meilleure exploitation

Les SAE sont conçus afin de garantir au mieux le déroulement planifié de l'exploitation. Cette exploitation peut se concevoir comme une boucle de régulation dont l'horaire est le paramètre de base. Des perturbations internes et externes accidentelles (congestion, accidents, avaries, pannes de courant, …….) influencent cette exploitation et écartent la sortie de la consigne. Dans ce cas, le SAE doit assister le régulateur et gérer les perturbations en intervenant pour rétablir la situation théorique. Il s'agit en effet, de traitements logiciels de base communs à tous les SAE qui consistent à :

- Déterminer la position instantanée des bus sur une ligne ou un réseau à partir des coordonnées géographiques reçues : Les moyens de communication actuels (GPS) entre le sol et les mobiles permettent d'échanger des données en ligne ou aux dépôts sur le

fonctionnement du matériel roulant. Comme elle permet d'aider à la sécurité du personnel et des clients.

- Prédire les horaires d'arrivée aux prochains arrêts en se basant sur les données de position et la vitesse moyenne du bus.
- Déterminer les écarts entre horaires théoriques et réels.
- Présenter toutes les informations au régulateur afin d'étudier les perturbations et les écarts entre le tableau de marche théorique.
- Aider à la décision concernant : ordres d'accélération/ralentissement à envoyer aux conducteurs, respect des correspondances, traitement des perturbations recueillies en fonction des procédures préétablies, mise en place éventuelle d'une régulation d'intervalle.

Pour une régulation plus efficace, le rôle principal d'un SAE est de permettre par la comparaison des informations théoriques et les informations réelles la détection et le traitement des perturbations. Grâce à ce rôle, un SAE permet la mise à jour des différentes sources d'informations :

- Mise à jour du TM en différé : le TM initial est produit à partir de l'optimisation de l'offre de transport. Mais un réseau de transport urbain est soumis à de fortes variations tant en ce qui concerne les conditions de circulation que la demande. Le SAE permet une mise à jour de ces données le cas échéant. Cette mise à jour porte sur la planification des horaires et l'affectation des matériels roulants (les mouvements des bus et leurs écarts par rapport au tableau de marche) et du personnel (.les temps de service des conducteurs), les alarmes et les incidents, les validations,….
- Modification du TM en temps réel : En cas de perturbation et suivant les besoins et les préférences du régulateur, le SAE lui permet de modifier le TM initial (réaffecter les services, les bus et/ou les conducteurs et les quais,…).

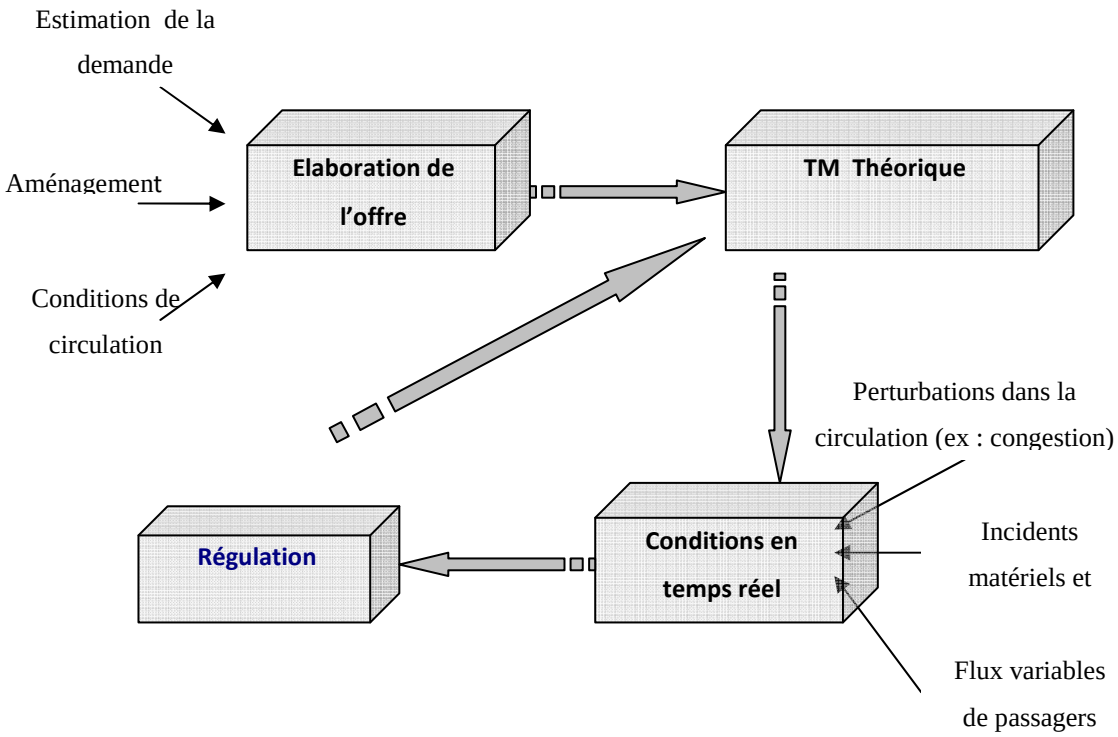


Figure II. 11 : Processus d'exploitation d'un réseau de transport collectif

Le processus de régulation est d'autant plus efficace que les perturbations sont découvertes plus tôt et que les régulateurs sont ainsi informés en détail.

Il faut noter que les régulateurs sont dans les PCC. Les opérations de régulation lourdes incluent généralement l'aide de contrôleurs de terrain.

II.7.3.2. Assurer la multimodalité et l'intermodalité des systèmes de transport

Les SAEI ont pour objectif principal d'assurer la multimodalité et l'intermodalité des systèmes de transport. Ceci grâce à un certain degré d'interopérabilité de ces systèmes. L'atteinte de cet objectif se base sur :

- La coopération trafic routier/TC : à travers différentes fonctionnalités telles que la priorité des bus aux feux, l'information multimodale route-TC, …
- La coopération entre les entreprises de transport afin de minimiser les problèmes d'interopérabilité.

- La coopération entre entreprises gérant différents modes afin de mieux gérer les correspondances et offrir aux clients une information sur le meilleur choix à effectuer pour leurs déplacements et leur faciliter l'usage des différents moyens de transport collectifs mis à leur disposition (transport par autobus/tramways urbains et transports par autocars et transports par autobus/tramways et SNCF).

II.7. 3.3. Garantir aux usagers une meilleure qualité de service

La satisfaction des voyageurs est un objectif primordial qui doit être atteint suite à l'exploitation des réseaux de transport. Cette exigence nécessite une bonne qualité de service de transport. Certains des indicateurs de qualité pourraient être révélés par le SAEI. Ces critères sont :

- Attitude conducteur.
- Régularité/ ponctualité.
- Disponibilité équipements embarqués.
- Fiabilité de l'autobus/tramway/métro.
- Netteté et propreté de l'autobus/tramway/métro.
- Taux de charge.
- Confort de conduite.
- Priorité aux feux : Cette fonction est très répandue dans les villes françaises. Elle permet d'améliorer la qualité de service par une meilleure régularité.
- …

Chaque indicateur doit être complété par un seuil d'inacceptabilité ou de service non rendu et la manière de gérer les situations inacceptables (rétablissement du service, substitution/remplacement, gestion de la gêne du voyageur,…).

Le SAE est un outil indispensable à la réalisation d'un système d'information aux voyageurs (SAI) appelé aussi « système d'information clientèle » étant donnée sa connaissance en temps réel de la position de l'ensemble des véhicules sur le réseau. Il est capable de fournir pendant le déplacement :

- Des renseignements aux points d'arrêt : Les dispositifs d'information embarqués peuvent fournir des informations sur certains points d'arrêt. Il s'agit généralement de panneaux à messages variables indiquant pour chaque ligne qui dessert l'arrêt, son numéro (ou sa destination), l'heure courante et le temps d'attente avant l'arrivée du prochain bus ainsi que sur les perturbations aux arrêts.

- De l'information sur l'offre de service : Les moyens de transport utilisés (bus, métro ou tramway) sont équipés de dispositifs d'information visuelle embarqués permettant d'indiquer aux usagers le numéro de la ligne ou la destination et le nom du prochain arrêt.
- De l'information en temps réel à bord des véhicules de transport collectifs.
- Des prévisions sur les horaires et les temps de parcours réels pouvant alimenter des dispositifs d'aide à la recherche du meilleur itinéraire.

En outre, les SAEI peuvent aujourd'hui contribuer fortement à l'information avant et après le déplacement. Ceci en gérant toutes les informations utiles (plaintes, critiques, remarques,…) fournies par les clients.

II.8. Les systèmes d'aide à la décision (SAD)

II.8.1. Importance d'un outil d'aide à la décision pour le régulateur

En se basant sur les informations provenant du SAE et sur les communications continues avec les chauffeurs des véhicules et afin d'exécuter en temps réel, plusieurs tâches difficiles et diverses s'étalent de la détection des perturbations jusqu'à la prise de décision, en passant par l'évaluation de l'importance de chaque perturbation et de son impact sur le réseau, le régulateur doit bien construire son espace de décision ou plus clairement l'espace spatio-temporel de régulation. Il est appelé à constamment faire face à toutes ces questions en temps réel par la prise en un temps limité, des décisions immédiates pour traiter les incidents qui peuvent aussi apparaître simultanément [Fayech & al. 02a]. Pour assurer une régulation efficace, il est nécessaire :

- d'avoir une vision globale sur le réseau ;
- de traiter immédiatement les informations disponibles décrivant l'état du réseau ;
- de mener une analyse selon le temps et l'espace des perturbations ;
- de projeter dans le futur l'effet des actions de régulation sur le réseau.

L'atteinte de cet objectif suppose la prise en compte de plusieurs variables : l'ensemble des bus d'une ligne ou du moins de plusieurs bus successifs, les correspondances avec cette ligne et aussi les contraintes sur le temps de travail du personnel.

Il s'agit par conséquent, d'un problème d'optimisation multicritères qui nécessite un outil d'aide à la décision à la fois consistant et convivial pour modéliser et représenter l'information incertaine sur les incidents, et pour analyser et proposer des stratégies de régulation. D'où l'importance d'un SAD pour les assister dans la régulation.

II.8.2. Définition d'un SAD

Un SAD bien conçu est un système interactif à base de logiciels qui aide les décideurs à extraire de l'information utile à partir de données brutes, de documents, de connaissances personnelles et de modèles opérationnels pour les fins d'identification et de résolution de problèmes complexes et de prise de décisions. C'est « l'apport d'éléments de réponses aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision en s'appuyant sur des modèles clairement explicités, dans le but que la décision soit prise avec plus de rigueur et d'efficacité» [Ould Sidi 06]. Il s'agit d'un outil qui permet aux régulateurs, à partir des informations fournies par le SAE, d'élaborer, évaluer et proposer des solutions efficaces au régulateur. Cette aide apportée par ce système au processus de régulation permet d'améliorer la qualité de régulation à travers la prise en compte des événements importants lors de la prise de décisions. En effet, avec la présence de perturbations aléatoires et complexes, le régulateur a besoin d'un SAD pour la gestion du réseau en temps réel afin de passer d'un état perturbé vers l'état théorique préétabli en utilisant les ressources disponibles de manière optimale.

II.8.3. Etapes de l'aide à la décision et rôle du SAD

L'aide à la décision passe par cinq étapes principales. Tout d'abord, la détection et l'*identification du problème* (étape 1). Ensuite la *modélisation* du problème (étape 2). qui permet de localiser les intervenants et les entités concernés. Cette modélisation amène à définir un ensemble de *solutions* (étape 3) basé sur le choix d'une approche algorithmique et à partir duquel le régulateur peut prendre sa *décision* (étape 4). La prise de décision se base sur un ensemble de propositions mises en place lors de l'étape d'interprétation et communiqué aux différents acteurs concernés. Cette décision sera finalement *implémentée* (étape 5). L'implémentation, consiste à appliquer les décisions opérationnelles, faire le suivi de leur impact, envisager des décisions correctives et valider les décisions finales. La figure suivante illustre ces différentes étapes d'aide à la décision.

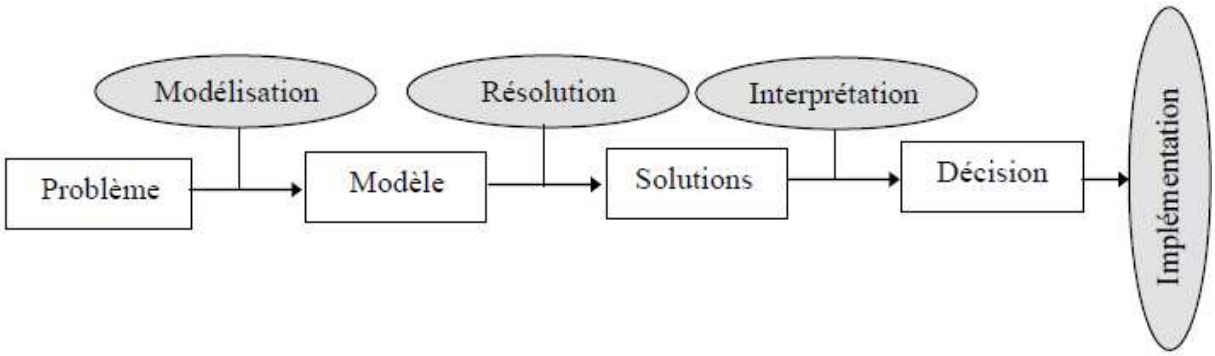


Figure II. 12 : Etapes de résolution d'un problème d'aide à la décision

Le processus de prise décision lié à la gestion en temps réel du trafic d'un réseau de transport urbain est présenté par la figure ci-dessous. Un SAD doit alors être capable d'exécuter les différentes étapes de ce processus.

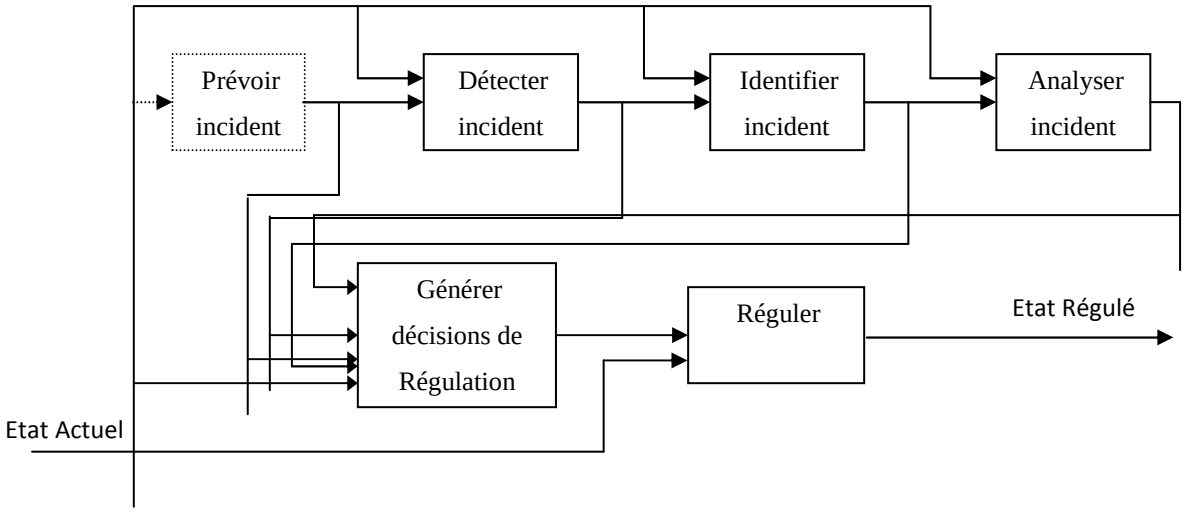


Figure II. 13 : Processus de contrôle en temps réel d'un réseau de transport

Dès la détection d'un incident, il faut modéliser le problème engendré en identifiant les différents paramètres le caractérisant (cause, véhicules et zones (arrêts) concernés, correspondances impliquées, importance des flux des passagers, etc.). Ensuite, une analyse de l'impact de cette perturbation sur le réseau permet d'évaluer sa gravité et de choisir, si possible, une stratégie de résolution adaptée.

Finalement, l'étape de résolution résulte en une proposition de solutions envisageables et en la projection dans le futur de l'effet de ces éventuelles décisions sur le réseau.

Le choix des décisions revient au régulateur et le SAD peut servir de support pour l'implémentation des décisions à l'aide du SAE.

En fait, le SAD présent, en tant que support du régulateur dans le choix de ses décisions, est considéré comme un serveur de propositions qui est lié aux opérateurs humains par une communication verticale [Balbo 00]. Ce serveur, à partir de l'état actuel du réseau, doit être capable non seulement de détecter les perturbations mais aussi dans la mesure du possible d'anticiper leur apparition afin de pouvoir intervenir avec des procédures préventives de régulation. La prédiction des perturbations permet de réagir à temps et de réduire leurs impacts sur le trafic. En outre, le SAD peut diriger le régulateur vers les perturbations considérées les plus gênantes dans le cas de l'apparition de plusieurs incidents simultanés et permet de générer par conséquent, des propositions de solutions dans l'objectif de faciliter la tâche de ce dernier en limitant son rôle aux choix de la solution appropriée si elles sont plusieurs ou à sa simple approbation si la solution est unique.

Par ailleurs, si le régulateur est en désaccord avec le SAD vis-à-vis des solutions proposées, on doit prévoir la possibilité d'une interaction entre eux afin d'aboutir à un accord.

II.9. Outils et approches de régulation d'un réseau de transport perturbé

Il existe différentes approches de régulation d'un réseau de transport perturbé qu'il s'agisse d'une régulation entièrement automatisée ou non. Dans cette section, nous présentons les principales approches. Nous commençons par les approches liées à la théorie de commande proprement dite avant de citer les autres approches issues principalement de l'intelligence artificielle et du soft computing.

II.9.1. Approche par séquentialisation temporelle

Le principe de base de la séquentialisation temporelle, consiste à établir des modèles mathématiques linéaires caractérisant le transfert d'un véhicule (la rame en l'occurrence) entre deux points d'arrêts successifs d'une ligne de transport en commun à haute densité. Pour cela, deux types d'équations sont établis : les équations aux déviations et les équations aux intervalles. Elles sont issues du raisonnement suivant :

- Détermination de l'instant de départ du véhicule (i) du quai (k+1).
- Détermination du temps de parcours entre les quais (k) et (k+1).

Cette modélisation est soumise à un certain nombre d'hypothèses détaillées dans [Hayat 93] et [Hartani 95]. Ces hypothèses nous permettent de déterminer le temps d'arrêt du véhicule (i) au niveau de la station (k+1), en tenant compte du nombre de passagers à embarquer à l'intervalle de temps écoulé entre deux départs. Les modèles linéaires présentés nous permettent de définir les équations qui serviront d'indicateurs pour la mise en place de la régulation.

Cette méthode de régulation présente deux principaux avantages :

- Elle permet une simulation suffisamment détaillée du trafic assurant une conformité des instants de passage à quai sans se soucier de l'état d'une rame entre deux quais,
- Elle permet la génération de lois de commande relativement efficaces, ne nécessitant qu'une information limitée récoltée lors des passages à quai seulement, d'où un coût réduit pour l'acquisition des informations.

Néanmoins certaines limites apparaissent :

- aucune liaison directe n'est établie explicitement entre les commandes calculées et leurs conséquences sur la modification des valeurs cinématiques des rames,
- la validité des résultats obtenus est extrêmement dépendante des différents paramètres estimés, la difficulté d'obtenir des estimateurs fiables peut influer sur la validité des résultats finaux obtenus,
- les modèles linéaires définis portent sur des hypothèses qui ne sont pas toujours vérifiées en réalité, des modèles non linéaires seront parfois nécessaires.

II.9.2. Approche cinématique de régulation

La seconde famille des modèles mathématiques permettant la description et la régulation de la dynamique du trafic sur une ligne de transport en commun à haute densité, est construite à partir des fonctions de transfert des équations du mouvement.

Le principe de base de cette approche consiste à connaître à tout moment et pour chaque rame, les différents paramètres cinématiques qui la caractérisent, à savoir : sa position, sa vitesse, son accélération et son jerk (dérivée troisième par rapport à la position).

La détermination de la commande optimale pour le système dynamique étudié passe par la description de l'ensemble des équations de mouvement. Les équations établies permettent de décrire, en fonction du temps, l'évolution de l'ensemble des paramètres cinématiques de la rame. Ce type de modélisation nous donne une simulation détaillée du mouvement et permet de connaître l'état du système à tout instant. Elle nécessite par contre pour sa mise en œuvre réelle, un système d'identification des véhicules performant et fiable mais coûteux, ainsi qu'un traitement de l'information en temps réel si l'on veut une adéquation du réel avec les modèles théoriques.

La combinaison des différents critères, en attribuant des poids à chacun d'eux, nous amène à établir des critères quadratiques de performance qu'il faut optimiser.

II.9. 3. Le cas du VAL

Les limites des deux approches précédentes ont amené les exploitants à utiliser en pratique des techniques et algorithmes beaucoup plus simples. Nous citons ici l'exemple du métro automatique de Lille qui utilise un algorithme basé sur les informations suivantes :

- Les horaires de départs des terminus
- Les durées d'arrêt en station,
- Les temps nominaux de parcours entre les stations

La méthode de régulation du VAL est la suivante : si une rame a un retard dont la valeur est inférieure à un seuil donné (marge de sécurité par rapport au temps normal d'arrêt à quai, 3 secondes en réalité), alors ce retard n'aura pas d'impact sur le trafic, car le

régulateur peut agir sur le temps de stationnement aux arrêts pour récompenser le retard. Par contre, si le retard est supérieur à un second seuil (2 minutes), un recalage de l'ensemble des horaires théoriques est effectué et toutes les rames seront retardées. Donc si le retard est inclue entre ces deux seuils, le régulateur doit diminuer le temps d'arrêt en station de 3 secondes et l'on donne à la rame en retard une consigne de vitesse supérieure à maintenir sur l'inter-station suivante.

[Adamski & al. 98] ont présenté un modèle dynamique s'appuyant sur la commande optimale pour la régulation, avec une représentation matricielle des différentes variables d'état (déviations des horaires théoriques), de contrôle et de perturbation. Mais, ce modèle ne tient pas compte des correspondances.

II.9.4. Algorithme flou

La logique floue [Bouchon 95] a été introduite dans diverses approches de régulation [Chihaïb 02][Soulhi 00][Bailly 96]. Elle est basée sur l'expérience des régulateurs et s'appuie aussi sur un algorithme de propagation des contraintes pour la régulation du trafic d'un réseau multimodal.

Cet algorithme fonctionne selon trois phases. La première et la deuxième phase servent pour l'apprentissage et l'évaluation des stratégies de régulation. La troisième phase consiste en l'implémentation réelle de ces stratégies dans le système de transport.

Ce type d'algorithme opère localement, c'est à dire au niveau d'un seul nœud de correspondance et par rapport à une seule correspondance. Les stratégies de régulation sont établies par rapport à un véhicule entrant et un véhicule sortant pour une correspondance. Donc, une décision de régulation est gérée sans la prise en compte de tous les véhicules entrant pour une même correspondance. L'algorithme assure une micro régulation partielle et ne prend pas en compte la macro régulation. Notons de plus que cet algorithme ne s'intéresse qu'au critère de correspondance.

II.9.5. Approche multi-agents évolutionniste

Les algorithmes évolutionnaires sont apparus à la fin des années 1950 [Fraser 57]. Ce sont des métaheuristiques inspirées de la génétique moderne et de la théorie d'évolution Darwinienne. Ils utilisent des techniques de recherche inspirées par l'évolution biologique des espèces. Les algorithmes évolutionnistes sont des algorithmes itératifs de recherche globale. Une solution représente un individu et un ensemble de solutions est assimilé à une population d'individus. Chaque individu possède une empreinte génétique appelée chromosome, et chaque chromosome est constitué d'un ensemble de caractéristiques appelé les gènes.

Le principe général des algorithmes évolutionnistes est de reproduire l'évolution humaine en considérant les concepts d'hérédité et de sélection naturelle. L'évolution s'effectue en réalisant un échange structuré mais aussi aléatoire des individus afin d'aboutir à des individus meilleurs au sens de l'optimisation de la fonction objectif. La nouvelle population est créée à l'aide de combinaison entre certains individus de la génération précédente à l'aide du mécanisme de croisement mais aussi par des modifications pseudo-aléatoires de leurs caractéristiques génétique à l'aide de l'opérateur de mutation.

Dans notre travail, nous optons pour cette approche étant donnés les différents avantages qu'elle présente. Aussi, ses caractéristiques et sa méthode d'application permet de traiter notre problème traité. Nous revenons sur cette approche avec plus de détails ultérieurement.

II.10. Conclusion

La substitution des transports en commun à la voiture privée en est une solution efficace. Mais l'usage d'un seul moyen s'est avéré inefficace. D'où l'importance de la combinaison de différents modes et par conséquent, d'un réseau multimodal. L'efficacité et la réussite de cette solution dépend du degré de développement des systèmes de régulation et d'exploitation qui la gèrent. Dans ce chapitre, nous avons présenté les perturbations dans le domaine de transport et montré comment la congestion routière constitue une perturbation qui doit être prise en considération par les systèmes d'exploitation des réseaux de transport. Nous proposons dans les chapitres qui suivent, un système pour réguler le réseau de transport multimodal en tant qu'alternative à la voiture particulière et solution au problème de congestion.

Chapitre III : Modélisation des critères de régulation et des perturbations : vers une conception d'un SAD à base d'agents

III.1. Introduction

L'efficacité d'un réseau peut être mesurée par le biais de la théorie des graphes ainsi que par une analyse de réseau. Ces méthodes ont comme postulat que l'efficacité d'un réseau dépend en partie de la configuration des points et des liaisons. En effet, des études ont été conduites afin de démontrer que l'existence d'inégalités spatiales peut se mesurer par la quantité de liens entre les points d'un réseau ainsi que par les revenus générés par les flux de trafic [Williamson 1965].

Les réseaux de transport urbains constituent des systèmes dont les informations sont dispersées, la gestion est distribuée et la télécommunication est mobile, ce qui explique leur modélisation par des systèmes distribués. Par conséquent, le choix d'une modélisation du réseau basée sur une approche agent est bien approprié.

Dans ce chapitre, nous exposons en premier lieu, la formulation mathématique du problème de régulation des réseaux de transport ainsi que les différents critères et contraintes pris en considération. En second lieu, nous définissons les différentes méthodes de modélisation des réseaux de transport. Enfin, nous proposons notre approche de conception d'un système d'aide à la décision à base d'agents.

III.2. Formulation mathématique

La formulation mathématique est une étape déterminante pour la résolution du problème de régulation. En effet, elle nous permet de définir et caractériser les variables de décision, les critères de régulation, les contraintes et l'horizon spatio-temporel où les décisions précises seront appliquées.

III.2.1. Les variables de décision

Les décisions relatives au processus de régulation portent essentiellement sur les horaires et les itinéraires des véhicules. Par conséquent, il faut définir des variables de décisions qui explicitent l'affectation des véhicules aux différentes lignes, l'ordre et les horaires de desserte des lignes, mais aussi les durées de parcours et de stationnement. La configuration choisie pour le réseau nécessite une répartition de ces variables en variables spatiales et variables temporelles.

III.2.1.1. Affectation des nœuds et des arcs

Un arrêt peut être identifié par la ligne à laquelle il appartient. Ainsi, la j ème station de la ligne $m$est notée S_j^m. Et par analogie, on note V_i^l le i ème véhicule de la ligne l.

L'affectation des nœuds se traduit par le choix des stations par lesquelles les véhicules vont passer. Ce choix est représenté par la variable de passage a_{ij}^{lm} associée au véhicule V_i^l à la station S_j^m. La valeur de a_{ij}^{lm} est égale à 1 si V_i^l passe par S_j^m et 0 sinon.

L'affectation des arcs concerne le choix de l'ordre de passage des véhicules aux arrêts. La variable de destination x_{ijk}^{lmr} concernant le véhicule V_i^l et l'arc entre les stations S_j^m et S_k^r est égale à 1 si V_i^l passe directement de S_j^m à S_k^r et 0 sinon.

III.2.1.2. Les horaires de passage

Les horaires de passage affectés à chaque véhicule concernent son arrivée et son départ des différents arrêts par lesquels il passe. L'horaire d'arrivée du véhicule V_i^l à la station S_j^m est noté ta_{ij}^{lm}, et son horaire de départ est noté td_{ij}^{lm}.

Afin d'éviter de traiter directement les horaires des tableaux de marche théoriques, il est plus judicieux d'introduire des variables intermédiaires relatives aux temps de parcours et aux temps de stationnements sur lesquelles opèrent les décisions de régulation.

III.2.1.3. Les durées de parcours

Pour des mesures de régulation, la durée initiale t_{ijk}^{lmr} du véhicule V_i^l entre S_j^m et S_k^r peut être modifiée. Cette modification est représentée par la variable δ_{ijk}^{lmr} qui est exprimée en minutes et peut être soit positive pour un ralentissement du véhicule soit négative pour une accélération. L'intervalle dans lequel se situe, par définition, cette

variable est fixé selon la nature du véhicule, sa vitesse, les conditions de circulation et les objectifs de régulation. Nous définissons donc des limites inférieure et supérieure pour δ_{ijk}^{lmr} : $-\delta_{\min}^{l} \leq \delta_{ijk}^{lmr} \leq \delta_{\max}^{l}$.

III.2.1.4. Les durées de stationnement

En outre des modifications des durées de parcours, la régulation peut aussi agir sur les durées de stationnement des véhicules dans les arrêts. Nous définissons donc la variable ε_{ij}^{lm} qui illustre le temps supplémentaire de stationnement du véhicule V_i^l à l'arrêt S_j^m. Les contraintes d'exploitation impliquent une valeur maximale de cette variable. D'où : $0 \leq \varepsilon_{ij}^{lm} \leq \varepsilon_{\max}$.

III.2.1.5. Relation entre les variables de décision

Le calcul récursif des horaires de départ et d'arrivée des véhicules se base d'une part sur les données théoriques relatives aux durées de parcours et d'arrêt que l'on retrouve dans le TMT et d'autre part sur les décisions de régulation exprimées par les variables de décisions.

L'horaire de départ du véhicule V_i^l de la station S_j^m s'écrit sous la forme :

$$td_{ij}^{lm} = ta_{ij}^{lm} + a_{ij}^{lm} \times (ts_{ij}^{lm} + \varepsilon_{ij}^{lm}) \qquad (1)$$

Et l'horaire d'arrivée du véhicule V_i^l à l'arrêt S_j^m est représenté par l'équation :

$$ta_{ij}^{lm} = td_{ik}^{lr} + x_{ikj}^{lrm} \times (t_{ikj}^{lrm} + \delta_{ikj}^{lrm}) \qquad (2)$$

Avec S_k^r est la dernière station desservie par V_i^l avant S_j^m, td_{ik}^{lr} le temps de départ de V_i^l de S_k^r et t_{ikj}^{lrm} la durée de parcours initiale entre S_k^r et S_j^m.

III.2.2. Les critères de régulation

Pour le calcul des fonctions relatives aux critères de régulation, on introduit deux hypothèses :

- **Hypothèse 1 :** les clients qui entrent dans le réseau doivent attendre jusqu'à leur desserte.
- **Hypothèse2 :** le flux des passagers et leurs destinations sont supposés connus à travers une enquête.

III.2.2.1. Critère de régularité

Ce critère correspond à la régularité des intervalles de temps qui séparent les passages successifs des véhicules à une même station. Il concerne la minimisation de la durée d'attente des voyageurs aux arrêts du réseau. Pour ce critère, on ne prend en compte que les voyageurs venus « à pied » aux arrêts et non pas ceux qui effectuent une correspondance : ce sont les voyageurs qui ne sont pas en transfert dans le réseau.

III.2.2.1.1. Calcul de l'attente à un arrêt

Le calcul de l'attente des voyageurs à une station dépend de l'intervalle de temps séparant deux passages successifs de véhicules à cette station et du nombre de voyageurs dans la station.

On note $V_{i'}^{l'}$ le véhicule suivant V_i^l à la station S_j^m, l'intervalle de temps séparant leurs deux passages s'écrit $\Delta t = ta_{i'j}^{l'm} - td_{ij}^{lm}$ qui est la différence entre l'heure d'arrivée de $V_{i'}^{l'}$ et l'heure de départ de V_i^l.

Considérons la distribution des arrivées des voyageurs $\mu_{S_j^m}(t)$ à l'arrêt S_j^m, l'attente des passagers pendant Δt est alors :

$$attente\ (\Delta t, S_j^m) = \int_0^{\Delta t} \mu_{S_j^m}(t)\ (\Delta t - t)\ dt \qquad (3)$$

La distribution des arrivées des passagers est considérée comme un processus non stationnaire de Poisson. En considérant des intervalles de temps plus réduits (2 à 4 minutes) ou situés dans des périodes homogènes, on peut considérer que le flux des passagers est constant $\mu_{S_j^m}$, ainsi l'expression de l'attente devient : *attente* ($\Delta t, S_j^m$) = $\mu_{S_j^m} \times \frac{\Delta t^2}{2}$.

Dans le cas d'un intervalle plus large n'appartenant pas à une période homogène, il peut être divisé en plusieurs intervalles réduits pour simplifier le calcul de la durée de l'attente des passagers. En divisant Δt en IN intervalles, $\Delta t = \bigcup_{I=1..IN} \Delta t_I$, le nombre de voyageurs arrivant à la station S_j^m pendant Δt_I avec un taux d'arrivée μ_I est $\mu_I \times \Delta t_I$, la durée moyenne d'attente est alors :

$$\textit{attente}\ (\Delta t_I, S_j^m) = \mu_I \times \Delta t_I \times (\frac{\Delta t_I^2}{2} + \sum_{I'=I+1}^{IN} \Delta t_{I'}) \quad (4)$$

Ainsi, on peut recalculer l'attente moyenne pendant Δt à l'aide de l'expression suivante:

$$\textit{attente}\ (\Delta t, S_j^m) = \sum_{I=1}^{IN} \mu_I \times \Delta t_I \times (\frac{\Delta t_I^2}{2} + \sum_{I'=I+1}^{IN} \Delta t_{I'}) \quad (5)$$

III.2.2.1.2. Calcul de l'attente totale sur l'horizon de régulation

Une estimation du nombre de descentes et de montés dans chaque station est nécessaire pour déterminer la charge d'un véhicule. Ainsi, le temps d'attente des passagers dans une station n'est plus lié au flux total d'arrivée mais à un flux spécifique selon la destination de chaque voyageur.

Supposons que V_i^l quitte la station S_j^m à l'instant td_{ij}^{lm} et qu'il passe par la station S_k^r. On note $V_{i'}^{l'} = Veh^+(V_i^l, S_j^m, S_k^r)$ le premier véhicule qui succède V_i^l à S_j^m et qui passe également par S_k^r après S_j^m ; et $\mu(\Delta t_I, S_j^m, S_k^r)$ le taux constant d'arrivée pendant Δt_I à S_j^m et qui ont S_k^r comme destination. Ainsi, l'attente des voyageurs à la

station S_j^m allant à la station S_k^r pendant l'intervalle Δt séparant le passage de V_i^l et $V_{i'}^{l'}$ peut s'écrire sous la forme :

$$attente\ (\Delta t, S_j^m, S_k^r) = \sum_{I=1}^{IN} \mu(\Delta t_I, S_j^m, S_k^r) \times \Delta t_I \times (\frac{\Delta t_I}{2} + \sum_{I'=I+1}^{IN} \Delta t_{I'}) \quad (6)$$

Ainsi la durée totale de l'attente des passagers dans la station S_j^m est la somme d'attente pour tous les véhicules qui y passent :

$$attente\ (S_j^m) = \sum_{V_i^l \in V^H} (a_{ij}^{lm} \times \sum_{S_k^r > S_j^m} attente(ta_{i'j}^{l'm} - td_{ij}^{lm}, S_j^m, S_k^r)) \quad (7)$$

et la durée d'attente totale est la somme des durées d'attente pour chaque station :

$$AT = \sum_{S_j^m \in S^H} attente(S_j^m) \qquad (8)$$

III.2.2.2. Critère de correspondance

Le critère de la correspondance est lié à la durée de transfert entre les véhicules dans un pôle d'échange. On définit une variable $y_{ii'j}^{ll'm}$ qui est égale à 1 si une correspondance est possible de V_i^l à $V_{i'}^{l'}$ dans la station S_j^m et 0 sinon.

On pose $\omega_{ii'j}^{ll'm}$ le nombre de personnes en transfert de V_i^l à $V_{i'}^{l'}$ dans la station S_j^m, on peut exprimer ce nombre comme une proportion $\rho_{ii'j}^{ll'm}$ du nombre des passagers qui descendent du véhicule V_i^l à la station S_j^m noté $Ndesc_{ij}^{lm}$. La durée totale des transferts est la somme des durées des correspondances entre les différents véhicules :

$$TT = \sum_{V_i^l \in V^H} \sum_{V_{i'}^{l'} \in V^H} \sum_{S_j^m \in S^H} y_{ii'j}^{ll'm} \times \omega_{ii'j}^{ll'm} \times (td_{i'j}^{l'm} - ta_{ij}^{lm}) \qquad (9)$$

III.2.2.3. Critère de ponctualité

Le critère de ponctualité est en rapport avec les horaires de passage par les stations et par suite les durées de parcours des trajets séparant deux stations successives. Il s'agit donc d'optimiser la durée totale des trajets à bord des différents véhicules selon leurs charges. Il est donc nécessaire de calculer le nombre de personnes qui montent et qui descendent de chaque véhicule à chaque station.

III.2.2.3.1. Nombre de passagers montants

Pour $V_i^l \in V^H$ et $S_j^m \in S^H$, le nombre de personnes qui montent à bord de ce véhicule à cet arrêt est égal à la somme des personnes qui arrivent à cet arrêt et qui ont pour destination un arrêt qui se trouve dans la route de V_i^l et le nombre de personnes qui effectuent une correspondance vers V_i^l au même arrêt. Ainsi, le nombre de personnes qui montent à bord de V_i^l dans la station S_j^m est exprimé par :

$$Nmont_{ij}^{lm} = \sum_{S_k^r > S_j^m} N_{ijk}^{lrm} + \sum_{V_{i'}^{l'} > V_i^l} y_{i'ij}^{l'lm} \times \omega_{i'ij}^{l'lm} \qquad (10)$$

$N_{ijk}^{lrm} = \sum_{I=1}^{IN} \mu(\Delta t_I, S_j^m, S_k^r) \times \Delta t_I$ est le nombre de personnes montant à bord de V_i^l allant de S_j^m à S_k^r.

III.2.2.3.2. Nombre de passagers descendants

Par analogie avec le nombre de personnes montants, le nombre de personnes descendants est égal à la somme des nombres de personnes venues à pied et qui ont S_j^m comme destination et le nombre de personnes et du nombre de personnes qui ont effectué une correspondance vers V_i^l à une station S_k^r qui précède S_j^m. Ce nombre est

proportionnel à $\omega_{i'ik}^{l'lr}$ avec un taux $\lambda_{i'ik}^{l'lr}$. Le nombre de personne descendant peut alors s'écrire sous la forme :

$$Ndesc_{ij}^{lm} = \sum_{S_k^r < S_j^m} (N_{ikj}^{lrm} + \sum_{V_{i'}^{l'} \in V^H} y_{i'ik}^{l'lr} \times \lambda_{i'ik}^{l'lr} \times \omega_{i'ik}^{l'lr}) \qquad (11)$$

III.2.2.3.3. Calcul de la charge

On note $S_{j'}^{m'}$ l'arrêt précédent desservi par V_i^l avant S_j^m, la charge totale de V_i^l en quittant S_j^m est égale à la somme de sa charge initiale calculée au départ de la station précédente et le nombre de personnes montant à bord de V_i^l à S_j^m, et on soustrait le nombre de personnes descendants.

$$C_{ij}^{lm} = C_{ij'}^{lm'} + Nmont_{ij}^{lm} - Ndesc_{ij}^{lm} \qquad (12)$$

III.2.2.3.4. Calcul de la durée de parcours totale

Le calcul de la durée de parcours s'effectue en multipliant les charges des véhicules par les tronçons inter-stations. La durée totale des routes (RT) est présentée par l'équation :

$$RT = \sum_{V_i^l \in V^H} \sum_{S_j^m \in S^H} a_{il}^{jm} \times C_{ij'}^{lm'} \times (td_{ij}^{lm} - td_{ij'}^{lm'}) \qquad (13)$$

III.2.2.3.5. Les kilomètres commerciaux

Ce critère sert à minimiser la différence entre les distances théoriques et réelles parcourues. Il est très considérable lors d'une reconfiguration du réseau. Il est exprimé par l'équation :

$$KM = \sum_{V_i^l \in V^H} \sum_{S_j^m \in S^H} a_{ij}^{lm} \times a_{ij'}^{lm'} \times d_i^l (S_j^m, S_{j'}^{m'}) \qquad (14)$$

Où $d_i^l(S_j^m, S_{j'}^{m'})$ est la distance parcourue par V_i^l entre les deux stations successives S_j^m et $S_{j'}^{m'}$.

III.2.2.3.6. La qualité de service

La qualité de service peut être exprimée différemment d'un opérateur à un autre. Une mesure de ce critère peut être basée sur le nombre de stations non desservies, le nombre d'échanges de véhicules et de conducteurs et le nombre de transbordements en minimisant le maximum de ces trois termes :

$$QS = \max_{V_i^l \in V^H}(n_change(V_i^l), n_trans(V_i^l), n_stat(V_i^l)) \qquad (15)$$

III.2.3. Les contraintes

Plusieurs contraintes sont à prendre en considération pour la régulation. Concernant les itinéraires de véhicules, il est nécessaire d'avoir une conformité entre les variables de passage et les variables de destination. Ainsi, chaque véhicule doit avoir une destination immédiate unique : $\sum_{S_k^r \in S^H} x_{ijk}^{lmr} = a_{il}^{jm}$; et un seul prédécesseur immédiat : $\sum_{S_k^r \in S^H} x_{ikr}^{ljm} = a_{il}^{jm}$.

En outre, pour des raisons de sécurité à cause du partage des voies, et même pour des raisons de régularité, on définit pour chaque ligne *l* une borne inférieure $Inter_{\min}^l$ pour les intervalles de passage entre les véhicules. Ainsi, si $V_{i'}^l$ est le premier successeur de V_i^l, alors $ta_{i'j}^{lm} - td_{il}^{jm} \geq Inter_{\min}^l$. Et pour les mêmes raisons, on définit un temps maximal de stationnement $tsmax_{il}^{jm}$ des véhicules aux différents arrêts, et on impose la contrainte suivante : $td_{ij}^{lm} - ta_{ij}^{lm} \leq ts\max_{ij}^{lm}$.

Et en tenant compte de l'importance des correspondances et leur impact sur la qualité de service perçue par l'utilisateur, les opérateurs imposent des limites inférieure et supérieure sur les

durées de transfert. Ainsi pour une correspondance de V_i^l vers $V_{i'}^{l'}$, les limites sont présentées par : $Trans_{\min} \leq (td_{i'j}^{l'm} - ta_{ij}^{lm}) \leq Trans_{\max}$.

Il faut noter qu'on peut définir ces limites de correspondance séparément pour chacune des correspondances à planifier. En effet, pour des raisons de précision et pour améliorer la qualité de service, ces limites doivent prendre en considération la nature de la station et la distance que doit effectuer le passager pour changer d'un véhicule à un autre. L'importance de cette précision est perçue surtout dans les grandes gares où on peut éventuellement passer un temps important pour réaliser une correspondance.

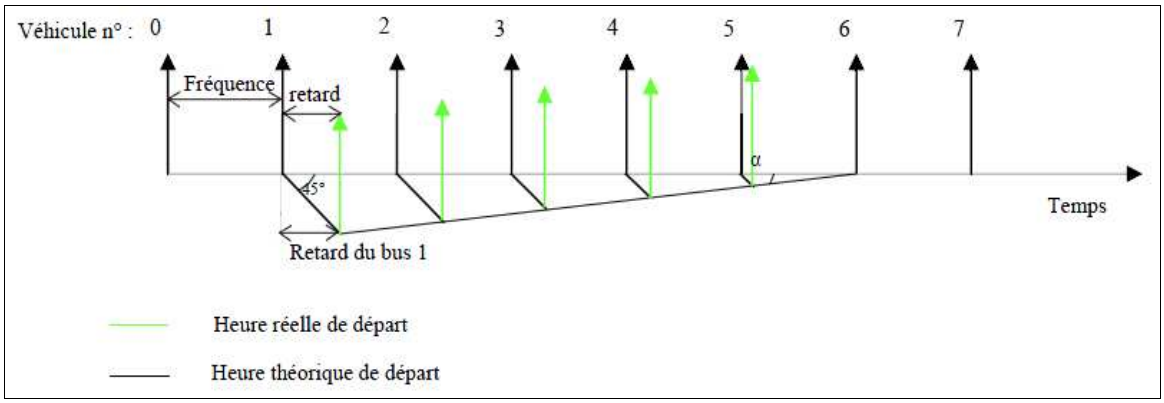
Enfin, la dernière contrainte est reliée à la capacité des véhicules. En fait, la charge de chaque véhicule V_i^l à son départ d'une station S_j^m doit être inférieure ou égale à sa capacité maximale : $C_{ij}^{lm} \leq C\max_i^l$.

III.3. Horizon spatio-temporel de régulation

III.3.1. Détermination de l'horizon de régulation

Le processus de régulation opère après la détection d'une perturbation. Il est donc nécessaire de définir les entités du réseau en relation avec la ou les perturbations considérée(s). Cet ensemble dépend de plusieurs paramètres tels que l'instant de détection de la perturbation, la nature des perturbations, l'état du réseau lors de la détection des perturbations, la nature des véhicules impliquées, la période de la journée… Ainsi, afin de bien contrôler l'évolution des perturbations et leurs impacts, il est primordial de déterminer l'horizon spatio-temporel correspondant à chacune d'entre elles. Donc, l'horizon sera formé par un axe spatial contenant les arrêts et un axe temporel représenté par les véhicules. Nous proposons une méthode géométrique inspirée de l'algorithme de régulation au terminus (représenté dans la figure suivante) qui est utilisé pour déterminer dynamiquement l'horizon de la perturbation en tenant compte de ses caractéristiques. Cette méthode consiste à déterminer l'angle α tel que $\tan(\alpha) = 1 - \frac{V_{moy}^{per}}{V_{moy}^{nor}}$, où $\frac{V_{moy}^{per}}{V_{moy}^{nor}}$ est la

décélération du véhicule perturbé : $\frac{V_{moy}^{per}}{V_{moy}^{nor}} = \frac{t_{par}^{nor}}{t_{par}^{per}} = \frac{t_{par}^{nor}}{t_{par}^{nor} + r}$ où t_{par}^{nor} et t_{par}^{per} désignent respectivement le temps de parcours normal (avant la perturbation) et le temps de parcours après la perturbation entre la station courante et la station perturbée, et r le retard du véhicule perturbé.



<u>Figure III. 1</u> : Principe de la régulation en terminus

D'après le graphique ci-dessus et en considérant la station perturbée comme terminus partiel, nous pouvons calculer facilement le nombre de véhicules en amont (n_0) à inclure dans la zone perturbée par la formule suivante :

$$\tan\alpha = \frac{r}{(f - r) + (n_0 - 1) f} \text{ d'où } n_0 = \frac{r(1 + \tan(\alpha))}{f \tan(\alpha)}.$$

Avec f est la fréquence de la ligne.

Ainsi, le nombre de véhicules à inclure dans la régulation est composé par un nombre de véhicules en amont exprimé par la formule suivante : $N_{up} = (E(n_0) + 1) + 1$ où E (n_0) désigne la partie entière de n_0 ; et un nombre de véhicules en aval $N_{down} = \begin{cases} N_{up} - 1 & si\ 0 < N_{up} \leq 3 \\ N_{up} - 2 & si\ N_{up} > 3 \end{cases}$

Afin de réduire l'espace de recherche, nous proposons de diminuer le nombre de véhicules en amont selon la formule $N_{up} = \begin{cases} n_0 & si\ E(n_0) = n_0 \\ (E(n_0)+1 & sinon \end{cases}$

En ce qui concerne la détermination des stations concernées, on note S_{up} la première station desservie par le véhicule $(V_{dist} + N_{up})$ et S_{down} la première station desservie par le véhicule $(V_{dist} - N_{down})$ après la détection de la perturbation. Ainsi, toute station qui se situe entre S_{down} et S_{up} appartient à l'horizon de régulation.

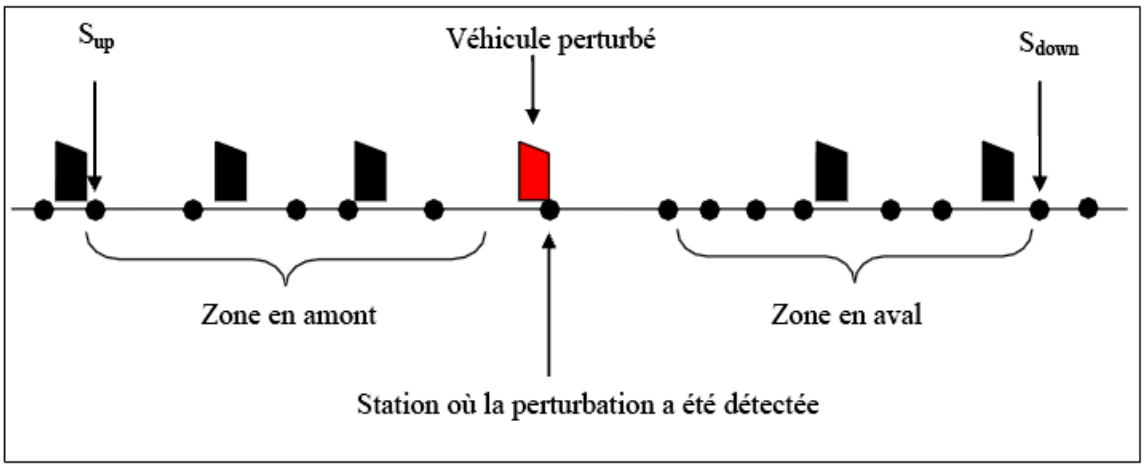


Figure III. 2 : Horizon spatiotemporel de régulation

La dernière étape de détermination de l'horizon consiste à déterminer les stations dans lesquelles une correspondance s'effectue, et ensuite, s'il y a un risque de perte d'une correspondance, on doit inclure les stations et le véhicule de la ligne avec laquelle la correspondance est prévue dans l'horizon de régulation en utilisant la même méthode et en remplaçant la fréquence par celle de la ligne concernée par la correspondance. Le nombre de véhicules en amont (n_0) à inclure dans la zone perturbée est donc :

$$n_0(ligne_corre) = \frac{r(1+\tan(\alpha))}{f_{l,cor}\ \tan(\alpha)}.$$

III.3.2. Détermination de l'horizon de régulation pour des perturbations simultanées

En présence de plusieurs perturbations simultanées, la détermination de l'horizon s'avère encore plus compliquée. En effet, plusieurs cas peuvent se présenter et il est nécessaire de bien estimer l'ampleur de chaque perturbation et les entités du réseau qu'elle affecte afin de déterminer l'horizon global de régulation. Pour simplifier cette tâche, on peut traiter chaque cas à part selon les entités concernés par la régulation et en tenant compte seulement de deux perturbations.

- **1er cas : Perturbations séparées**

Dans ce premier cas le plus simple, on note $H_1 = (S_1^H \cup V_1^H)$ l'horizon de régulation relatif à la première perturbation et $H_2 = (S_2^H \cup V_2^H)$ l'horizon de régulation relatif à la deuxième perturbation et on suppose que $H_1 \cap H_2 = \emptyset$. La détermination de l'horizon dans ce cas s'effectue localement et chaque perturbation peut être traitée séparément de l'autre. Pour les décisions de régulation, on choisit la meilleure solution obtenue pour chaque perturbation et nous les effectuons si cela est possible. Cependant, dans le cas où les deux solutions ne peuvent pas être réalisées ensemble, nous gardons la meilleure solution pour la zone la plus prioritaire (selon le flux des voyageurs, les correspondances, la présence d'autres possibilités de transport…) et nous optons pour la meilleure solution faisable pour l'autre perturbation.

Dans notre approche proposée, nous résolvons le problème de régulation localement. Ainsi, après avoir déterminé l'horizon spatio-temporel de régulation pour chaque perturbation, nous définissons la solution optimale. Pour certains cas, ce travail effectué est suffisant pour l'aide à la décision. Cependant, dans d'autres cas plus compliqués, les deux solutions optimales ne peuvent pas être réalisées simultanément. Par exemple, si la solution est la même pour les deux perturbations et elle consiste à injecter un nouveau bus. Nous supposons aussi que les deux lignes partagent le même entrepôt et qu'à l'instant de perturbation il n'y a qu'un seul bus disponible ou un seul conducteur. Il est donc impossible de satisfaire les deux solutions. Pour surpasser ce problème, on définit des priorités pour chaque perturbation. La priorité donnée est en fonction de l'importance de la

ligne, le flux de voyageurs desservis, la présence de correspondances, l'heure de la journée, la présence d'autres alternatives de déplacement… Nous attribuons donc les ressources disponibles (bus+conducteur dans ce cas) pour la perturbation la plus prioritaire et nous cherchons une nouvelle solution pour l'autre perturbation.

- **Généralisation pour *m* perturbations simultanées et séparées**

Soit *m* perturbations simultanées et séparées, nous notons $H_i \; i \in \{1..m\}$ l'ensemble des horizons de régulation relatifs à chaque perturbation et on suppose que $H_i \cap H_j = \emptyset \; \forall i \neq j \; i, j \in \{1..m\}$, nous attribuons aussi une priorité Pr_i relative à chaque perturbation *i*. La recherche d'une solution de régulation s'effectue localement en traitant chaque perturbation à part. Ensuite, nous contrôlons la faisabilité des solutions simultanément et au cas où deux solutions optimales ne peuvent pas être réalisées au même temps, nous favorisons la régulation de la perturbation la plus prioritaire au dépend de la moins prioritaire pour laquelle nous optons pour la deuxième meilleure solution.

- **2ème cas : Perturbations chevauchantes**

Nous supposons que $H_1 \cap H_2 = H_{12} = (S_{12}^H \cup V_{12}^H) \neq \emptyset$, pour ce cas plus compliqué que le premier, l'horizon de régulation doit contenir les entités du réseau impliquées dans les deux perturbations. Ainsi, nous considérons que l'horizon spatio-temporel global est l'union des deux horizons H_1 et H_2 : $H_G = H_1 \cup H_2$.

- **Généralisation pour *m* perturbations chevauchantes**

Nous considérons *m* perturbations simultanées et chevauchantes, nous notons $H_i \; i \in \{1..m\}$ l'ensemble des horizons de régulation relatifs à chaque perturbation. L'horizon global de régulation est l'union des différents horizons $H_G = \bigcup_{i=1}^{m} H_i$, nous définissons aussi un seuil pour la taille de l'horizon global $Seuil_{H_G} = (Seuil_S, Seuil_V)$. Ainsi, si le nombre de stations appartenant à H_G est inférieur à $Seuil_S$ et le nombre de véhicules est inférieur à $Seuil_V$, nous appliquons l'algorithme de régulation sur l'horizon global obtenu. Et si le nombre de stations appartenant à H_G est supérieur à $Seuil_S$ ou le

nombre de véhicules est supérieur à $Seuil_V$, nous considérons que les perturbations nécessitent une reconfiguration spatiale du réseau. Ainsi, nous utilisons un algorithme de reconfiguration en premier lieu puis un algorithme de régulation des horaires. Après cette étape, la solution globale de régulation est obtenue.

III.4. Modélisation des réseaux de transport

III.4.1. Modélisation par graphes

La théorie de graphes est l'un des outils les plus utilisés pour la modélisation des réseaux de transport. Elle consiste à représenter les arrêts par des nœuds et le déplacement entre eux par des arcs orientés et pondérés. La pondération correspond à la distance entre les deux stations successives symbolisées par les sommets. Ainsi, chaque ligne est représentée par une suite de nœuds et arcs qui relient le terminus de départ à celui d'arrivée.

La figure suivante illustre un exemple de modélisation par graphes d'un réseau de transport multimodal:

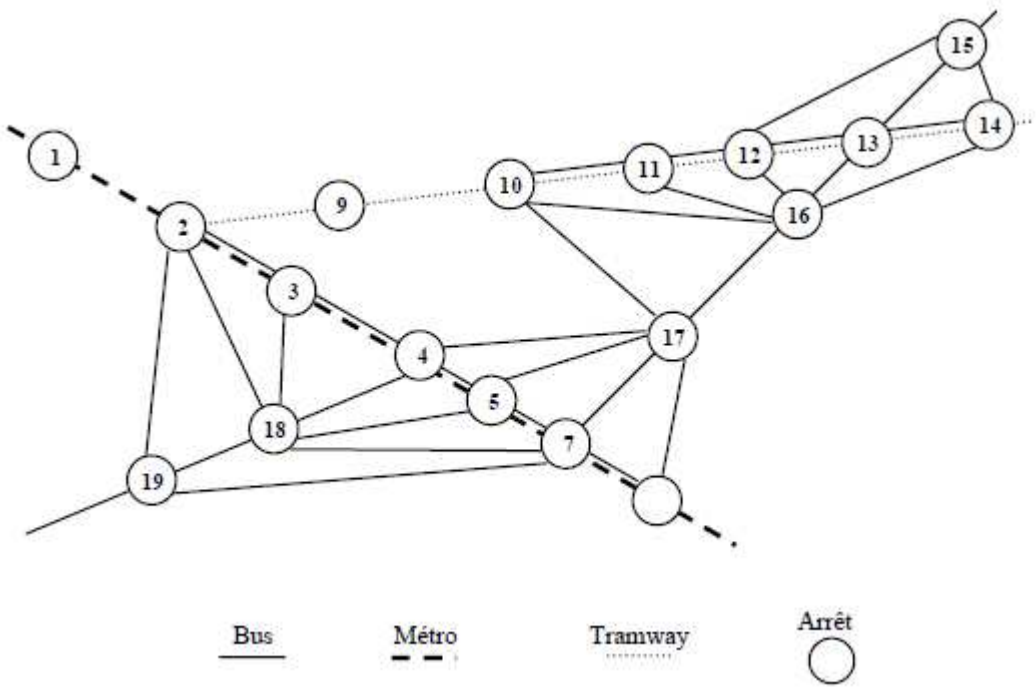


Figure III. 3 : Modélisation par graphes d'un réseau de transport multimodal

Un graphe est donc une représentation symbolique d'un réseau. Il s'agit d'une abstraction de la réalité de sorte à permettre sa modélisation. Cependant, cette modélisation ne considère que la configuration des horaires dans le réseau et ne prend pas en considération les flux de passagers et la flexibilité des itinéraires pour les bus.

III.4.2. Modélisation par réseaux de Pétri

Les Réseaux de Pétri (RdP) forment un outil puissant de modélisation des systèmes à événements discrets. Un RdP est en fait un graphe biparti particulier. Il comporte deux types de nœuds: les places et les transitions qui sont en nombres finis et non nuls. Une place est représentée par un cercle et une transition par un trait (ou un rectangle). Les places et transitions sont reliées par des arcs. Un arc est orienté. Il relie une place à une transition ou une transition à une place.

La dynamique d'un réseau de Pétri est décrite par un marquage associé à chaque état de ce réseau ou plus précisément à chaque état du système modélisé par celui-ci. L'évolution de l'état correspond alors à une évolution du marquage qui se traduit par le franchissement des transitions. Ils sont, ainsi, capables d'exprimer et de visualiser l'occurrence d'événements, la mise en parallèle et la synchronisation, le partage des ressources, le non déterminisme, etc.

La figure suivante illustre un exemple de modélisation par réseaux de Pétri d'un arrêt de bus [Fayech, 03].

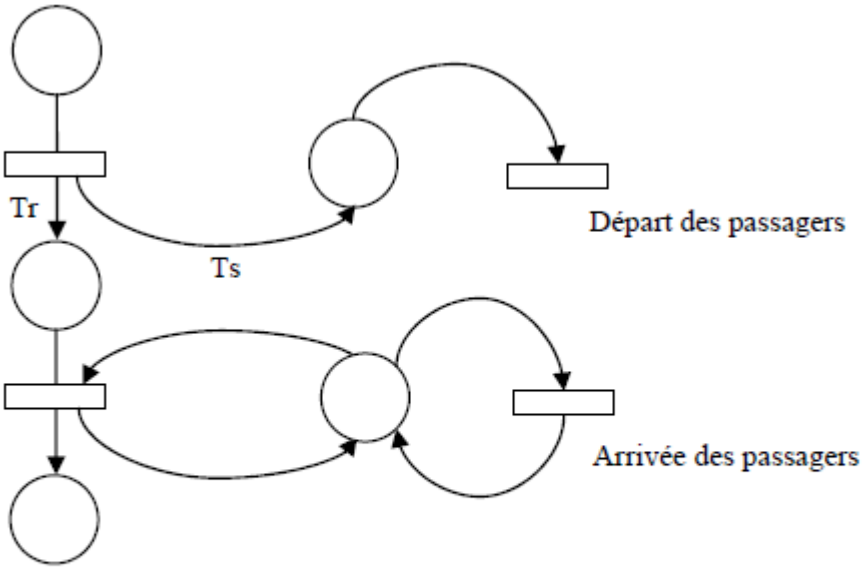


Figure III. 4 : Exemple de modélisation par les RdP d'un arrêt de bus

En effet, plusieurs travaux de recherche sur l'optimisation de la gestion des réseaux de transport ont adopté un modèle basé sur les réseaux de Pétri pour modéliser les réseaux de transport considérés. Cependant, la précision d'un tel modèle est inversement proportionnelle à sa taille. Cette taille se trouve considérable pour une seule ligne du réseau. Aussi, ce modèle serait tellement important en taille qu'il serait ingérable.

Pour pallier à cet inconvénient et gagner plus de concision, des modèles basés sur les RdP colorés ont été construits mais ce type de modèles se prête difficilement à l'analyse formelle et sa mise en œuvre reste difficile malgré les outils spécifiques d'analyse qui y sont dédiés.

III.4.3. Modélisation par systèmes multi agents

Les réseaux de transport étant ouverts et distribués, plusieurs études récentes s'appuient sur des approches Agent. Les agents sont des entités conceptuelles qui existent dans un environnement dans lequel ils interagissent en vue de résoudre des problèmes qui

dépassent leurs capacités et connaissances individuelles. Dans ce but, ils communiquent entre eux et se partagent des connaissances. Ainsi, l'efficacité des systèmes multi-agents dépend essentiellement de la formalisation de la coordination entre les agents.

Les systèmes multi-agents sont utilisés dans la résolution des problèmes liés à des systèmes ouverts, distribués et complexes. Ils permettent de modéliser le problème à l'aide d'un ensemble d'agents intelligents, chacun spécialisés dans la résolution d'un aspect particulier du problème, et fonctionnant en commun à partir d'un contrôle centralisé. Le raisonnement individuel des agents peut améliorer la cohérence des systèmes multi-agents car chaque agent réfléchit sur les effets non locaux que peuvent avoir les actions locales, essaie de prévoir le comportement des autres agents et explique ou répare les conflits et les mauvaises interactions.

La figure suivante illustre une modélisation par systèmes multi agents du réseau de transport réalisé dans la thèse de [Fayech, 03]. La partie agents de ce modèle se divise en deux modules : le premier est dédié à la surveillance, et le second à la régulation. Les agents qui composent ces deux modules sont : agent « véhicule », agent « arrêt », agent « incident », agent zone perturbé « zonepert » et agent zone regulée « zonereg ». Ils coopèrent entre eux pour traiter les incidents. Les solutions de régulation sont proposées par les agents « zonepert », et sont ensuite transmises à l'agent « zonereg » qui utilise une approche évolutionniste pour les améliorer.

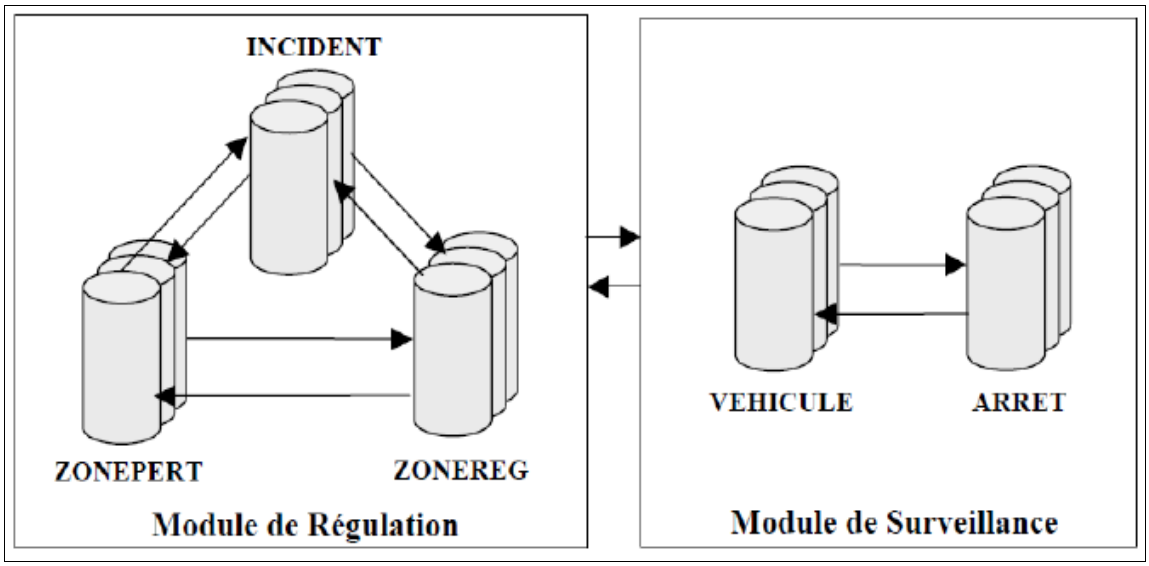


Figure III. 5 : Modélisation par un système multi agents

III.4.4. Comparaison entre les modèles

Afin de déterminer les apports d'un certain modèle pour trouver une solution au problème de régulation, il est judicieux de préciser les caractéristiques de la tâche de régulation que la modélisation doit prendre en considération. Ainsi, nous considérons que la multimodalité, la demande, les horaires, les itinéraires et le dynamisme constituent les paramètres les plus importants pour la modélisation d'un réseau de transport multimodal.

En se basant sur ces paramètres, nous constatons que la modélisation par graphes ne tient compte que de l'aspect multimodal et néglige les autres. Les RdP répondent aux aspects demande et itinéraires mais la taille importante des réseaux réels est difficile à représenter et la multimodalité est non mentionnée. Les systèmes multi agents, quant à eux, ne prennent pas en considération la multimodalité et la demande mais représentent le modèle le plus apte à représenter l'aspect dynamique des réseaux de transport.

Nous constatons par conséquent, qu'aucun modèle ne répond parfaitement aux exigences de régulation d'un réseau de transport multimodal. Nous optons pour une modélisation hybride qui regroupe la modélisation par graphes et les systèmes multi agents. Nous garantissons ainsi la représentativité de l'aspect multimodal et des itinéraires et le suivi du dynamisme du réseau de transport.

III. 5. Module d'aide à la régulation proposé : Modélisation par systèmes multi agents

III.5.1. Définition d'un agent

Le concept d'agent fait l'objet d'études sur plusieurs décennies dans différentes disciplines. Ainsi il existe plusieurs définitions qui se ressemblent mais qui diffèrent aussi selon le type d'application pour lequel l'agent a été conçu.

[Ferber 95] définit un agent comme étant : « une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui, dans un univers multi agent, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents. »

[Florez 99] présente une autre définition plus explicite du terme agent. Selon lui, « Un agent est une entité interactive qui existe en tant que partie d'un environnement

partagé par d'autres agents. C'est une entité conceptuelle qui perçoit et agit avec initiative ou en réaction dans un environnement où d'autres agents existent et interagissent les uns avec les autres sur la base de connaissances partagées de communication et de représentation».

Afin de mieux comprendre la notion d'un agent, il est nécessaire de savoir les propriétés qui y sont attribuées telles que :

- **Adaptabilité** : capacité à apprendre et s'améliorer avec l'expérience.
- **Autonomie** : l'agent est capable d'agir sans l'intervention d'un tiers (humain ou agent) et contrôle ses propres actions ainsi que son état interne.
- **Proactif** : l'agent doit avoir un comportement proactif et opportuniste, tout en étant capable de prendre l'initiative au "bon" moment.
- **Collaboration** : interagir et travailler avec les autres agents pour atteindre un but collectif commun.
- **Réactivité** : l'agent doit être capable d'agir sur son environnement à partir des entrées sensorielles qu'il reçoit de ce même environnement.

En effet, en se basant sur leurs comportements, on peut classer les agents en trois catégories :

- **Agent cognitif** : dispose d'une base de connaissances et de plans explicites qui lui permettent d'atteindre son objectif.
- **Agent réactif** : ne possède pas de représentation de son environnement mais agit selon le comportement stimulus/réponse et réagit à l'état actuel de son environnement. Ainsi, les agents réactifs sont plus rapides cependant ils ne prévoient pas l'effet de leur actions sur le comportement global et ne peuvent pas effectuer des tâches complexes.
- **Agent hybride** : c'est une architecture qui combine les avantages des agents cognitifs et ceux des agents réactifs. Ainsi, l'agent possède des composants réactifs et d'autres cognitifs afin d'optimiser son fonctionnement.

III.5.2. Définition d'un système multi-agents

Un système multi agent est un système composé d'un ensemble d'entités (appelés agents) qui interagissent entre elles à travers l'échange de leurs connaissances, buts, expériences et plans afin de résoudre des problèmes, incluant le problème de la

coordination inter agent lui-même. Généralement, un système multi-agents présente quelques caractéristiques :

- chaque agent a des informations ou des capacités de résolution de problèmes limitées, ainsi il a un point de vue partiel.
- il n'y a aucun contrôle global du système multi agent.
- les données sont décentralisées.
- le calcul est asynchrone.

Le système multi-agent est plongé dans un environnement qui peut être l'environnement géographique, social, informatique, etc., selon le système dont il s'agit et le but de la description. En ce sens, le système est entouré par plusieurs environnements, concrets ou abstraits, liés à différentes facettes du système. Cependant, les différentes significations sont regroupées sous le vocable unique d'« environnement ».

L'organisation des agents est une autre facette du système. Il s'agit du cadre organisationnel qui fixe les rôles des agents dans le groupe et donc les règles d'interaction entre eux. Les modèles de sociétés humaines et animales ont largement influé sur les études dans ce domaine. Nous présentons donc quelques exemples d'organisation :

- Hiérarchie : un agent ou un groupe d'agents spécialisés s'occupe de la prise de décision et du contrôle dans chaque niveau de la hiérarchie. Las communications s'effectuent selon des communications verticales.
- Communauté d'experts : c'est une organisation plate où chaque agent est spécialisé dans un aspect particulier. Les interactions s'effectuent selon des règles d'ordre et de comportement. Afin de garder une cohérence globale, des ajustements mutuels se font sur les solutions de chaque agent.
- Marché : le contrôle est distribué sur les agents qui collaborent pour une tâche à travers des mécanismes d'appels d'offre et contrats.
- Communauté scientifique : c'est un modèle de communauté pluraliste où les solutions sont établies localement puis elles sont testées et raffinées par d'autres agents [Sycara,98].

La figure suivante présente les différents niveaux qui composent un système multi-agents

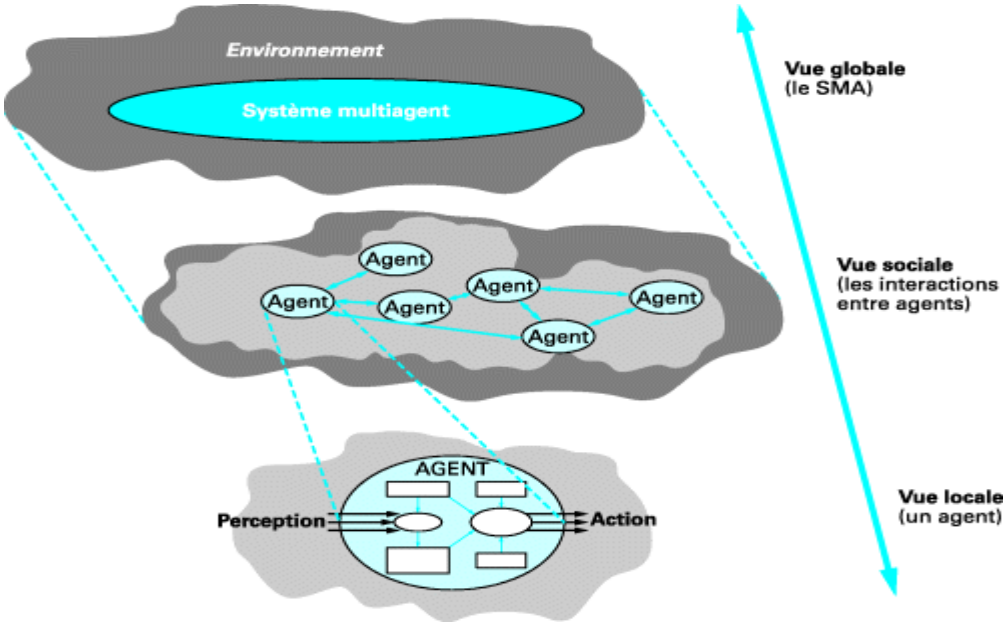


Figure III. 6 : Niveaux d'un système multi agent

III.5.3. Les systèmes multi-agents et l'Intelligence Artificielle

Les recherches dans le domaine de l'intelligence artificielle se focalisaient sur le développement des logiciels de simulation des capacités humaines comme le raisonnement et l'apprentissage. Les études se sont donc concentrées sur les propriétés du comportement et du raisonnement d'une entité cognitive unique. Le progrès de l'Intelligence Artificielle a engendré de plus amples intérêts vers des problèmes plus réalistes, plus complexes et de grande échelle qui dépassent les capacités, les connaissances et les ressources limitées d'un seul agent. En effet, si le domaine d'un problème est large, complexe ou imprévisible, il est judicieux de le décomposer en un nombre de fonctionnalités spécifiques et modulaires qui sont chacune responsable de la résolution d'un aspect bien déterminé du problème.

Ainsi l'Intelligence Artificielle Distribuée, sous-domaine de l'Intelligence Artificielle, s'est développée pour s'intéresser à une société d'agents interagissant dans le but de résoudre un problème commun ; une telle société est appelée système multi-agents.

III.5.4. Le système d'aide à la régulation proposé

III.5.4.1. Architecture globale du système

Le système proposé est un système multi-agent constitué par quatre agents (figure III.7) : agent INTERFACE(AI), agent HORIZON(AH), agent OPTIMISATEUR(AO) et agent EVALUATEUR(AE).

Les agents AI jouent le rôle d'interface entre les centres de régulation et le système. Les agents AH définissent et analysent les perturbations simultannées et chevauchantes et déterminent la zone de régulation conséquente. Si la perturbation est familière, l'agent AH récupère les solutions de la part de la base de données d'archivage (BDA) et l'envoie à l'agent AE pour les évaluer. Dans le cas contraire, l'agent AO s'occupe de la génération des nouvelles solutions et il communique avec l'agent AE pour l'évaluation. Il propose finalement, un ensemble de solutions de régulation. L'agent AE évalue chaque solution de régulation en fonction des critères considérés et transmet l'ensemble des solutions optimisées à l'agent AH. A chaque fois, l'agent AH récupère les solutions optimisées et les envoie à l'agent AI pour les afficher.

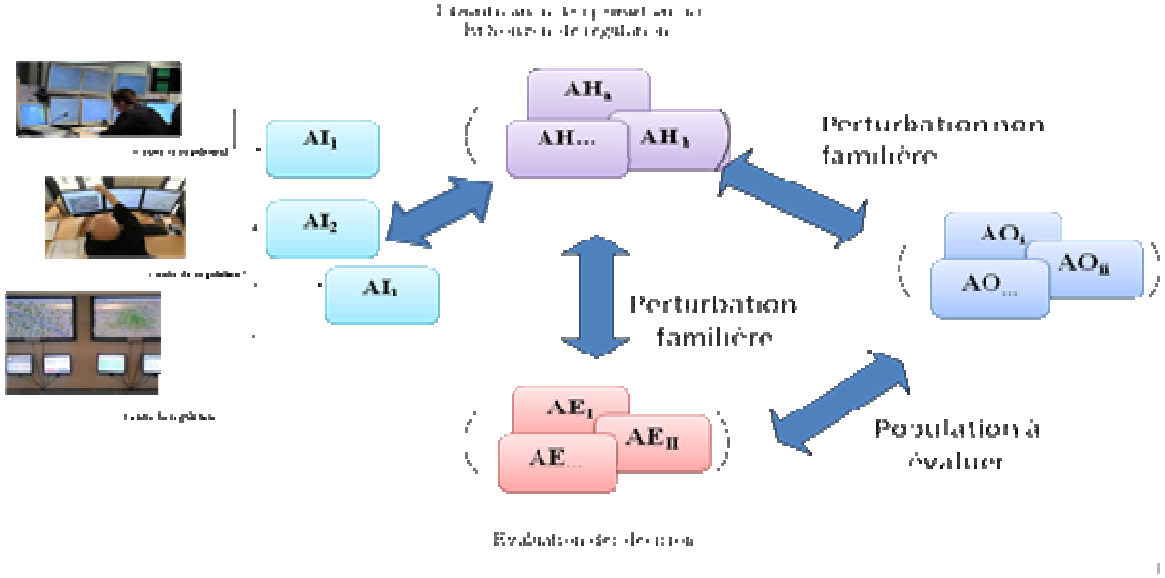


Figure III. 7 : Architecture du système

Ce système permet donc, d'interagir avec le régulateur en lui indiquant la zone de régulation, la liste des manœuvres qu'il peut effectuer et l'évaluation de chaque manœuvre choisie selon chaque critère pris à part et par une agrégation des critères par l'intégrale de Choquet dont les coefficients représentent ses préférences. Dans un premier lieu, nous pouvons considérer que le régulateur déclare la perturbation. Mais si nous mettons le système en contact avec le SAE utilisé par l'opérateur, nous pouvons améliorer notre système puisqu'il pourra détecter directement la présence de perturbations et même alerter le régulateur.

L'existence de chacun de ces agents dépend des perturbations sur les réseaux. En d'autres termes, s'il n'y a eu aucune perturbation pendant une assez longue période, qu'on appelle *période d'inactivité* et qu'on note par Δ_{∞}, alors aucun agent n'existe dans le système. A un instant *t*, l'existence d'une perturbation permet la création d'un agent AI et déclenche la création d'un agent AH, un agent AO et un agent AE.

On appelle les agents AH, AO et AE ainsi créés à l'instant t, la société d'agents P_t (figure III.8). Ensuite, et pendant une courte période de temps, qu'on appelle *période d'acquisition* et qu'on note par Δ_{ε}, chaque nouvelle perturbation identifiée par un nouvel agent AI, est gérée par la même société d'agents SA_t dont la création a été déclenchée par la première perturbation détectée à l'instant t.

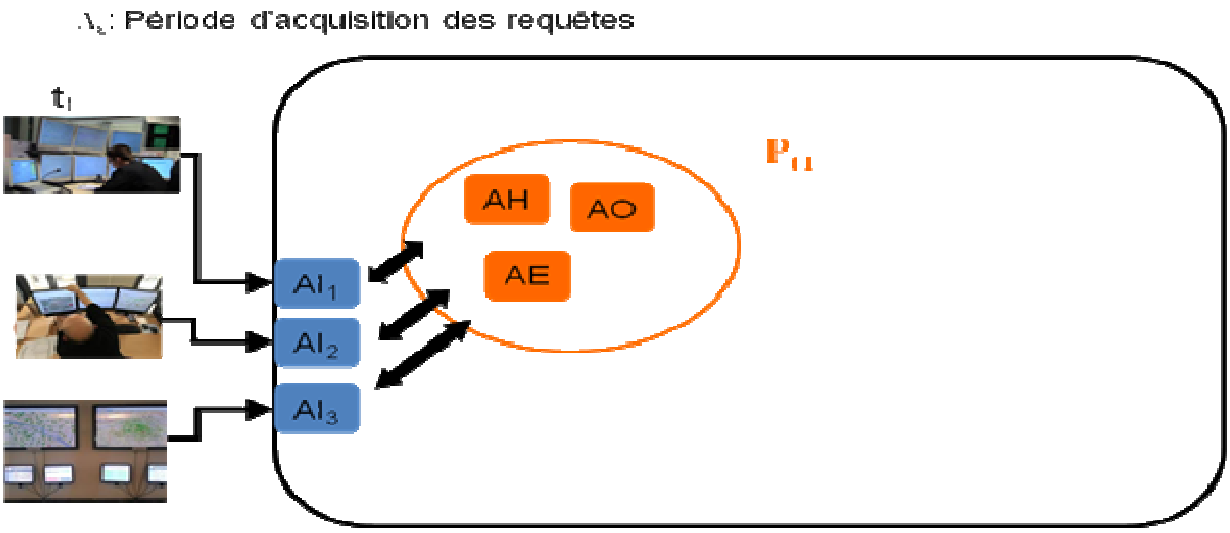
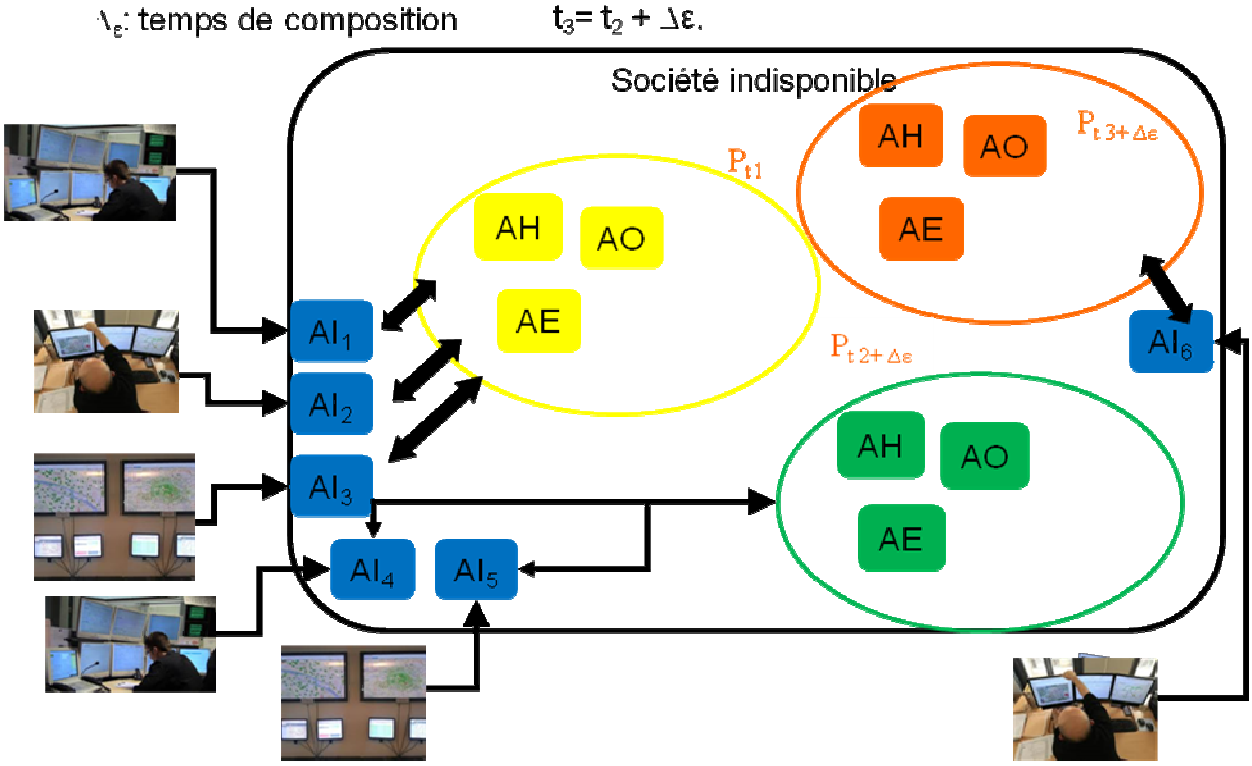


Figure III. 8 : Comportement dynamique du système: création d'une société d'agents initiale

Si à l'instant $t+\Delta_\varepsilon$, toutes les sociétés d'agents préalablement créées sont indisponibles, alors la détection de nouvelles perturbations déclenche la création d'une nouvelle société $P_{t+\Delta\varepsilon}$ et ainsi de suite. Dès qu'une société $P_{t\,i}$ créée à l'instant t_i, est disponible, elle devient prête à gérer un ensemble de perturbations détectées pendant une nouvelle période Δ_ε à un nouvel instant t_j avec $t_i \le t_j$, on appelle les perturbations détectées pendant la période Δ_ε, des perturbations $\Delta_\varepsilon -$ simultanées (Figure III.9). Cependant, dès que la disponibilité d'une société ou d'un agent AI atteint la période Δ_∞, alors cette société ou cet agent est automatiquement détruit.



<u>Figure III. 9</u> : Comportement dynamique du système: Création d'autres sociétés d'agents

La figure III.10 représente un diagramme de séquence qui illustre le comportement global du système pendant une période de détection Δ_ε. Cet exemple de scénario simplifié, exprimé par le diagramme de timing, montre les changements d'état d'une société P_{t2} créée à l'instant t_2 et deux agents interfaces, l'un créé au même moment que P_{t2} (AI_{21}) et l'autre a déjà été créé auparavant et n'est encore pas détruit (AI_1). D'après ce diagramme de timing, l'agent AI_{21} interagit avec la société SA_{t2} entre les instants t_3 et $t_3 + \Delta_\varepsilon$. L'agent AI_1 prend la relève et interagit avec P_{t2} entre les instants t_4 et $t_4 + \Delta_\varepsilon$ alors que l'agent AI_{21} se met en état d'attente pendant cet intervalle de temps. Cet agent s'éteint à l'instant $t_{3_1} + \Delta_\infty$ parce que son état d'attente a atteint la période d'inactivité Δ_∞. L'agent AI_1 est actif pendant les instants t_5 et $t_{3_1} + \Delta_\infty$, il interagit pendant cette période avec une société différente, autre que P_{t2} (disponible en état d'attente) qui n'a pas été intégrée dans

ce diagramme. L'interaction d'une société avec un agent AI est illustrée par le même diagramme de séquences de la figure III.10.

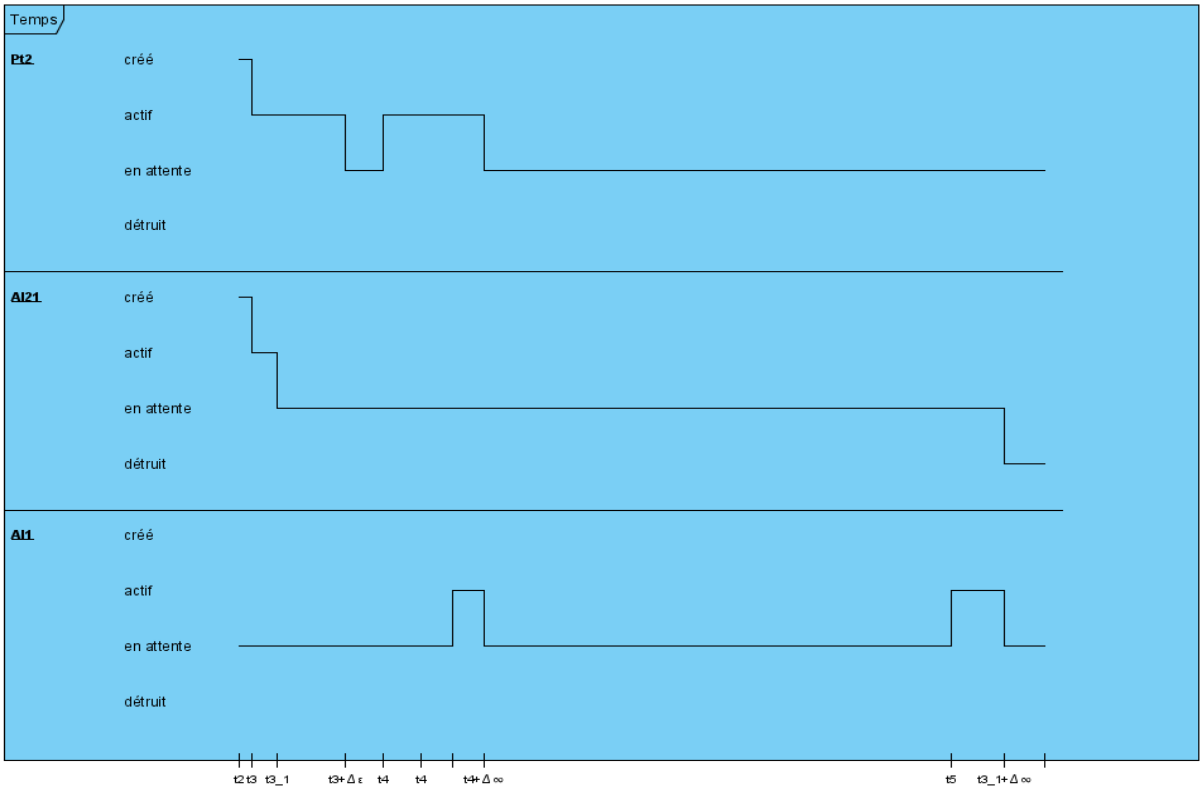


Figure III. 10 : Exemple de scénario de changement d'état d'une société

Le fonctionnement du système proposé nécessite l'intégration de bases de données locales.

II.5.4.2. Les bases de données locales

Pour commercialiser les services, un centre de régulation doit s'inscrire au système pour pouvoir enregistrer et par suite bénéficier des services proposés. Le fonctionnement du système nécessite l'existence de deux bases de données locales :

- La BDI (Base de Données d'Inscription): chaque centre de régulation, voulant consulter notre système, doit obligatoirement s'inscrire à cette base.

- La BDA (Base de Données d'Archivage) : Cette base va stocker les données des perturbations et les solutions utilisées par le système d'aide à la régulation. Le but de

cette méthode est d'éviter la recherche redondante des mêmes solutions lorsqu'on a une perturbation familière.

III.5.4.3. Diagrammes d'activité

III.5.4.3.1. L'agent INTERFACE

L'agent AI est l'intermédiaire entre le régulateur et les autres agents du système. Il permet de passer les perturbations déclarées par le régulateur dans un sens, vers l'agent AH et affiche dans l'autre sens, la liste des solutions optimisées ainsi que les évaluations des manœuvres dans l'autre sens. Le diagramme suivant présente l'activité de l'agent AI.

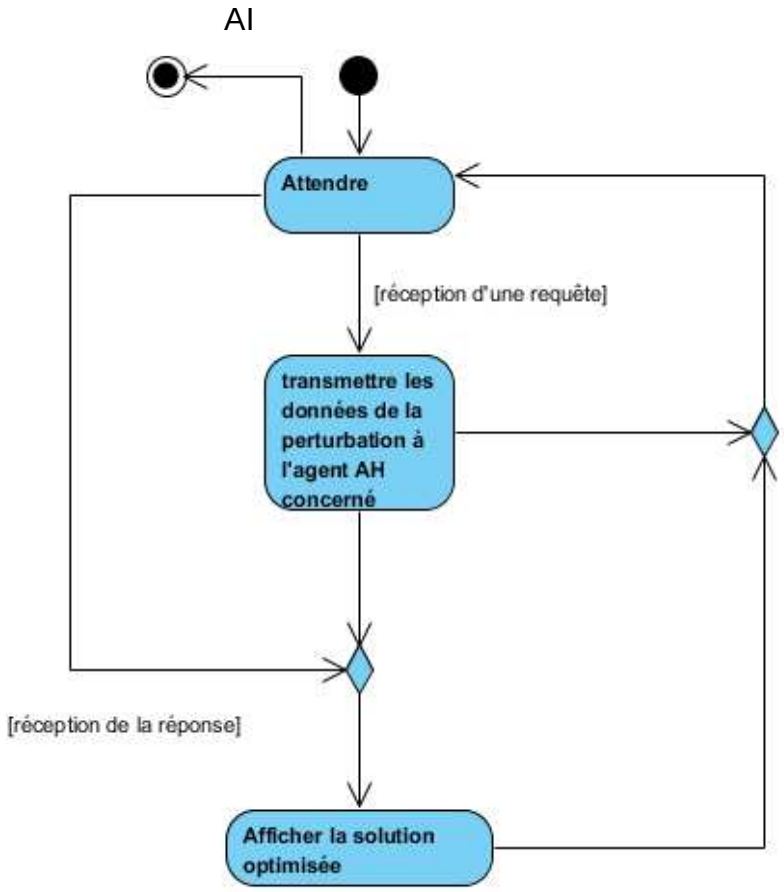


Figure III. 11 : Diagramme d'activités de l'agent INTERFACE

III.5.4.3.2. Agent HORIZON

Le rôle de l'agent AH est de déterminer tout d'abord, l'horizon de régulation relatif à chaque perturbation transmise par l'agent AI. Ensuite, il consulte la BDA pour savoir si la perturbation est familière ou non. Si elle est familière, la solution sera récupérée de la BDA et transmise vers l'agent AE. L'agent AE évalue la solution en fonction des nouveaux paramètres engendrés par la perturbation et la renvoie par la suite à l'agent AH qui la transmet à son tour à l'agent AI. Dans le cas contraire (perturbation non familière), l'agent AH envoie les données de perturbations vers l'agent AO afin de trouver une nouvelle solution. Cette dernière sera envoyée vers l'agent AE pour subir une évaluation multicritère.

En présence de plusieurs perturbations simultanées, l'agent AH calcule l'horizon relatif à chaque perturbation et détermine si elles sont séparées ou chevauchantes. Si elles sont séparées, il crée un agent AO pour chaque perturbation. Si les perturbations sont chevauchantes, il crée un agent AO commun qui propose un ensemble de stratégies optimales sur l'horizon de régulation global calculé. Le diagramme ci-dessous montre l'activité de l'agent AH.

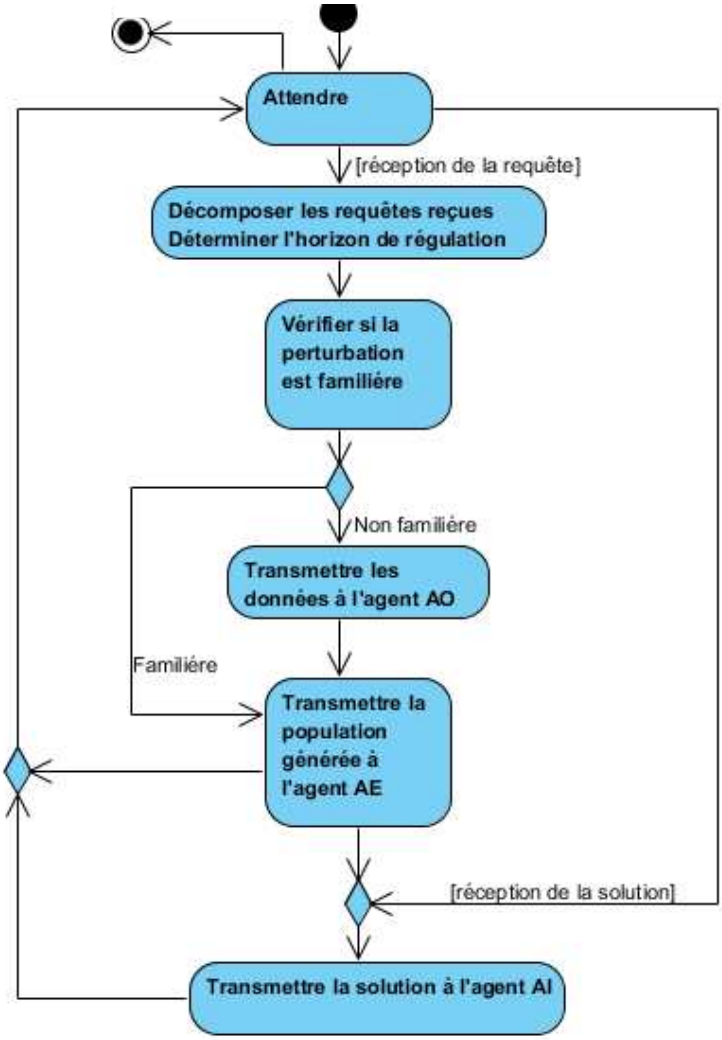


Figure III. 12 : Diagramme d'activités de l'agent HORIZON

III.5.4.2.3. Agent OPTIMISATEUR (AO)

Dès sa création, lorsque les perturbations ne sont pas familières, l'agent AO se charge de la résolution du problème d'optimisation lié aux perturbations concernées en appliquant à l'horizon de régulation H (résultant de plusieurs horizons), une méthode de type métaheuristique afin de retrouver le régime normal le plus rapidement possible. Les données reçues correspondent à un ensemble de lignes du réseau affecté, de critères à optimiser et de contraintes à respecter. D'abord, l'agent AO construit un chromosome adéquat contenant les décisions à entreprendre sur les véhicules aux arrêts considérés. Ensuite, il lance l'Algorithme Evolutionniste afin de chercher d'autres stratégies de régulation adéquates. En arrivant à l'étape de l'évaluation, l'agent AO envoie la population

des stratégies de régulation vers l'agent AE pour être évaluée. Enfin, la solution sélectionnée sera envoyée vers l'agent AH.

Le comportement d'un agent AO est illustré par le diagramme d'activité de la figure III.13.

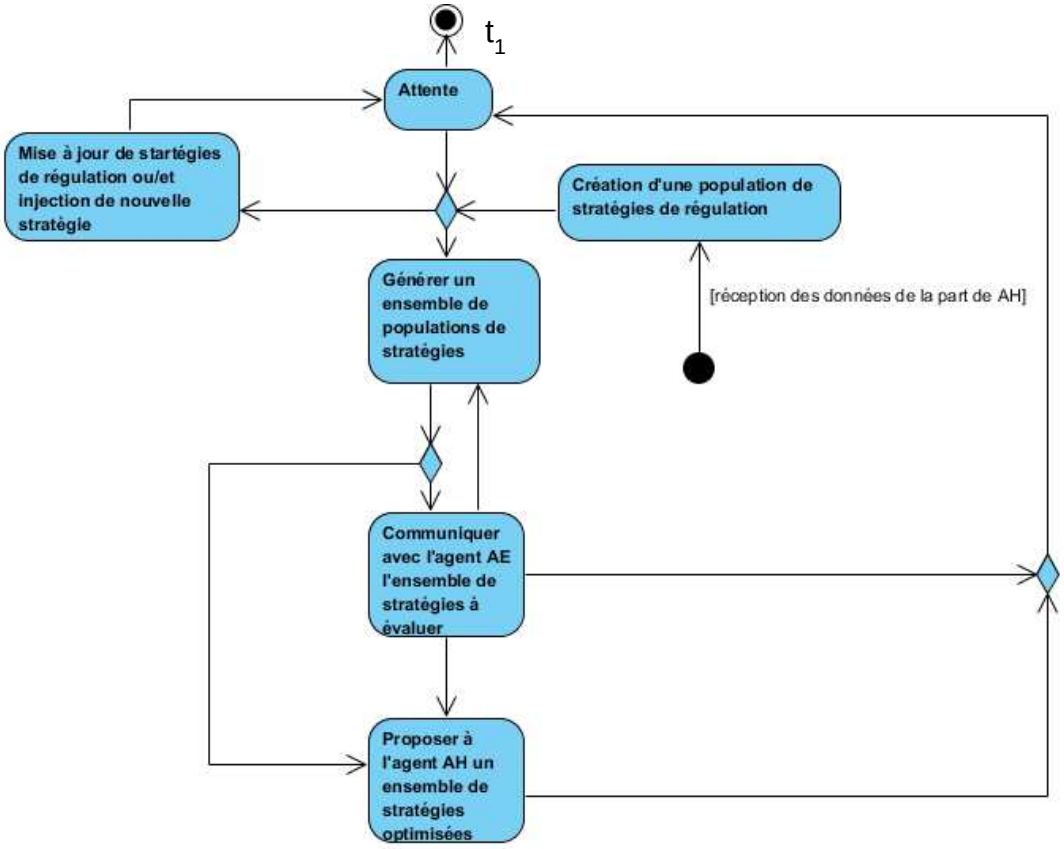


Figure III. 13 : Diagramme d'activités de l'agent OPTIMISATEUR

III.5.4.2.4. Agent EVALUATEUR

Le rôle de l'agent AE est d'évaluer en multicritère une ou plusieurs stratégies de régulation en utilisant une approche agrégative basée sur l'intégrale de Choquet. Il détermine la liste de choix des manœuvres que le régulateur peut effectuer en fonction de la nature de la perturbation et de l'horizon de régulation et la transmet à l'agent AH. Dans le cas où la manœuvre choisie est la régulation en ligne, l'agent AE applique l'approche évolutionniste sur l'horizon de régulation pour déterminer les meilleures modifications sur les durées de parcours et les temps de stationnement des véhicules concernés par la perturbation.

En outre, l'agent AE doit prendre en considération l'évolution de l'état du réseau et de la perturbation qu'il traite. Dans ce but, l'agent AH peut interrompre l'exécution de la tâche de l'agent AE pour lui indiquer la présence d'une nouvelle perturbation ou un changement dans les entités appartenant à l'horizon spatio-temporel de régulation. L'activité de l'agent AE est présentée par le diagramme suivant.

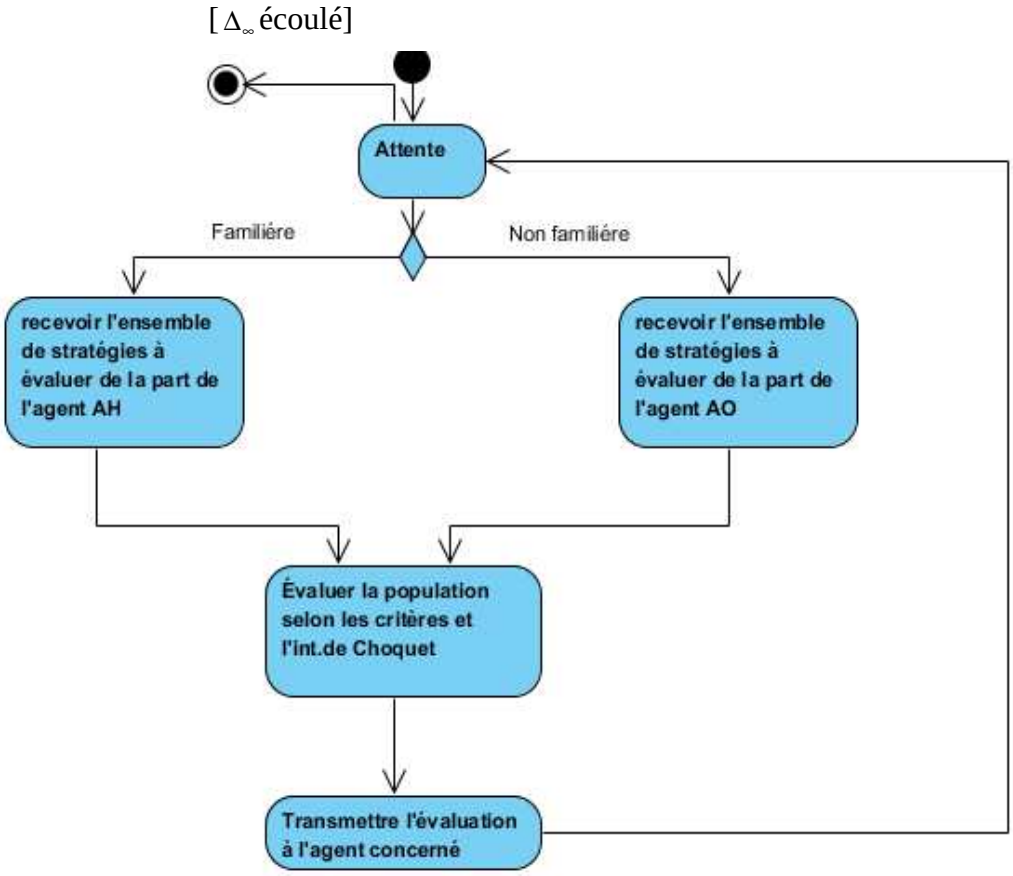


Figure III. 14 : Diagramme d'activités de l'agent EVALUATEUR

III.5.4.3. Diagramme de séquence : comportement global du système d'aide à la régulation proposé

Après avoir décrit les comportements individuels des différents agents de notre système, nous présentons une récapitulation des différentes interactions entre les entités du système afin de mieux saisir le processus de régulation. Dans ce but, nous illustrons le comportement du module de régulation du système par un diagramme de séquence en UML. Le diagramme de séquence exprime la structure dynamique de la modélisation.

Dans le cas d'une perturbation, nous distinguons, les opérations suivantes :

- Création AI : pour la déclaration des perturbations.
- Création AH : pour la détermination de la nature et l'horizon de chaque perturbation.
- Création AO : pour la régulation des situations non familières avec les algorithmes évolutionnistes.
- Création AE : pour l'évaluation des solutions.

Le comportement global est présenté par le diagramme suivant :

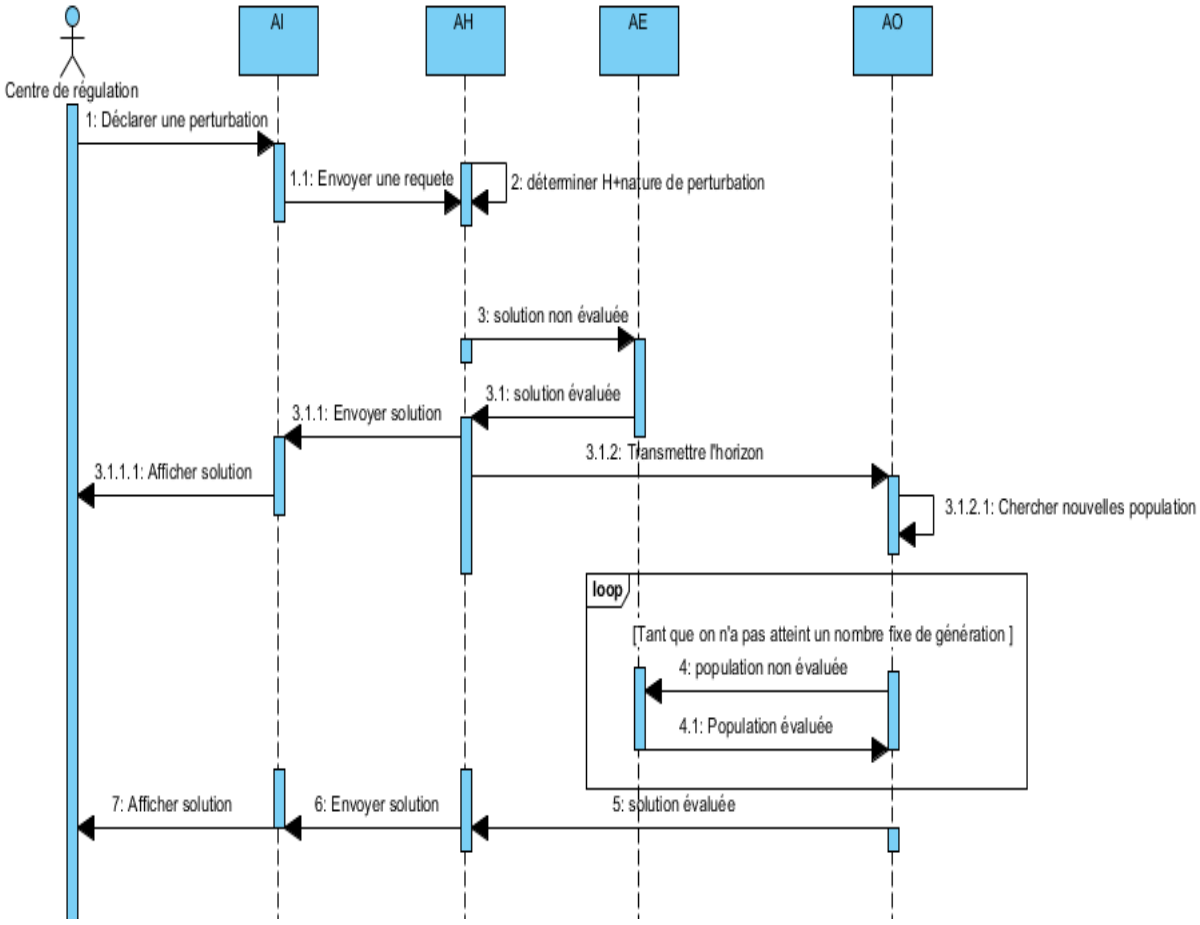
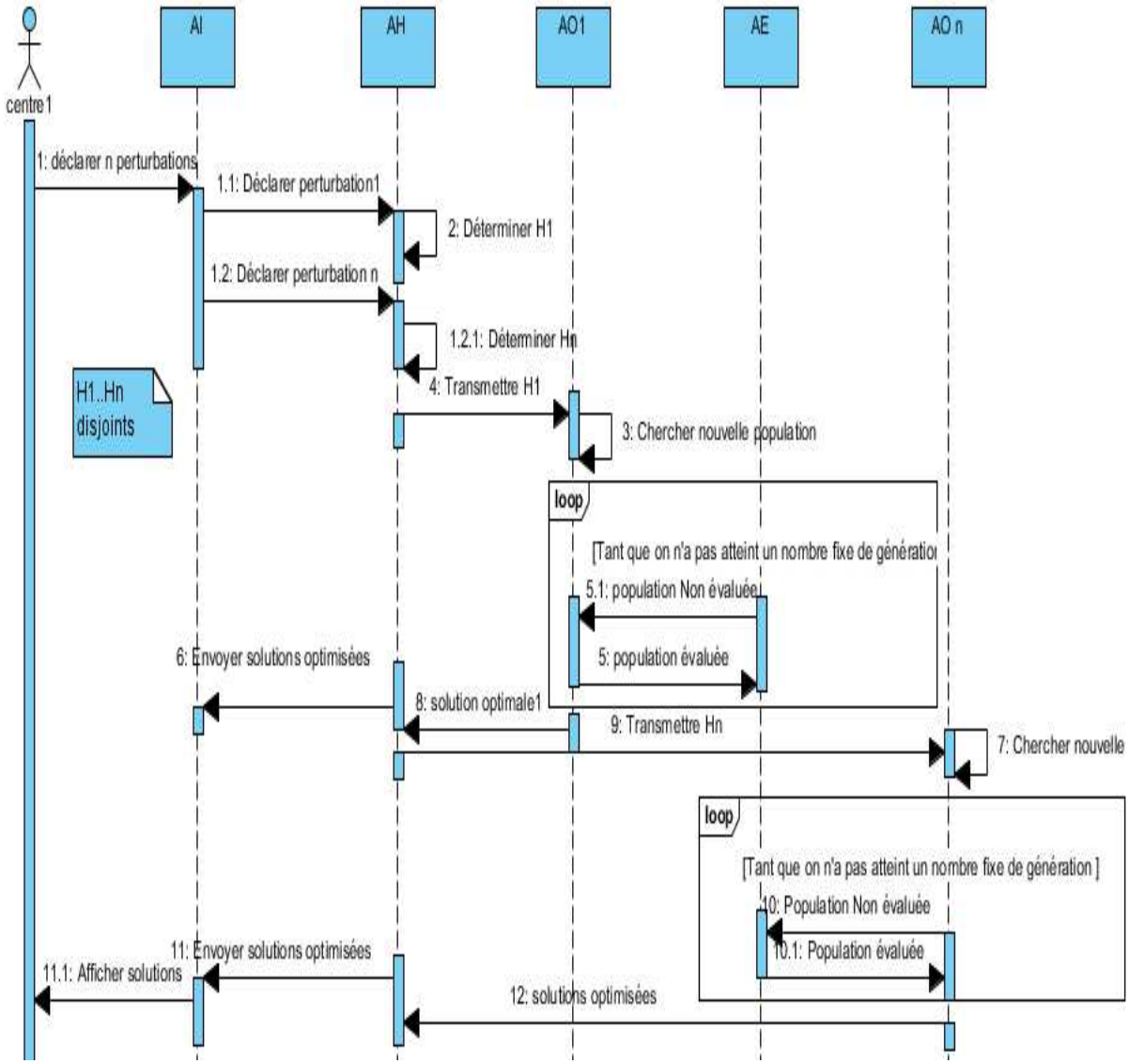


Figure III. 15 : Diagramme de séquence pour une seule perturbation

La présence de plusieurs perturbations simultanées et séparées provoque la création d'un agent AO pour chaque perturbation. D'où, le comportement du système est présenté par le diagramme ci-dessous :



<u>Figure III. 16</u> : Diagramme de séquence pour deux perturbations simultanées et séparées

Dans le cas ou les perturbations sont simultanées et chevauchantes, l'agent AH calcule l'horizon résultant qui englobe toutes les perturbations. Un seul agent AO sera crée pour gérer l'ensemble des perturbations. Le système fonctionne donc, comme suit :

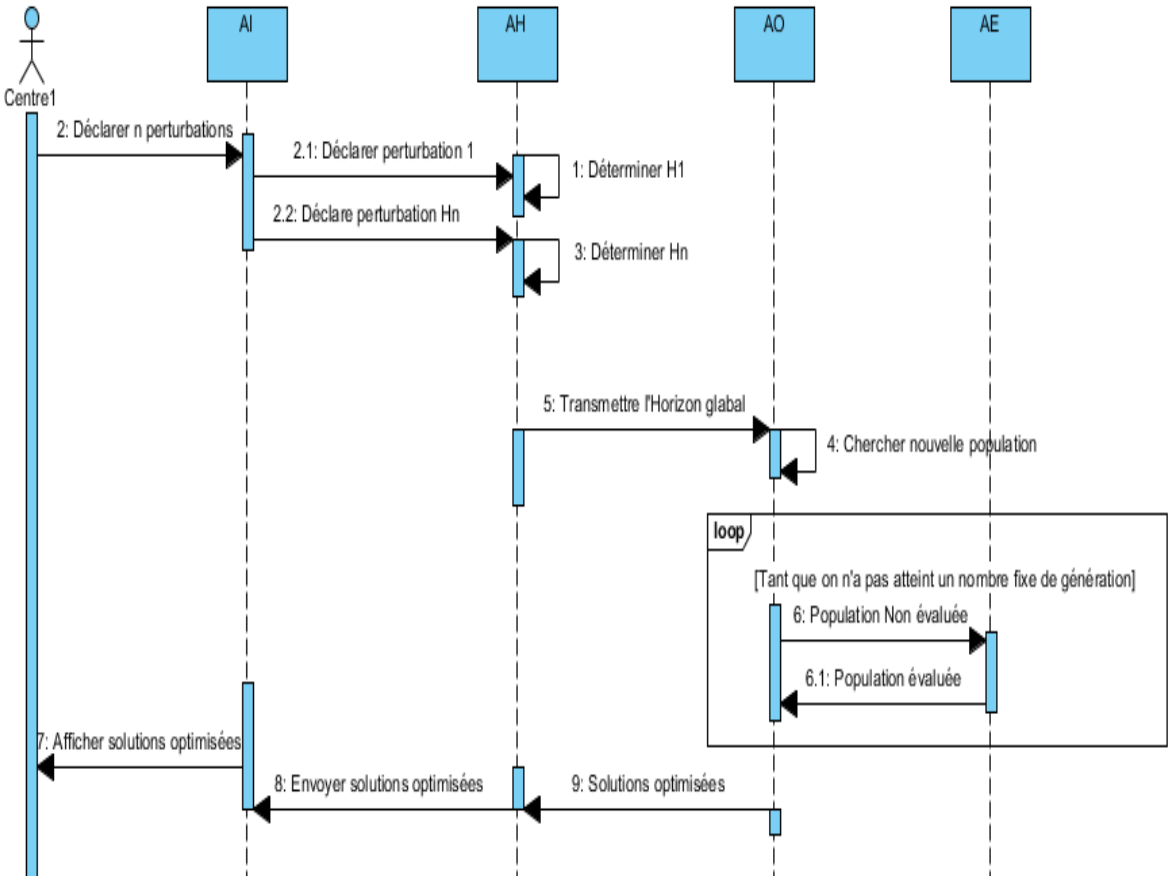


Figure III. 17 : Diagramme de séquence pour deux perturbations simultanées chevauchantes

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons explicité une formulation mathématique des variables de décision, des critères et des contraintes du problème d'optimisation lié à la régulation. Nous avons ensuite présenté les principales méthodes de modélisation des réseaux de transport multimodal. Enfin, nous avons établi une méthode pour la construction de l'horizon spatio-temporel de régulation en tenant compte des perturbations simultanées et chevauchantes. Cette méthode montre l'interaction entre les différents agents intervenant au niveau de notre système.

Dans le chapitre suivant, nous allons montrer l'intégration d'une approche évolutionniste à l'intérieur d'un agent AO et aussi l'intégration d'une approche agrégative basée sur l'intégrale de Choquet dans l'agent AE.

Chapitre IV : Approche évolutionniste proposée pour la régulation des réseaux de transport

IV.1. Introduction

Dans le troisième chapitre, nous avons modélisé le système d'aide à la régulation par une architecture agents et nous avons formulé mathématiquement les critères de régulation pour la résolution du problème d'optimisation. Nous avons ensuite élaboré, une conception du système d'aide à la décision basé sur cette architecture agents. Puis, nous avons défini le rôle de chaque agent ainsi que son comportement et nous avons explicité le fonctionnement global du système.

Dans ce chapitre, nous allons étudier en particulier, les tâches de l'agent optimisateur et de l'agent évaluateur et leur interaction. Pour cela, nous avons choisi d'intégrer dans l'agent optimisateur, une approche évolutionniste (une métaheuristique) et intégrer une approche agrégative basée sur l'intégral de Choquet dans l'agent évaluateur. Après une brève présentation de l'état de l'art sur les métaheuristiques, nous présentons une étude détaillée de ces deux approches.

IV.2. Les métaheuristiques

Les méthodes métaheuristiques sont apparues à partir des années 1980, avec un objectif commun : résoudre au mieux les problèmes d'optimisation difficiles. Nous pouvons distinguer trois classes différentes de métaheuristiques :

- Les méthodes déterministes de recherche d'optimum local : Ces méthodes convergent rapidement mais, la plupart du temps, elles ne trouvent pas l'optimum global. Elles se contentent de trouver un optimum local et ne reposent pas sur un processus stochastique pour la recherche de l'optimum.

- Les méthodes déterministes de recherche d'optimum global : Ces méthodes permettent de trouver un optimum global rapidement et ne reposent pas sur un processus stochastique pour la recherche de l'optimum.

- Les méthodes stochastiques de recherche de l'optimum global : Ces méthodes reposent sur un processus stochastique chargé d'effectuer la recherche de l'optimum. Elles sont moins rapides que les méthodes déterministes, mais elles peuvent trouver un optimum global difficile à atteindre.

Les méthodes métaheuristiques regroupent entre autres le recuit simulé, la recherche Tabou, les algorithmes à colonies de fourmis et les algorithmes évolutionnistes. Ces méthodes font partie des méthodes stochastiques de recherche de l'optimum global.

IV.2.1. Recuit simulé

Cette méthode a été proposée par des chercheurs d'IBM qui étudiaient les verres de spin. Elle s'inspire d'un processus métallurgique appelé le recuit [Kirkpatrick 83]. En effet, pour qu'un métal retrouve une structure proche du cristal parfait (l'état cristallin correspond au minimum d'énergie de la structure atomique du métal), on porte celui-ci à une température élevée, puis on le laisse refroidir lentement de manière à ce que les atomes aient le temps de s'ordonner régulièrement. Ce processus métallurgique a été transposé à l'optimisation et a donné une méthode simple et efficace. Cette méthode considère une solution initiale et recherche dans son voisinage une autre solution de façon aléatoire. L'originalité de cette méthode est qu'il est possible de se diriger vers une solution voisine de moins bonne qualité avec une probabilité non nulle. Ceci permet d'échapper aux optima locaux. Au début de l'algorithme, un paramètre T, apparenté à la température, est déterminé et décroît tout au long de l'algorithme pour tendre vers 0. De la valeur de ce paramètre dépendra la probabilité d'acceptation des solutions dégradantes (c'est-à-dire de moins bonne qualité), en fait plus la température est élevée, plus cette probabilité sera forte.

IV.2.2. Recherche Tabou

La recherche Tabou (Tabou Search) a été introduite par [Glover 86]. Ses idées de base ont été aussi évoquées dans le travail de Hansen [Hansen 86]. Cette méthode a montré ses performances sur de nombreux problèmes d'optimisation multiobjectif. Elle peut n'avoir aucun caractère stochastique et utilise la notion de mémoire humaine pour éviter de tomber dans un optimum local [Basseur 05].

Le principe de l'algorithme est le suivant : à chaque itération, le voisinage (complet ou sous-ensemble de voisinage) de la solution courante est examiné et la meilleure solution est sélectionnée, même si elle est moins bonne que la solution courante. Afin d'éviter le phénomène de cyclage entre plusieurs solutions, la méthode interdit les mouvements

aboutissant à une solution récemment visitée. Pour cela, une liste taboue contenant les attributs des dernières solutions visitées est mise à jour au fur et à mesure des itérations.

Chaque nouvelle solution considérée enlève de cette liste la solution la plus anciennement visitée. Ainsi, la recherche de la solution courante suivante se fait dans le voisinage de la solution courante actuelle sans considérer les solutions appartenant à la liste taboue. En appliquant ce principe, la méthode autorise de remonter vers des solutions qui semblent moins intéressantes mais qui ont peut être un meilleur voisinage. Afin d'augmenter l'efficacité de cette méthode, on l'utilise souvent de manière complémentaire avec des mécanismes de diversification, d'intensification ou d'aspiration [Barichard 04].

IV.2.3. Algorithme à colonies de fourmis (ACF)

Le comportement des insectes sociaux est caractérisé par l'auto-organisation : trouver une solution collective en se basant sur des interactions simples entre les individus. Les fourmis utilisent une substance chimique appelée phéromone. A l'aide de ce moyen de communication limité, une intelligence collective apparait. Le comportement naturel des fourmis a inspiré « les algorithmes à colonies de fourmis » inventés par Marco Dorigo en 1992.

IV.2.3.1 Principe de l'algorithme

Au début, on a un ensemble de stations et de routes dans la zone perturbée. On ajoute entre chaque liaison entre deux stations un ensemble d'arcs fictifs (figure IV.1) qui n'ont aucune existence physique mais qui correspondent à des retards.

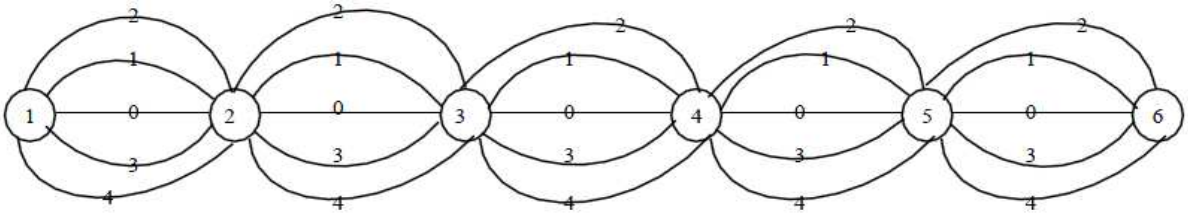


Figure IV. 1 : Graphe de décisions de la régulation

Chaque fourmi se déplace d'une station à une autre en ajoutant un arc à son chemin jusqu'à ce qu'elle atteigne le terminus, ensuite elle recommence de la station de départ pour un autre véhicule jusqu'à la fin des véhicules de la zone perturbée.

IV.2.3.2. La fonction coût

La fonction coût est relative aux critères qu'il faut optimiser qui sont le temps de parcours $T_{i,}$ la distance parcourue D_i à minimiser et la charge C_i à maximiser. On peut transformer le problème multicritère en agrégeant les deux critères à minimiser : le temps de parcours par la charge et la distance parcourue par la charge. Le coût de l'arc *i* est alors :

$$Cout_i = a \times \left(\frac{T_i}{C_i} \right) + b \times \left(\frac{D_i}{C_i} \right) \qquad (1)$$

Avec *a* et *b* le poids de chaque critère.

IV.2.3.3. Génération d'une solution

Dans une station *s* et avec une probabilité *P*, une fourmi choisit un arc avec la probabilité

$$P_1 = \begin{cases} \frac{1}{k} & sii \in \Omega_s \ et \ i \notin Tabou_f \\ 0 & sinon \end{cases} \qquad (2)$$

Avec la probabilité *1-P*, la fourmi utilise la deuxième méthode, qui est plus intelligente que la première puisqu'elle prend en considération le taux de phéromone, et elle choisit un arc selon la probabilité P_2 :

$$P_2 = \begin{cases} \dfrac{[\tau_i(t)]^{\alpha} \left[\frac{1}{T_i} \right]^{\beta} \left[\frac{1}{D_i} \right]^{\gamma} [C_i]^{\delta}}{\sum_{j=1}^{k} [\tau_j(t)]^{\alpha} \left[\frac{1}{T_j} \right]^{\beta} \left[\frac{1}{D_j} \right]^{\gamma} [C_j]^{\delta}} & sii \in \Omega_s \\ 0 & sinon \end{cases} \qquad (3)$$

Où Ω_s est l'ensemble des arcs qui ont la station *s* comme station de départ et α,β,γ,δ sont les poids respectivement de phéromone, temps de parcours, distance de parcours et charge.

IV.2.3.3. Mise à jour de la quantité de phéromone

Par analogie à la nature, chaque fourmi *f* laisse une quantité de phéromone dans chaque arc qu'elle choisit. La mise à jour renforce les arcs choisis en prenant en considération l'évaporation. Elle est représentée par l'équation

$$\tau_i(t+1) = \rho\tau_i(t) + \sum_f \Delta\tau^f$$

Où ρ est un terme de persistance et $\Delta\tau^f$ est un terme de renforcement qui représente la quantité ajoutée par la fourmi *f*.

$\Delta\tau^f(t)$ est la quantité de phéromone ajoutée par la fourmi *f* sur l'arc *i* à l'itération *t*.

$$\Delta\tau_i^f(t) = \begin{cases} \dfrac{1}{cout^f(t)} & si\ i \in tabou_f \\ 0 & sinon \end{cases} \qquad (4)$$

IV.2.3.4. ACF pour la reconfiguration spatiale (ACFRS)

L'algorithme ACFRS commence par initialiser la quantité de phéromone dans chaque arc en attribuant la même valeur, différente de zéro, pour tous les arcs. Ensuite, chaque fourmi se déplace d'un arc à un autre pour construire sa propre solution. Afin d'éviter de passer deux fois par le même arc, la fourmi utilise une sorte de mémoire dans laquelle elle stocke les arcs qu'elle a empruntés dans une liste taboue notée $Tabou_f$.

Lorsque toutes les fourmis ont terminé, on évolue les solutions pour mettre à jour le niveau de phéromone dans chaque arc selon la méthode mentionnée dans le paragraphe précédent. On réitère cette procédure jusqu' à ce qu'on atteigne la convergence ou un nombre maximal (I_{max}) d'itérations est atteint. L'algorithme converge lorsque la meilleure solution trouvée ne change pas après un nombre (I_{max}) d'itérations.

Après ce premier test, on trie les solutions et on garde celle qui présente le coût minimum comme première solution. Puis, on recommence une deuxième étape de recherche en essayant d'éviter de retomber sur la première solution. Après avoir obtenu la deuxième solution, on la compare à la première et on garde la meilleure. Cette deuxième solution permet de contourner le problème d'optimum local.

Dans le domaine de transport, on représente le graphe concerné par la reconfiguration par un tableau, chaque colonne contient les informations relatives à un arc : sa station de départ, la station d'arrivé, le coût et la quantité de phéromone sur cet arc.

IV.2.3.5. ACF pour la régulation des horaires(ACFRH)

Les perturbations entrainent des variations sur les horaires de passage des véhicules par les stations initialement établis par le tableau de marche théorique (TMT), on obtient ainsi un tableau de marche perturbé (TMP) qu'on doit réguler afin d'optimiser l'utilisation du réseau de transport.

La régulation des horaires peut être effectuée en premier lieu ou bien après une reconfiguration du réseau. Les modifications concernent le temps d'arrêt dans les stations ou bien le temps de parcours inter-stations. [ZIDI 07]

L'algorithme à colonie de fourmis a montré son efficacité pour la reconfiguration et la régulation des réseaux de transport multimodaux. Cependant, pour les problèmes de grande dimension où l'espace de recherche est important, cet algorithme présente des problèmes de convergence.

IV.2.4. L'approche évolutionniste

Les Algorithmes Evolutionnistes sont des métaheuristiques basées sur des métaphores biologiques inspirées des mécanismes d'évolution darwinienne et de la génétique moderne. En vue d'imiter les processus d'évolution observés dans la nature, la première adaptation des premières approches évolutionnistes, à travers les algorithmes génétiques, aux problèmes d'optimisation combinatoire a été réalisée par Holland, dans les années 70 [Holland 92]. Les algorithmes génétiques ont été ensuite développés par d'autres chercheurs comme [Goldberg 89], [Davis 91], [Michalewicz 94]…. Depuis, d'autres variantes de ces algorithmes ont été aussi développées telles que les algorithmes à stratégie d'évolution [Schwefel & al. 97], la programmation génétique [Koza, 98] et la programmation évolutionniste [Fogel 94], [Bounsaythip 98].

Les algorithmes évolutionnistes sont des algorithmes itératifs de recherche globale, fondés sur une analogie avec le monde biologique. En effet, pour un problème donné, une solution est un **individu** et un ensemble de solutions correspond à une **population** d'individus. Chaque individu possède une empreinte génétique, appelée **chromosome**, et chaque chromosome est constitué d'un ensemble de caractéristiques, les **gènes**.

Les métaheuristiques ont en commun les caractéristiques suivantes : elles sont, au moins pour partie, stochastiques ce qui leur permet de faire face à l'explosion combinatoire des possibilités. Elles sont d'origine combinatoire mais elles ont l'avantage dans le cas continu, d'être directes, c'est-à-dire qu'elles ne recourent pas au calcul, souvent problématique, des gradients de la fonction objectif [Collette 02]. Elles sont inspirées par des analogies : avec la physique, la biologie, ou encore l'éthologie. Elles sont capables de guider, dans une tâche particulière, une autre méthode de recherche spécialisée. Les métaheuristiques partagent aussi les mêmes inconvénients par exemple la difficulté de réglage des paramètres de chacune d'entre elles.

Dans notre travail, nous avons choisi d'intégrer dans l'agent optimisateur, l'approche évolutionniste.

IV.3. Présentation de l'approche évolutionniste

IV.3.1. Principe général

Le principe de l'approche évolutionniste est de reproduire l'évolution naturelle d'individus, génération après génération, en respectant les lois de l'hérédité et le concept de sélection naturelle, autrement dit, la survie de l'individu le plus fort ou le mieux adapté à l'environnement. Cette évolution se fait avec un échange structuré mais aussi aléatoire d'informations entre les individus, en vue de reproduire de nouveaux éléments qui sont meilleurs au sens du critère choisi, c'est à dire, au sens de la fonction objectif à optimiser [Goldberg 89]. Cette fonction est appelée fonction coût, fonction d'adéquation ou « fitness ».

L'algorithme vise alors à chercher la meilleure combinaison des individus de la population selon la fonction d'adéquation choisie. On crée ainsi à chaque itération ou

génération une nouvelle population qui est généralement formée des meilleurs éléments. La création des nouvelles populations se fait par **combinaison** de certains individus à l'aide d'opérateurs de **croisement** et aussi par modification pseudo-aléatoire de leurs empreintes génétiques via l'opérateur de **mutation**. Au fur et à mesure des générations, les individus vont tendre, en général, vers l'optimum de la fonction coût [Mesghouni 99] et [Renders 95].

IV.3.2. Architecture de l'algorithme évolutionniste

Un algorithme évolutionniste possède une architecture bien définie qui passe par les étapes suivantes :

- ***Genèse*** : constitution aléatoire de la première génération
- ***Evaluation*** : calcul de la fonction coût pour chaque individu
- ***Sélection*** : choix des meilleurs éléments pour la constitution de la nouvelle génération
- ***Recombinaison et mutation*** : construction d'une nouvelle génération à l'aide des opérateurs de croisement et mutation effectués sur les individus sélectionnés dans l'étape précédente.
- ***Arrêt*** : test d'efficacité de l'algorithme à travers une valeur de la fonction objectif à atteindre, le nombre d'itérations ou un temps d'exécution. La solution courante est prise quand ce test est vérifié ; sinon, les étapes sont recommencées à partir de l'évaluation.

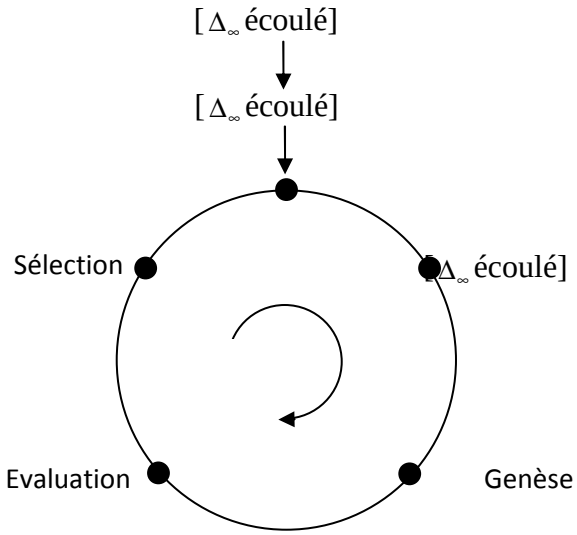


Figure IV. 2 : Architecture générale d'un algorithme évolutionniste

IV.3.3. Mise en œuvre d'un algorithme évolutionniste

La mise en œuvre d'un algorithme évolutionniste nécessite des étapes de conception et de choix de paramètres tels que le codage des solutions, l'opérateur de sélection et les opérateurs de croisement et mutation.

- **Choix d'un codage**

Un codage consiste à une représentation génétique des solutions. Il peut être direct si on a une application bijective entre l'ensemble des solutions et celui des chromosomes, indirect lorsqu'on utilise un générateur pour associer une solution à un chromosome ou mixte lorsqu'il combine les deux types.

- **Opérateur de sélection**

La sélection est le choix des individus qui vont survivre et reproduire une nouvelle génération. Elle se base sur la valeur de la fonction coût de chaque individu. Donc, le rôle de la sélection est primordial pour la performance et la qualité de la génération suivante.

On distingue deux types de sélection :

- Une sélection déterministe qui garde que les meilleurs individus qui ont les meilleures valeurs de la fonction coût.

- Une sélection stochastique qui consiste à attribuer une probabilité de sélection pour chaque individu proportionnelle à sa fonction coût. Cette méthode permet une meilleure exploration de l'espace de recherche et évite de converger prématurément.

L'inconvénient de la sélection réside dans le choix exclusif des meilleurs individus de la population au détriment de la diversité des solutions. L'algorithme risque ainsi de converger prématurément. Pour avoir une bonne exploration de l'espace de recherche, des opérateurs de croisement et de mutation sont appliqués aux individus sélectionnés pour en créer des nouveaux.

- **Opérateur de croisement**

Le croisement est une étape de recombinaison essentielle de l'algorithme évolutionniste car il permet l'exploration de l'espace de recherche. Une fois la population intermédiaire déterminée, les individus sont aléatoirement répartis en couples. Les chromosomes sont alors copiés et recombinés de façon à former deux descendants possédant des caractéristiques issues des deux parents. On forme ainsi la génération suivante.

L'opérateur de croisement opère avec une probabilité p_c, fixée selon le problème concerné. Plus ce taux est élevé, plus il y a de nouvelles structures qui apparaissent dans la population. Mais, s'il est trop élevé, les bonnes solutions risquent d'être cassées trop vite par rapport à l'amélioration que peut apporter la sélection. D'autre part, si le taux de croisement est très faible, la recherche risque de stagner à cause du faible taux d'exploration.

Les méthodes de croisement les plus utilisées sont le croisement à un point, le croisement multi-points et le croisement uniforme.

- **Croisement à un point** : il s'agit de choisir au hasard, un point de croisement pour chaque couple de chromosomes et d'effectuer un échange des ensembles d'allèles se trouvant de part et d'autre de ce point entre les deux parents.

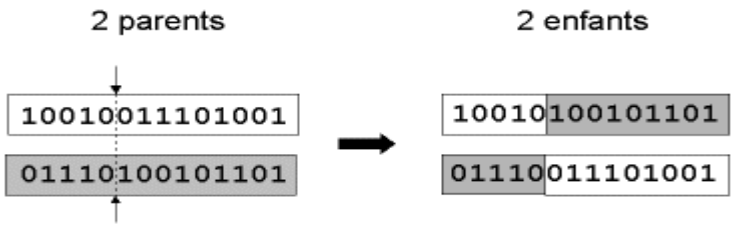


Figure IV. 3 : Exemple d'un croisement à un point

- **Croisement multi-points** : dans ce cas, plusieurs points de croisement sont sélectionnés et il y a un échange des différentes parties d'allèles cernées par ces points, entre les parents. La figure IV.4 illustre un croisement à deux points.

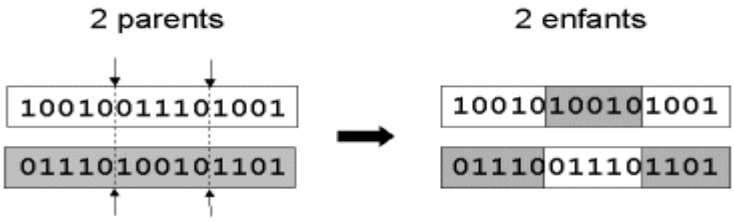


Figure IV. 4 : Exemple d'un croisement à deux points

- **Croisement uniforme** : il opère à l'aide d'un masque qui représente les tirages aléatoires pour décider de la transmission de la valeur de l'allèle à l'un ou l'autre des descendants. Si, à la même position que l'allèle, la valeur du masque est égale à 1, l'allèle du parent 1 passe à celui de l'enfant 1 et l'allèle du parent 2 passe à l'enfant 2. Sinon, c'est l'inverse qui se produit.

Parent 1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0
Parent 2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1
Masque	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0
Enfant 1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1
Enfant 2	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0

Figure IV. 5 : Exemple de croisement uniforme

- **Opérateur de mutation**

La mutation est définie comme étant la modification aléatoire de la valeur d'un allèle dans un chromosome. La figure IV.6 illustre un exemple de mutation appliquée à la position 9 d'un chromosome binaire. Elle joue le rôle de bruit et empêche l'évolution de se figer et garantit que l'optimum global peut être atteint. Cet opérateur évite donc une convergence prématurée vers les optimums locaux. Il est appliqué avec une probabilité fixée, p_m. Le taux de mutation rend la recherche trop aléatoire s'il est trop élevé. Par ailleurs, s'il est trop faible, la recherche risque de stagner.

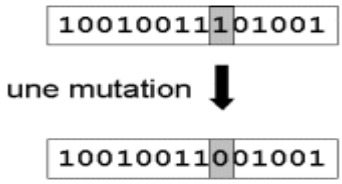


Figure IV. 6 : Exemple de mutation

Il existe d'autres façons d'effectuer des mutations :

- transposition de deux allèles consécutifs,
- transposition d'allèles dans un chromosome,
- inversion de l'ordre des allèles présents entre deux coupes.

Il est aussi possible d'associer une probabilité de mutation différente à chaque gène, selon le principe de l'auto-adaptation, où chaque variable est soumise au processus d'évolution. L'individu possède ainsi un second chromosome codant ces probabilités.

IV.3.4. Caractéristiques des algorithmes évolutionnistes

Les algorithmes évolutionnistes sont capables de s'adapter à n'importe quel espace de recherche. Grâce à leur caractère modulaire, ces algorithmes ont une indépendance presque totale du problème à optimiser. Ils demandent une mesure de la qualité de la solution et nécessitent la définition de l'espace par un codage et des opérateurs qui lui permettent de le parcourir efficacement.

Le principal avantage des algorithmes évolutionnistes par rapport aux autres techniques d'optimisation (énumératives, « hill-climbing », etc.) consiste en une combinaison de :

- l'exploration de l'espace de recherche, basée sur des paramètres aléatoires, grâce à une recherche parallèle,
- l'exploitation des meilleures solutions disponibles à un moment donné.

Néanmoins, comme pour les méthodes par voisinage, il faut tenir compte des spécificités du problème pour concevoir ou choisir le codage et les opérateurs les plus adéquats. En outre, il est nécessaire d'effectuer plusieurs expérimentations pour ajuster les paramètres de l'algorithme (taille de la population, probabilités de croisement et de mutation, nombre de générations, etc.), ce qui constitue un des inconvénients des algorithmes évolutionnistes.

IV.3.5. Application des algorithmes évolutionnistes dans le domaine du transport

Grâce à leurs différents avantages liés à la résolution des problèmes d'optimisation combinatoire, les algorithmes évolutionnistes ont connu un réel développement dans le domaine de l'ordonnancement en général et dans l'ordonnancement des systèmes de production en particulier. En effet, [Pierreval & al, 03] présente une étude des différentes approches évolutionnistes dans l'organisation de la production cellulaire et la conception des ateliers de production et des systèmes d'assemblage. [Caux & al, 94] présente également les applications des algorithmes génétiques aux problèmes d'ordonnancement. Aussi, ces algorithmes ont été utilisés pour la résolution des problèmes du voyageur de commerce (PVC), de tournée de véhicules et aussi de contrôle du trafic aérien.

En ce qui concerne le contrôle du trafic aérien, [Delahaye & al, 96] traite, à travers des approches génétiques, trois problématiques liées à :

- La résolution des conflits des trajectoires entre les avions par le respect des trajectoires optimales en vue de garder une distance de séparation conforme à une norme fixée.
- La division du réseau aérien, considéré comme un espace bidimensionnel, en des secteurs équilibrés en terme de charge de travail liée au nombre d'avions et de conflits, tout en minimisant le travail de coordination.

- L’affectation du trafic entre les secteurs en minimisant les augmentations des distances parcourues et la charge de travail des responsables des secteurs.

[Ciesielski & al, 98] et [Stevens, 95] présentent une approche évolutionniste pour l’ordonnancement des temps d’atterrissage des avions sur un nombre limité de pistes. Selon [Ciesielski & al, 98], le codage correspondant illustre pour chaque avion, la piste sur laquelle il devrait atterrir et le temps de l’atterrissage (en nombre de périodes de 30 secondes) suivant l’heure courante. La figure IV.7 présente un exemple pour ce codage. Nous pouvons alors déduire que l’avion 1 va atterrir à 12:00 sur piste 0, que l’avion 2 va atterrir à 12:03 sur piste 1, que l’horaire d’atterrissage de l’avion 3 est de 12:04:30 sur piste 0, etc.

1		**2**		**3**		**4**		…	
0	0	6	1	9	0	12	0	...	...

Figure IV. 7 : Exemple de codage de l’ordonnancement des atterrissages

La particularité de l’approche proposée par [Ciesielski et al.98] réside dans le caractère « anytime » de l’algorithme évolutionniste. En effet, l’ordonnancement des horaires d’atterrissage est effectué en temps réel.

Le Problème du Voyageur de Commerce (PVC) représente un voyageur de commerce qui doit passer par un certain nombre de villes avec un minimum de temps de parcours total. Sa tournée doit être planifiée de manière à passer une seule fois par chaque ville. [Potvin 96] aborde ce problème par une approche génétique en codant les solutions par des chromosomes contenant la séquence ordonnée de passages aux différentes villes. La figure IV.8 présente un exemple d’un tel codage pour un problème à 9 villes. [Potvin 96] présente les différents opérateurs de croisement spécifiques respectant les contraintes du problème.

1	5	3	2	6	4	8	7	9

Figure IV. 8 : Exemple de codage pour un PVC

[Ngamchai et al. 00] présente un algorithme génétique pour la conception des lignes d’un réseau de bus avec localisation des nœuds de correspondance. En outre, [Ngamchai et

al. 00] présente un individu en tant que collection de chemins. Chaque chemin représente une route et le nombre de chemins dans un individu représente le nombre de véhicules.

L'approche génétique proposée possède alors un algorithme de génération des routes. Ce dernier établit des routes avec la contrainte de desservir tous les nœuds en ignorant la demande, avec des techniques de séparation. Différents opérateurs génétiques (croisement, fusion, rupture, etc.) sont présentés et sont appliquées sur les individus de la population avec des probabilités qui leur sont attribuées.

[Zhu, 95] présente un codage génétique similaire pour un problème de tournée des véhicules. Néanmoins, il n'effectue pas de séparation entre les routes puisqu'elle restreint la validité des solutions qui résultent des opérations de croisement. Cette séparation est déduite des chromosomes après un décodage spécifique.

[Salim & al, 97] aborde le problème NP-difficile d'ordonnancement de trains de marchandise avec une approche basée sur un algorithme génétique. Le but de cette approche est de trouver les routes et les horaires de passage des trains aux différentes stations et surtout aux boucles de passage. En fait, pour éviter les collisions, un train doit s'arrêter au niveau de ces boucles de passage afin de laisser un autre passer. Le chromosome représentatif des solutions est décrit sous forme de matrice avec des valeurs binaires (0 ou 1) correspondant aux passages des trains aux boucles en question.

[Deb & al, 98] présente une approche génétique de planification des horaires d'un réseau de bus. L'approche a pour objectif de minimiser la durée totale d'attente des passagers. Les variables de décision illustrées dans le codage correspondent aux temps de parcours et aux temps d'arrêt.

IV.4. Agent optimisateur : proposition et intégration d'une approche évolutionniste

IV.4.1. Objectif de l'intégration d'une approche évolutionniste

Nous proposons de traiter la régulation en ligne d'un réseau de transport perturbé comme un problème d'optimisation multiobjectif NP-difficile. Il est bien connu qu'une méthode d'optimisation multiobjectif, pour qu'elle soit efficace, doit donner de bons résultats selon les préférences des décideurs, elle doit donc résoudre le problème de l'évaluation des solutions et explorer intelligemment l'espace de recherche pour construire

des solutions réalisables et satisfaisantes. Pour atteindre ces deux objectifs, nous proposons des approches hybrides qui tiennent compte de ces deux problèmes.

IV.4.2. Choix du codage

Pour le problème de régulation des réseaux de transport multimodal en mode perturbé, un individu correspond à une solution de régulation dans l'horizon spatio-temporel H constitué par un axe temporel composé de v véhicules et un axe spatial qui contient s stations. Ainsi, un codage judicieux des chromosomes est la représentation des solutions sous forme de matrices $v \times s$, chaque cellule (i, j) contient la décision prise pour le véhicule i au niveau de l'arrêt j. Afin de déterminer les nouveaux horaires de passage, la décision est exprimée en fonction des modifications apportées à la durée de parcours et au temps de stationnement. Elle est donc exprimée par le couple $(\delta_{ijk}^{lmr}, \varepsilon_{ij}^{lm})$ pour le véhicule V_i^l à l'arrêt S_j^m. La figure suivante illustre le codage des chromosomes sous forme de matrice :

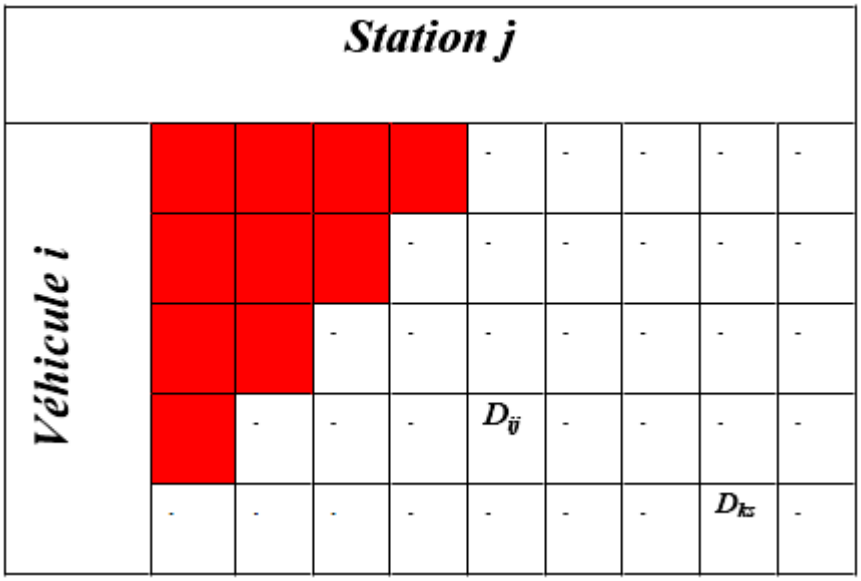


Figure IV. 9 : Codage génétique des décisions de régulation

Les cases colorées en rouge traduisent les contraintes temporelles, aucune décision n'y peut être prise. En effet, on ne peut pas agir sur les passages des véhicules aux stations effectuées avant la détection de perturbation à l'instant t_{pert}.

Le codage mentionné concerne deux types de décisions. La première décision est en relation avec le temps de parcours des distances inter stations δ_{ijk}^{lmr} et la deuxième décision est relative à la variation du temps de stationnement ε_{ij}^{lm}. Les deux types de décisions ont la même conséquence étant donné que le véhicule assurera son départ au même horaire de la station, qu'il ait été retardé en route ou en arrêt à la station. Cependant, les voyageurs perçoivent moins le temps d'attente lorsqu'ils sont à bord d'un véhicule que lorsqu'ils sont en attente dans une station. Il est donc plus judicieux de favoriser les solutions qui minimisent δ_{ijk}^{lmr}.

Ce codage permet de représenter l'ensemble des décisions que le régulateur peut prendre, à savoir :

- ne rien faire ;
- arrêter un bus *n* unités de temps dans la station ;
- accélérer : passer de la vitesse initiale à une vitesse plus grande, si c'est possible ;
- sauter la station ;
- injecter un bus ;
- utiliser un service de covoiturage ;
- etc.

Cependant, dans le cas de la régulation en ligne qui est l'objet de notre travail. Cette décision consiste, comme nous l'avons déjà dit, à retarder un ensemble de véhicules en amont et en aval d'un véhicule perturbé afin de maintenir les intervalles de passages aussi réguliers que possible et aussi afin d'aider le véhicule perturbé à garder un retard limité. En effet, dans la plupart des cas réels, il est très improbable que dans des conditions perturbées, les véhicules puissent accélérer. Nous considérons ainsi seulement les décisions de ralentissement des véhicules et par conséquent les valeurs positives de δ_{ijk}^{l}

D'autre part, la décision de ralentir V_i^l de *x* minutes lors de son parcours de S_j^l vers S_k^l est équivalente à celle de l'ajout de *x* minutes au temps d'arrêt initial à S_k^l. En effet,

suite à la première décision, le temps d'arrivée de V_i^l à S_k^lest retardé de *x* minutes par rapport à celui résultant de la deuxième décision. Les temps de départ de S_k^l sont égaux pour les deux décisions. Néanmoins, pour la première décision, les passagers en attente de V_i^l à S_k^l doivent attendre *x* minutes supplémentaires dans la station alors qu'ils percevraient moins cette durée s'ils étaient à bord du véhicule comme pour la deuxième décision.

Par conséquent, nous ne traitons dans cette approche que la durée de l'arrêt aux stations. Il revient alors de ne chercher que les variables de décisionε_{ij}^l, comprises entre 0 et max ε . Cette variable de décision a été décrite dans le paragraphe dédié à la formulation mathématique.

Nous construisons alors le chromosome illustré par la figure IV.10. Les lignes de la matrice du chromosome représentent les modifications des temps d'arrêts des v véhicules et les colonnes représentent les s arrêts.

	stations j							
Véhicules i	.	.	.	..	.	0	0	0
	.	.	.	.	1	1	0	0
	.	.	.	1	2	0	0	0
	1	2	0	0	0	0	0	0
	0	0	.	1	0	1	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0

Figure IV. 10 : Codage d'une solution de type « régulation en ligne »

IV.4.3. L'opérateur de sélection choisi

Le rôle de l'opérateur de sélection consiste à choisir les individus qui vont se reproduire pour former la génération suivante. Les opérateurs de sélection déterministes gardent uniquement les meilleurs individus ce qui constitue un inconvénient pour la diversité des solutions et mène à une convergence prématurée de l'algorithme. Nous avons

donc décidé d'opter pour un opérateur de sélection stochastique qui est la technique de roulette pondérée.

Le principe de cet opérateur est le suivant : chaque individu i occupe une surface de la roue proportionnelle à sa performance. En notant f_i la valeur de la fonction coût pour l'individu i et $f = \sum_j f_j$ la somme de tous les coûts. La probabilité de sélection de l'individu i est égale à :

$$p_i = \frac{f_i}{f}.$$

IV.4.4. L'opérateur de croisement utilisé

L'objectif du mécanisme de croisement est d'enrichir la diversité de la population en manipulant la structure des chromosomes. Les croisements sont envisagés avec deux parents et génèrent deux enfants. C'est une étape essentielle de l'algorithme évolutionniste puisqu'elle permet l'exploration de l'espace de recherche.

Le chromosome de régulation étant sous la forme d'une matrice, nous pouvons effectuer un croisement sur les lignes ou sur les colonnes. En effet, puisque les lignes de la matrice représentent les décisions sur les véhicules, un croisement sur les lignes consiste à échanger ces décisions entre deux individus pour former deux enfants. De même, les colonnes du chromosome étant des décisions sur les stations, un croisement sur les colonnes représente l'échange de ces décisions entre les individus. Pour l'implémentation de notre système, nous avons utilisé le croisement uniforme sur les lignes. Les masques relatifs à cet opérateur sont générés d'une manière aléatoire à chaque croisement entre deux individus.

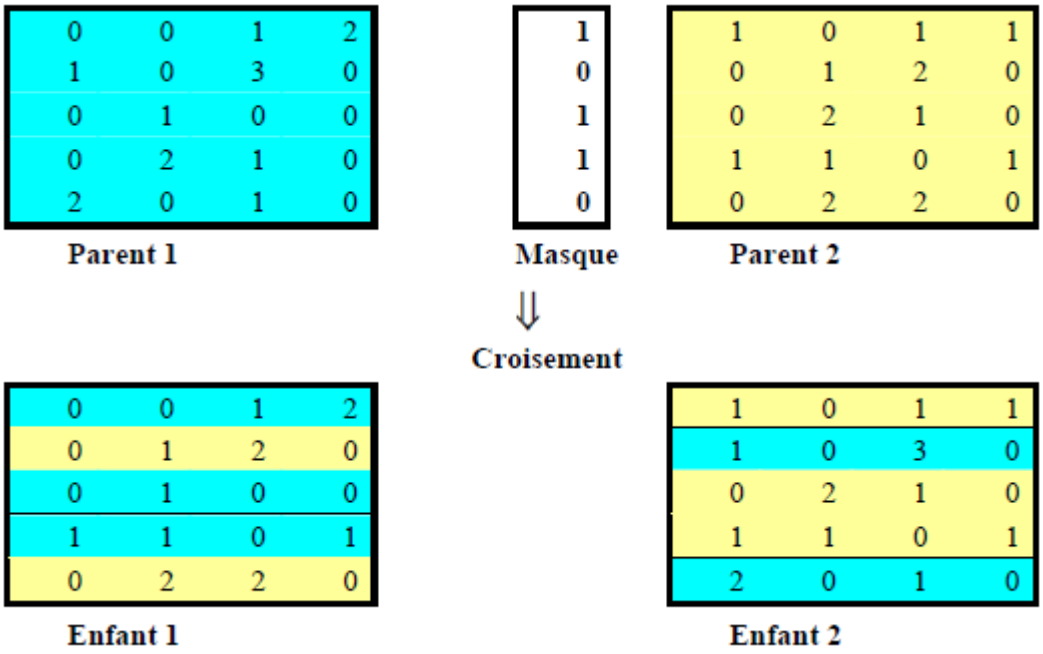


Figure IV. 11 : Exemple de croisement uniforme sur les lignes

En outre, pour limiter les écarts entre les horaires de passage théoriques et régulés, nous imposons une limite sur la valeur des retards accumulés à leur sortie de l'horizon spatio-temporel de régulation. Ainsi, si la valeur limite est atteinte, il faut réduire les valeurs des décisions non nulles jusqu'à ce que la somme atteigne le seuil tolérable.

L'utilisation de l'opérateur stochastique de sélection par les restes implique une identité entre certains individus adjacents dans la population, puisqu'un individu est sélectionné plusieurs fois à la suite. Ainsi, afin d'améliorer l'exploration de l'espace de recherche en évitant au maximum des croisements entre des individus identiques, nous essayons d'empêcher les croisements entre les individus adjacents. Nous proposons alors de les choisir aléatoirement ou de croiser le premier individu avec le dernier, le second avec l'avant-dernier, etc.

Par ailleurs, nous avons aussi imposé un contrôle à cet opérateur pour éviter les grands écarts provoqués par les décisions de retardement entre les horaires théoriques et les horaires régulés de passage des véhicules non perturbés. Nous transformons ainsi notre opérateur de croisement uniforme en un opérateur contrôlé qui ne peut qu'améliorer les coûts des individus, surtout par rapport au critère de ponctualité, en limitant le nombre de décisions sur les véhicules. En effet, nous imposons une limite sur le retard cumulé des véhicules à la sortie de la zone perturbé, ou en dehors de l'horizon spatio-temporel. Pour

chaque véhicule, si le retard cumulé atteint la limite, il faut réduire les décisions non nulles jusqu'à ce que leur somme soit tolérable. Cet opérateur a pour but d'éviter que les décisions ne se transforment elles-mêmes en perturbations. L'algorithme de croisement uniforme contrôlé est illustré par la figure suivante :

Pseudo-code du croisement uniforme utilisé

Choisir deux individus parents p_1 et p_2 pour créer deux enfants e_1 et e_2 ;
Générer aléatoirement un masque M de taille s ;
Pour $i = 0$ jusqu'à $v - 1$
Pour $j = 0$ jusqu'à $s - 1$
Si $M[j]=1$, alors :

$e_1[i][j] = p_1[i][j]$
$e_2[i][j] = p_2[i][j]$

Sinon

$e_1[i][j] = p_2[i][j]$
$e_2[i][j] = p_1[i][j]$

Fin pour ;
Pour 1 *e* calculer pour le véhicule i la somme des retards $SR[i]$;
Tant que $SR[i]$ > limite du retard toléré pour le véhicule i, alors
Choisir aléatoirement une station j ;
Si décision à $j > 0$, la décrémenter de 1 et décrémenter $SR[i]$;

Fin tant que ;
Idem pour e_2 ;
Fin pour.

<u>Figure IV. 12</u> : Algorithme de croisement uniforme utilisé

IV.4.5. L'opérateur de mutation adopté

La mutation est définie comme étant la modification aléatoire de la valeur d'un allèle dans un chromosome. Elle joue le rôle de bruit, empêche l'évolution de se figer et garantit que l'optimum global peut être atteint. Cet opérateur évite donc une convergence prématurée vers les optimums locaux. Il est appliqué avec une probabilité fixée $p_{mutation}$ .Le nombre des allèles du chromosome qui vont subir une mutation ainsi que les cellules modifiées par ce mécanisme sont choisis de manière aléatoire pour chaque individu.

IV.5. Agent Evaluateur : proposition et intégration d'une approche agrégative

IV.5.1. Approche agrégative classique

Comme pour l'ensemble des approches proposées, l'approche agrégative traite séparément les deux problèmes de l'évaluation des solutions et de la recherche des nouvelles solutions dans des zones de l'espace de recherche non encore visitées.

IV.5.1.1. Résolution du problème d'évaluation multicritère

Il s'agit dans cette partie, d'évaluer et comparer les solutions selon les trois critères considérés à savoir les critères de régularité, de correspondance et de ponctualité. Pour ce faire, nous utilisons une méthode d'évaluation floue basée sur les étapes suivantes :

- ***1ère étape : détermination des bornes inférieures***

Afin de réduire l'espace de recherche et de caractériser les limites des solutions réalisables, nous avons déterminé pour chaque critère $f_q(x)$ une borne inférieure f_q^* telle que : $\forall\, x \in \Omega,\ f_q(x) \geq f_q^*$ où Ω est l'espace des solutions réalisables et $1 \leq q \leq 5$.

Les valeurs de ces bornes inférieures correspondent à celles des critères en régime normal (état théorique du réseau). Leur utilisation va nous permettre aussi d'évaluer et juger les solutions obtenues avec précision.

- ***2ème étape : homogénéisation des objectifs***

Pour pouvoir gommer l'influence de la différence entre les unités de mesure des différentes fonctions- objectif, et aussi minimiser les effets dus aux différences de plages

de variation de magnitude entre les fonctions objectifs, nous utilisons une application simple de la logique floue basée sur les étapes suivantes :

A chaque solution réalisable *x*, nous associons $f(x) \in [f_1^*, +\infty[\times ... \times [f_5^*, +\infty[$ où $f(x) = (f_1(x),..., f_5(x))^T$. Soit f_q^{pert} la valeur du q^ième^ critère juste après la détection de la perturbation, Pour chaque vecteur $f(x)$, nous proposons une fuzzification de ses composantes $f_q(x)$ selon leurs positions dans les intervalles $[f_q^*, f_q^{pert}]$. Les deux sous-ensembles flous considérés sont : B^q : sous ensemble des bonnes solutions selon le qième objectif, M^q : sous ensemble des mauvaises solutions selon le q^ième^ objectif. La fuzzification est appliquée en utilisant la fonction d'appartenance comme le montre la figure suivante :

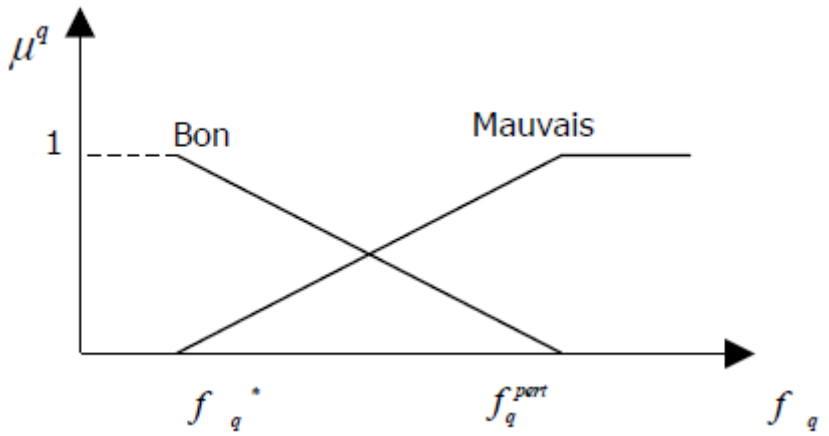


Figure IV. 13 : Application floue dans la résolution du problème d'échelle.

Par la suite, à chaque vecteur *f(x)*, nous associons deux vecteurs $\hat{f}_B(x)$ et $\hat{f}_M(x)$tels que :

$$\tilde{f}_B(x) = (\mu_1^B(f_1(x)), \ldots, \mu_5^B(f_5(x)))^T$$

$$\tilde{f}_M(x) = (\mu_1^M(f_1(x)), \ldots, \mu_5^M(f_5(x)))^T$$

$$\mu_q^B(f_q(x)) = \frac{f_q^{pert} - f_q(x)}{f_q^{pert} - f_q^*}, \text{ si } f_q(x) \in \left[f_q^* , f_q^{pert} \right]$$

$$\mu_q^B(f_q(x)) = 0, \text{ si } f_q(x) \geq f_q^{pert}$$

Ensuite, la qualité de chaque solution *x* est caractérisée par le vecteur $\tilde{f}_B(x)$ dont toutes les composantes sont homogènes puisqu'elles appartiennent toutes au même intervalle [0,1] et sont toutes sans dimension.

Il faut noter que pour la régulation en ligne, seules les valeurs des trois critères de régularité, de correspondance et de ponctualité varient. En effet, vu que cette action de régulation ne change pas les itinéraires des véhicules et qu'elle n'impose pas ni de sauts de stations ni de transbordements, alors elle est toujours optimale vis-à-vis de deux autres critères qui sont : les kilomètres commerciaux et la qualité de service. Nous avons alors pour toute la suite :

$$\mu_q^B(f_4(x)) = 1 \quad \text{et} \quad \mu_q^B(f_5(x)) = 1$$

- ***3ème étape : formulation de la fonction d'évaluation globale***

La fonction globale d'évaluation utilisée est une agrégation de toutes les fonctions- objectifs et peut être formulée comme suit :

$$F(x) = \sum_{q=1}^{q=5} w_q \cdot f_q(x)$$

Où $w_q \in [0,1]$, $\forall\ 1 \leq q \leq 5$ est le poids de la q[ième] fonction objectif et est tel que:

$$\sum_{q=1}^{q=5} w_q = 1$$

En combinant les équations, nous pouvons maintenant ramener l'optimisation multi-objectifs à la maximisation du critère global suivant :

$$F(x) = \sum_{q=1}^{q=5} w_q . \mu_q^B (f_q(x))$$

Suivant la manière de détermination des différentes valeurs de poids de la fonction floue proposée, deux approches ont été utilisées. La première est une approche agrégative en utilisant l'expression de la fonction globale pour trouver une solution selon les préférences du régulateur. La seconde est une approche basée sur la notion de la Pareto dominance dans laquelle nous utilisons une règle floue pour calculer dynamiquement les poids des différentes fonctions objectifs quand le régulateur ne peut pas exprimer ces préférences.

- ***4ème étape : détermination de la direction de recherche***

Dans ce paragraphe, nous traitons le cas où le régulateur peut exprimer ses préférences. De telles préférences sont généralement à caractère subjectif et pourraient être bien représentées en utilisant la logique floue. Dans cette optique, nous utilisons une application simple de la logique floue pour calculer les différents poids des fonctions objectifs selon les choix évoqués par le régulateur. Deux cas sont considérés :

1er cas : le régulateur donne ses préférences en attribuant une note N_q à chaque fonction objectif f_q. Nous calculons le poids correspondant selon la formule suivante :

$$w_q = N_q \Big/ \sum_{q=1}^{q=5} N_q \,,\ \forall 1 \le q \le 5$$

2ème cas : le régulateur évoque ses préférences par un classement relatif des critères. Dans ce cas, à chaque critère, nous associons un nombre $R_q \in \{1,...,5\}$ qui représente le rang de f_q selon le régulateur. Nous proposons une application simple de la logique floue pour calculer les différents poids des fonctions objectifs selon leurs rangs.

Considérons la proposition primaire présentée dans la figure IV.14. Suivant son rang, un critère peut être dans l'un des sous-ensembles flous : P (le sous-ensemble des critères

prioritaires) et $\tilde{P}$ (le sous-ensemble des critères non prioritaires) selon la fonction d'appartenance suivante :

$$\mu^{P}(R_q)=(1-\frac{R_q}{6}),\ \forall\ 1\le q\le 5$$

Cependant, nous pouvons facilement noter que cette priorité n'est pas uniforme dans tous les cas. En effet, nous pouvons être confrontés aux situations où une urgence intensifie la priorité de certains critères.

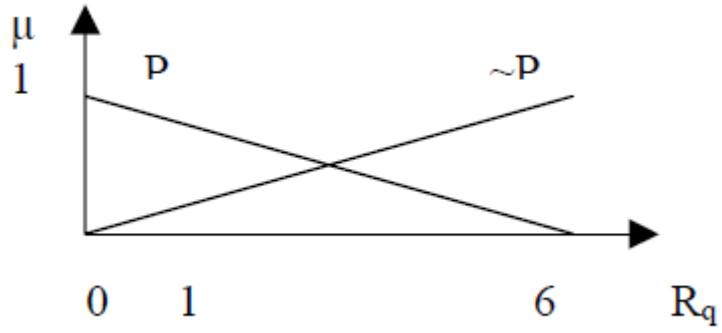


Figure IV. 14 : Fonctions d'appartenance pour les critères à optimiser

Pour intégrer ce concept d'intensification, nous proposons une légère modification sur la fonction précédente. Ainsi, elle sera remplacée par la fonction décrite dans l'équation suivante :

$$\mu^{\sim P}(R_q)=(1-\frac{R_q}{6})^{\rho},\ \forall\ 1\le q\le 5$$

Avec ρ le degré d'intensité prioritaire.

Si ρ augmente, les valeurs de la fonction d'appartenance aux critères non prioritaires chutent pour tous les R_q et particulièrement pour les critères mal classés. Ce coefficient est également appelé coefficient de pression de sélection. Par suite, nous pouvons affecter une note à chaque critère en tenant compte de ces priorités et de leurs intensités comme l'indique l'équation :

$$N_q=\mu^{\sim P}(R_q)=(1-\frac{R_q}{6})^{\rho},\ \forall\ 1\le q\le 5$$

Par conséquent, le calcul des poids w_q devient possible en employant la formule de base :

$$w_q = N_q \Big/ \sum_{q=1}^{q=5} N_q \,,\ \forall 1 \le q \le 5$$

IV.5.1.2. Résolution du problème d'optimisation multicritère : Algorithme évolutionniste de régulation

L'algorithme commence par une étape d'initialisation dans laquelle il y a la construction de la population initiale *P* (étape 0), comme décrit par la figure IV.15. Cette dernière peut être formée, le cas échéant, à partir des décisions primaires recommandées après le diagnostic et avec des mesures de duplication. Faute de solutions primaires, l'algorithme en effectue aléatoirement la genèse. Dans la même étape, les individus de la population initiale sont évalués pour commencer directement la sélection dans l'étape suivante (étape 1). Cette sélection conduit à une population intermédiaire, *P**, formée des meilleurs individus.

Dans les étapes 2 et 3, les individus de *P** subissent des croisements et des mutations avec des probabilités de p_{crois} et p_{mut}, pour former une nouvelle population *P*. L'étape 4 de l'évaluation est ensuite réalisée pour calculer les coûts des individus. Dans ce but, il est nécessaire de calculer, pour chaque solution, les horaires régulés et l'impact des décisions sur la charge des véhicules (nombre de personnes montant et descendant). L'étape 5 consiste en une comparaison partielle entre les parents et les enfants, pour en garder les meilleurs. Par exemple, si parent 1 et parent 2, de la population *P**, ont subi un croisement pour générer enfant 1 et enfant 2 dans *P* et si le coût de parent 1 est meilleur que celui de enfant 1, parent 1 remplace enfant 1 dans *P*. De même, nous effectuons une comparaison entre parent 2 et enfant 2. Puisque c'est une comparaison partielle, nous ne prenons effectivement pas les deux meilleurs des quatre individus pour ne pas risquer de perdre la diversité des solutions. De même, dans le cas d'une mutation nous prenons le meilleur parmi l'individu et sa réplique mutée. Le processus de comparaison partielle sert alors à contrôler l'évolution des individus tout en respectant la diversité des populations.

La dernière étape consiste en un test de la condition d'arrêt. Cette condition est pour l'instant liée au nombre de générations de l'algorithme. Elle peut cependant être liée à la durée d'exécution de l'algorithme, fixée par le régulateur selon l'urgence de la régulation.

Toutefois, l'algorithme peut être interrompu s'il reçoit du régulateur un ordre à ce propos. Dans ce cas, les meilleures solutions atteintes lui seront fournies. Si le test n'aboutit pas, l'algorithme reprend, pour la génération suivante, à partir de l'étape de sélection.

L'agent AO : Algorithme évolutionniste de régulation

- **Etape 0 : Initialisation**

Génération de la population initiale P_0, puis interaction avec l'agent AE pour évaluer tous les individus qui la composent.

- **Etape 1 : Sélection**

Après la phase d'évaluation, sélectionner les meilleurs individus de P à la génération g et construire la population intermédiaire P^*.

- **Etape 2 : Croisement**

Choisir aléatoirement deux parents de P^*, effectuer un croisement avec une probabilité p_{crois}, former une nouvelle population P à partir des enfants et des parents non croisés.

- **Etape 3 : Mutation**

Effectuer une mutation aux individus de P avec une probabilité $p_{mutation}$.

- **Etape 4 : Interaction avec l'agent AE**

L'agent AO envoi à l'agent AE une population de solutions à évaluer. L'agent AE évalue chaque individu en donnant une note pour chaque critère à l'aide de l'intégrale de Choquet puis il renvoi les résultats à l'agent AO.

- **Etape 5 : Comparaison**

Comparer partiellement à la génération g entre les individus de P et P^* pour garder les meilleurs et les mettre dans P.

- **Etape 6 : Test d'arrêt**

Si le nombre spécifié de générations est atteint ou un ordre d'arrêt est imposé, terminer l'algorithme et donner les solutions trouvées. Sinon, réitérer l'algorithme à partir de l'Etape sélection.

Sinon, passer à la génération g+1 et répéter à partir de Etape 1.

Figure IV. 15 : Algorithme évolutionniste de régulation

IV.5.2. Approche agrégative basée sur l'intégrale de Choquet

Cette approche est similaire à celle qu'on vient de décrire, la seule différence est en fait au niveau de l'évaluation des solutions, et concerne donc le problème d'évaluation multicritère.

En effet, nous essayons d'améliorer notre opérateur d'agrégation en utilisant l'intégrale de Choquet qui a des propriétés beaucoup plus intéressantes que la somme pondérée surtout quand on l'utilise dans un contexte d'aide à la décision. Dans ce qui suit nous allons introduire cette intégrale avant de l'utiliser pour notre application.

IV.5.2.1. Insuffisance de la somme pondérée

La somme pondérée est la méthode la plus utilisée pour l'agrégation dans les problèmes multicritères à cause de sa simplicité. Mais cette méthode ne peut pas satisfaire les préférences recherchées. Cependant, cette méthode présente plusieurs limites qu'on ne peut pas éliminer. Pour illustrer ces défauts, on présente l'exemple suivant (extrait d'un article de Grabish [95]) :

Le directeur d'une école d'ingénieurs veut évoluer ses élèves à partir de leurs notes en Mathématiques(M), Statistiques(S) et Langues(L). Etant donné que l'école est d'orientation scientifique, il ne veut pas admettre des élèves faibles dans les deux premières matières (M,S) ; et il désire des élèves également bons en langues. Ainsi, le directeur a décidé d'attribuer les coefficients suivants : 3 pour M, 3 pour S et 2 pour L. L'évaluation moyenne de trois élèves en utilisant une somme pondérée simple est présentée dans le tableau suivant :

	M	S	L	Score
Elève A	18	16	10	15.25
Elève B	10	12	18	12.75
Elève C	14	15	15	14.62

Tableau IV. 1 : Résultats de l'agrégation par une somme pondérée

Le directeur n'est pas satisfait par les résultats obtenus car il estime que l'élève C, bon en sciences et en langues, est meilleur que l'élève A qui est excellent en sciences mais faible en langues. Le directeur essaye de changer les coefficients en attribuant le même coefficient pour les trois matières mais sans succès puisque le résultat obtenu classe A et C dans le même rang, et il ne peut pas donner un coefficient plus important pour les langues vu que c'est une école scientifique. Il est donc clair que la somme pondérée ne peut pas satisfaire les préférences du directeur et il est nécessaire de trouver une autre approche pour modéliser ce problème. Ainsi, l'utilisation des intégrales floues peut être une solution efficace pour ce problème. En effet, on peut exprimer les préférences du directeur sous la forme des trois règles suivantes :

i. Les matières scientifiques M et S sont plus importantes.

ii. Les matières scientifiques sont plus au moins similaires, on ne doit pas beaucoup favoriser les élèves qui sont bons dans ces deux matières.

iii. Les élèves bons en M (respectivement en S) et en Langues sont rares et doivent être favorisés.

Cet exemple présente l'importance de l'interaction entre les critères. Mais, l'opérateur d'agrégation doit prendre en considération l'importance du critère pris à part mais aussi l'interaction entre les critères. Les intégrales floues et surtout l'intégrale de Choquet constituent une méthode efficace pour représenter ce genre de comportements.

IV.5.2.2. Présentation de l'intégrale de Choquet

On définit en premier lieu quelques notions nécessaires pour la compréhension de l'intégrale de Choquet ainsi que les outils mathématiques essentiels.

Définition 1: on appelle mesure floue (capacité, mesure non-additive) sur C, une application μ de P(C) → [0,1] satisfaisant les axiomes :

i. μ(∅)=0 ; μ(C)=1
ii. ∀ S,T ⊂ C, S ⊂ T ⇒ μ(S) ≤ μ(T) (Monotonie).

Définition 2 : Soit μ une mesure floue sur C, l'expression de l'intégrale de Choquet discrète pour un vecteur x ϵ $[0,1]^n$ est :

$$C_\mu(x_1,...,x_n) = \sum_{i=1}^{n} (x_{\sigma(i)} - x_{\sigma(i-1)})\, \mu(A_{\sigma(i)})$$

Avec σ(i) une permutation de sorte que $x_{\sigma(0)} \le x_{\sigma(1)} \le ... \le x_{\sigma(n)}$.

Définition 3 : Soit μ une application d'ensemble (pas nécessairement une mesure floue) sur C, la transformée de Möbius de μ est la fonction d'ensemble définie par :

$$m(A) = \sum_{B \subset A} (-1)^{|A \setminus B|}\, \mu(B), \quad \forall A \subset C$$

où $A \setminus B$ est l'ensemble d'éléments de A qui n'appartiennent pas à B, c'est le compliment de B dans A.

Définition 4 : la mesure floue μ est dite *k-additive* si sa transformée de Möbius satisfait les deux conditions suivantes : $m(A) = 0 \ \forall A$ tel que $|A| > k$ et il existe au moins un sous ensemble A de cardinal k tel que $m(A) \neq 0$.

IV.5.2.3. Notion d'importance globale d'un critère

Pour des raisons de simplification, on note $\mu_i = \mu(c_i), \mu_{ij} = \mu(c_i, c_j), \mu_K = \mu(K)$ pour un sous ensemble $K \subset C$.

L'importance globale d'un critère $c_i \in C$ n'est pas déterminée seulement par le nombre μ_i, mais aussi par toutes les mesures μ_K de toutes les coalitions K où $c_i \in K$. Par exemple, on peut avoir un critère i tel que $\mu_i = 0$, le critère c_i semble sans importance mais il est possible que pour plusieurs sous-ensembles $K \subseteq C \setminus \{c_i\}$, le nombre $\mu(K \cup \{c_i\})$ est beaucoup plus important que le nombre $\mu(K)$ ce qui prouve l'importance du critère c_i. Dans ce contexte, on peut définir l'importance globale d'un critère par son indice de Shapley :

$$I_i = \sum_{K \subset C \setminus i} \frac{(n - |K| - 1)!|K|!}{(n-1)!}(\mu(K \cup \{i\}) - \mu(K))$$

L'indice de Shapley est interprété comme la moyenne des contributions marginales du critère c_i dans toutes les coalitions où il participe.

IV.5.2.4. Notion d'interaction entre deux critères

L'agent AE focalise son calcul sur l'interaction entre deux critères c_i et c_j en se basant sur trois situations possibles :

i. $\mu_{ij} > \mu_i + \mu_j \Rightarrow$ il y a une synergie de complémentarité entre ces deux critères.

ii. $\mu_{ij} < \mu_i + \mu_j \Rightarrow$ il y a redondance ou synergie négative entre ces deux critères.

iii. $\mu_{ij} = \mu_i + \mu_j \Rightarrow$ les deux critères sont indépendants.

Pour mesurer l'interaction entre deux critères, l'agent AE ne doit pas se contenter de la valeur $|\mu_{ij} - \mu_i - \mu_j|$ mais il doit aussi prendre en considération les mesures de toutes les coalitions contenant c_i et c_j. Ainsi, l'interaction entre deux critères c_i et c_j peut être définie par l'équation suivante :

$$I_{ij} = \sum_{K \subset C \setminus \{i,j\}} \frac{(n - |K| - 2)!|K|!}{(n-1)!}(\mu(K \cup \{i, j\}) - \mu(K \cup \{i\}) - \mu(K \cup \{j\} + \mu(K))$$

L'intégrale de Choquet peut être exprimée à travers les indices de Shapley I_i et d'interaction I_{ij} pour une mesure floue 2-additive selon l'expression :

$$C_\mu(x) = \sum_{I_{ij}>0}(x_i \wedge x_j)I_{ij} + \sum_{I_{ij}<0}(x_i \vee x_j)I_{ij} + \sum_{i=1}^{n} x_i(I_i - \frac{1}{2}\sum_{j \neq i}|I_{ij}|)$$

Où $\wedge$ et $\vee$ sont respectivement les symboles du minimum et maximum.

Cette expression est formée de trois sommes. La première somme agrège les paires de critères dont l'interaction est positive par l'opérateur minimum; c'est une agrégation conjonctive : pour que le résultat soit satisfaisant, il faut que les deux critères soient satisfaits. La seconde somme agrège les paires de critères dont l'interaction est négative par l'opérateur maximum; il s'agit d'une agrégation disjonctive, il suit donc qu'un des deux critères soit satisfait pour que le résultat soit satisfaisant. La troisième somme n'est autre qu'une somme pondérée, dont les poids sont les indices d'importance diminués de la

somme des interactions se rapportant au critère en question. On comprend alors bien le sens exact de l'interaction entre critères, et comment celle-ci intervient dans le calcul du score global. D'autre part, on peut montrer que l'expression ci-dessus est une somme convexe : tous les coefficients sont positifs et se somment à 1. Cela veut dire que l'on est capable de dire, pour une capacité 2-additive donnée, quel est le pourcentage de linéarité ou de conjonction ou de disjonction du modèle, ce pourcentage pouvant même être donné pour un critère ou une paire de critères particuliers.

Revenons maintenant à notre exemple introductif, et voyons comment les préférences de notre directeur peuvent être traduites en termes de mesures floues :

1. $\mu(\{M\}) = \mu(\{S\}) = 0.45, \mu(\{L\}) = 0.3$ (importances relatives des critères)

2. $\mu(\{M, S\}) = 0.5 < \mu(\{M\}) + \mu(\{S\})$ (Redondance)

3. $\mu(\{M, L\}) = \mu(\{S, L\}) = 0.9 > 0.45 + 0.3$ (œomplémentarité)

L'application de l'intégrale de Choquet avec les mesures floues ci-dessus donne le résultat suivant :

	M	S	L	Score
Etudiant A	18	16	10	13.9
Etudiant B	10	12	18	13.6
Etudiant C	14	15	15	14.9

Tableau IV.2 : Agrégation par intégrale de Choquet

Ici, les étudiants ont été proprement ordonnes en concordance avec les préférences du directeur. Nous signalons que l'étudiant B est toujours en dernier rang, comme voulait la tendance scientifique de cette école.

Plusieurs méthodes ont été proposées pour la détermination des indices de Shapley et d'interaction entre critères (coefficients de l'intégrale de Choquet) afin de pouvoir calculer le score global de chaque décision (voir les travaux de recherche de M. Grabish pour plus

de détails sur ces méthodes [Grabish 95] et [Grabish 98]**)**. Cependant, en cas général le décideur est supposé capable de donner les valeurs de Shapley sans problème en ordonnant les critères ou en accordant une note à chacun d'entre eux. Il en est de même pour les interactions entre paire de critères (mesure floue 2-additive). Pour des raisons de simplification, nous nous mettons dans ce cas de figure et nous supposons que le régulateur peut exprimer ses préférences soit quantitativement ou qualitativement et qu'il peut donner les indices d'interactions une fois pour toute indépendamment de la situation courante.

IV.6. Conclusion

Ce chapitre nous a permis, de déterminer les différents comportements des agents AO et AE. L'agent AO utilise un algorithme évolutionniste pour l'optimisation des solutions de régulation en explicitant les différents outils nécessaires à sa mise en œuvre. L'agent AE utilise à son tour, une approche agrégative basée sur l'intégrale de Choquet pour évaluer globalement les solutions.

Cependant, la plupart des approches de régulation existantes ne traitent pas le cas multimodal des réseaux de transport public, elles limitent le degré d'intervention du régulateur et ne concernent pas la régulation en cas d'apparition de plusieurs incidents simultanés et surtout chevauchés comme dans le cas de forte congestion. De plus, les correspondances sont souvent traitées par des approches spécifiques qui ne considèrent pas les autres critères de ponctualité, de régularité, etc.

Chapitre V : Simulations et résultats des approches proposées

V.1. Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous procédons tout d'abord, au choix de la plateforme d'implémentation appropriée pour notre modèle et présenter ses caractéristiques. Ensuite, nous procédons à des tests de fonctionnement du système réalisé. Enfin, nous présentons les différents résultats des simulations que nous avons réalisées.

En effet, dans le cadre du projet CISIT (Compus International des Sciences et d'Ingénierie en Transport), plusieurs équipes de recherche de la région Nord Pas de Calais travaillent actuellement sur le développement d'un système d'aide à la régulation du trafic d'un réseau de transport en mode fortement perturbé. Le réseau simulé jusqu'à ce jour se limite à deux lignes de bus (N° 43 et N°44) et les lignes de métro 1 et 2 du réseau de transport lillois comme l'indique la figure V.1 suivante. Il inclut différents pôles d'échange dont principalement : Gare Lille Flanders, Porte des postes, Hellemmes, Valmy, Pont de bois et Hôtel de ville.

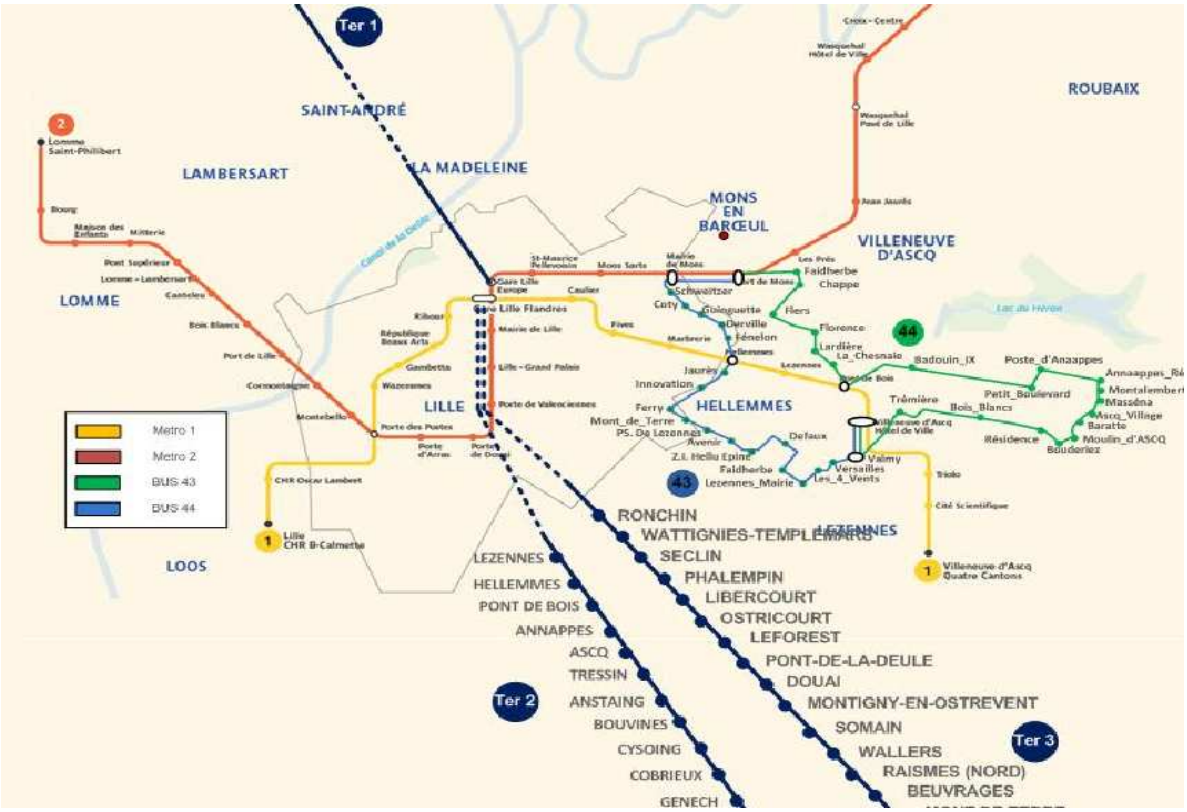


Figure V. 1 : Réseau de transport multimodal de Lille

Dans les chapitres précédents, nous avons validé les activités des différents agents de notre architecture en appliquant nos méthodes et approches de construction et d'évaluation de décisions sur ce réseau. Nous présentons ici les scénarios de perturbations simulés qui ont été choisis parmi les plus connus. Ces perturbations sont décrites par les tableaux de marche (horaires de passages de véhicules aux stations concernés), les fréquences des lignes touchées, les flux de voyageurs, les retards causés…etc.

Nous allons commencer le traitement de chaque scénario par la détermination de sa zone de régulation effectuée par l'agent AH (paragraphe III.3). Puis, nous générons l'ensemble des décisions réalisables en appelant la base de règles que nous avons pu établir à partir du guide des régulateurs que TRANSPOLE, l'exploitant du réseau lillois, nous a fourni. L'ensemble des décisions réalisables résultant de l'interaction entre les différents agents, sera contrôlé par le régulateur qui peut en ajouter ou supprimer une ou plusieurs décisions.

Nous construisons par la suite, l'ensemble de décisions les plus adaptées en utilisant, les approches évolutionnistes adoptées par l'agent AO et l'algorithme d'évaluation adopté par l'agent AE proposés aux paragraphes IV.4 et IV.5. La décision finale proposée au régulateur sera choisie en classant les décisions candidates selon leurs efficacités.

V.2. Implémentation du système d'aide à la régulation

Notre travail porte essentiellement sur la conception du système d'aide à la décision pour la régulation du réseau de transport multimodal en mode perturbé. L'implémentation d'un tel système nécessite de profondes connaissances en langages de programmation orientée objet et un choix pertinent de la plateforme de développement.

V.2.1. Choix de la plateforme multi agents

Un système multi agents présente un comportement et des caractéristiques spécifiques. Il nécessite par conséquent, une infrastructure de logiciels appropriée, utilisée comme environnement pour le déploiement et l'exécution d'un ensemble d'agents.

Cette infrastructure est appelée *plate-forme de développement des systèmes multi-agents*. Cependant, l'implémentation de tels systèmes s'avère souvent difficile au niveau de la manipulation de structures de données complexes, de la distribution, de la communication ainsi qu'au niveau des contraintes matérielles imposées. En plus, l'intelligence artificielle est un domaine de recherche extrêmement riche et cette richesse induit une grande complexité et une grande multiplicité des approches proposées, ce qui conduit à de très nombreux modèles d'agents, d'environnement, d'interactions et d'organisations. Ces modèles sont souvent combinés au sein d'un même système multi-agent. Ainsi, le mieux est de choisir une plateforme multi-agent adaptée aux contraintes du système à mettre en œuvre. Plusieurs plates-formes multi-agents existent, telles que MadKit, JADE, ZEUS, AgentBuilder, Jack, etc.

Pour la sélection de la plateforme, nous avons négligé les critères insignifiants tels que la difficulté d'apprentissage ou la non-disponibilité des sources. Néanmoins, nous avons souligné quelques critères importants :

- La possibilité d'implémenter des systèmes relativement complexes.

- La flexibilité : éviter les plates-formes qui supportent une méthodologie particulière.

- L'accélération de développement grâce à la présence suffisamment importante de briques logicielles pour pouvoir produire une application aboutie ;

- Possibilité d'intégration des services web.

Les deux plate-formes qui ne spécifient aucune méthodologie et peuvent être considérées comme des « frameworks »[19], sont JADE (Java Agent Development framework) et Jack mais JADE l'emporte avec plusieurs autres caractéristiques intéressantes telles que la possibilité d'intégration des Web services et l'existence d'un bon support de langages de contenu et d'ontologies. Pour cela, nous l'avons choisi. En effet, la plateforme JADE[20] est un logiciel-médiateur[21] "middleware" qui permet une implémentation flexible des Systèmes Multi-Agents communiquant grâce à un transfert

[19] *Un ensemble de bibliothèques permettant le développement rapide d'applications. Il fournit suffisamment de briques logicielles pour pouvoir produire une application*
[20] *http://jade.tilab.com*
[21] *Permet la communication entre des clients et des serveurs ayant des structures et une implémentation différentes*

efficace des messages ACL (Agent Communication Language), conformes aux spécifications de la FIPA. JADE est écrit en Java[22], supporte la mobilité, évolue rapidement et fait partie aujourd'hui des rares plateformes multi-agents qui offrent la possibilité d'intégration des services Web [Greenwood, 05]. D'un autre côté, JADE tente de faciliter le développement des applications agent en optimisant les performances d'un système d'agents distribué. Il permet en outre, d'interagir avec l'utilisateur.

V.2.2. Outils et paramétrages

Pour apercevoir les communications et les comportements des agents, JADE offre des outils graphiques, qui sont eux même des agents, tels que le « RMA » (Remote Management Agent) qui représente l'interface principale d'administration ; l'« introspector » qui permet de contrôler le cycle de vie d'un agent, ses messages ACL échangés et ses comportements ; le « sniffer » qui permet de suivre le cheminement des communications entre les différents agents du système ; etc.

V.2.3. Base de données

Pour la création et la gestion de la base de données, nous avons utilisé le serveur Oracle. Oracle est un SGBD (système de gestion de bases de données) édité par la société du même nom (Oracle Corporation), leader mondial des bases de données. Il permet d'assurer :

- La définition et la manipulation des données
- La cohérence des données
- La confidentialité des données
- L'intégrité des données
- La sauvegarde et la restauration des données
- La gestion des accès concurrents.

[22] *www.java.sun.com*

V.2.4. Les tableaux utilisés

- Le tableau UTILISATEUR : permet de définir une liste d'accès au système d'aide en précisant le login, le mot de passe, le nom et le prénom de chaque utilisateur.

MODIFIER	MOTPASS	LOGIN	NOM	PRENOM
	transport	regulateur	transport	regulateur
	admin	admin	admin	admin

Figure V. 2 : Table UTLISATEUR

- Le tableau DONNEESLIGNES : ce tableau permet de résumer les données relatives à chaque ligne du réseau de transport en indiquant le mode, le numéro de ligne, le sens, la fréquence, le nombre de véhicules et le nombre de stations.

MODIFIER	MODETRANS	NUMLIGNE	SENSLIGNE	FREQUENCE	NOMBRESTATIONS	NOMBREVEHICULES
	METRO	2	1	2	44	91
	METRO	2	2	2	44	91
	BUS	43	1	10	23	17
	BUS	44	1	2	22	91
	METRO	1	1	2	18	76
	BUS	43	2	10	23	17
	BUS	44	2	2	22	91
	METRO	1	2	2	18	76

ligne(s) 1 - 8 de 8

Figure V. 3 : Table DONNEESLIGNES

- Les TMT : Pour chaque ligne et chaque sens, on nomme le tableau qui contient les valeurs de passage théorique par la concaténation du mode, du numéro de la ligne et du sens séparés par des « _ ». par exemple, le tableau relatif au mode BUS, ligne 43, sens 1 est noté : BUS_43_1. Cette notation est choisie pour faciliter la désignation du tableau de marche de la ligne perturbée au cours des requêtes SQL utilisés lors de la programmation.

MODIFIER	VEHICULENUM	STATION_1	STATION_2	STATION_3	STATION_4	STATION_5	STATION
	1	7:05	7:07	7:09	7:10	7:12	7:14
	2	7:15	7:17	7:19	7:20	7:22	7:24
	3	7:25	7:27	7:29	7:30	7:32	7:34
	4	7:35	7:37	7:39	7:40	7:42	7:44
	5	7:45	7:47	7:49	7:50	7:52	7:54
	6	7:55	7:57	7:59	8:00	8:02	8:04

Figure V. 4 : Table BUS_43_1.

- Table LISTEDECLARATION : Cette table joue le rôle d'un « fichier log » puisqu'elle permet de regroupant l'ensemble des perturbations survenues sur le réseau multimodal de façon chronologique. Cette table peut être utilisée pour définir les incidents familiers.

V.3. Diagrammes de classes

Le diagramme de classe exprime la structure statique de la conception, il représente les classes de l'application interconnectées entre elles par des relations, selon les besoins d'une classe à l'autre. Chaque classe contient plusieurs méthodes et plusieurs attributs. Nous présentons les principales classes de notre conception en indiquant les attributs et les méthodes importants.

En premier lieu, nous représentons les classes utilisées par l'interface graphique de notre système à travers le diagramme suivant.

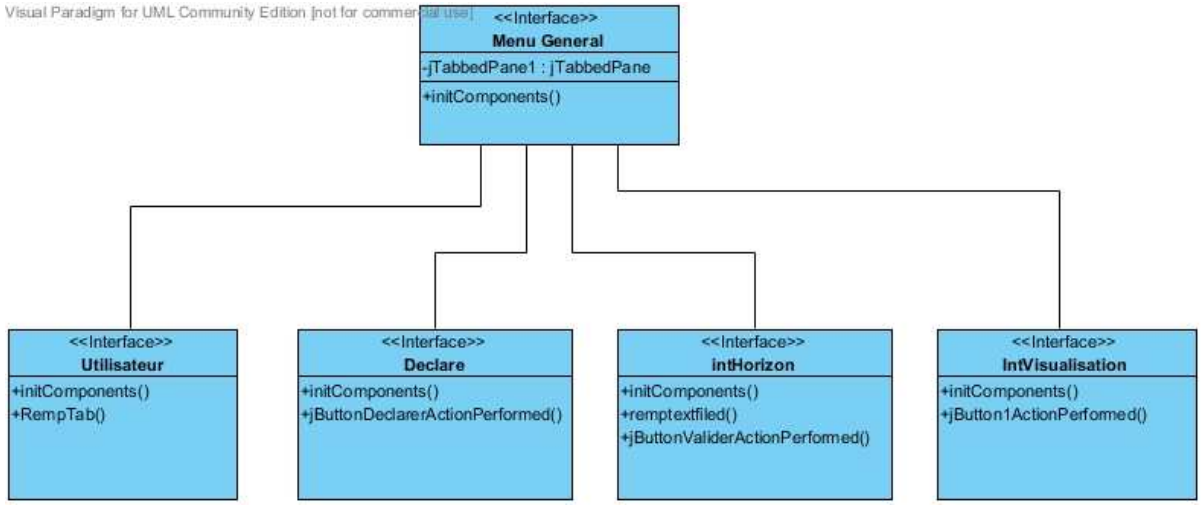


Figure V. 5 : Diagramme de Classes de l'interface graphique

L'interface graphique est constituée d'un menu général sous forme de « jTabbedPane ». Ce dernier est composé des quatre autres interfaces.

En second lieu, les classes utilisées pour la connexion à la base de données, le calcul de l'horizon de régulation, la recherche de la solution optimale pour la régulation en ligne et en terminus, le calcul de l'intégrale de Choquet ainsi que leurs relations sont représentées par le diagramme suivant.

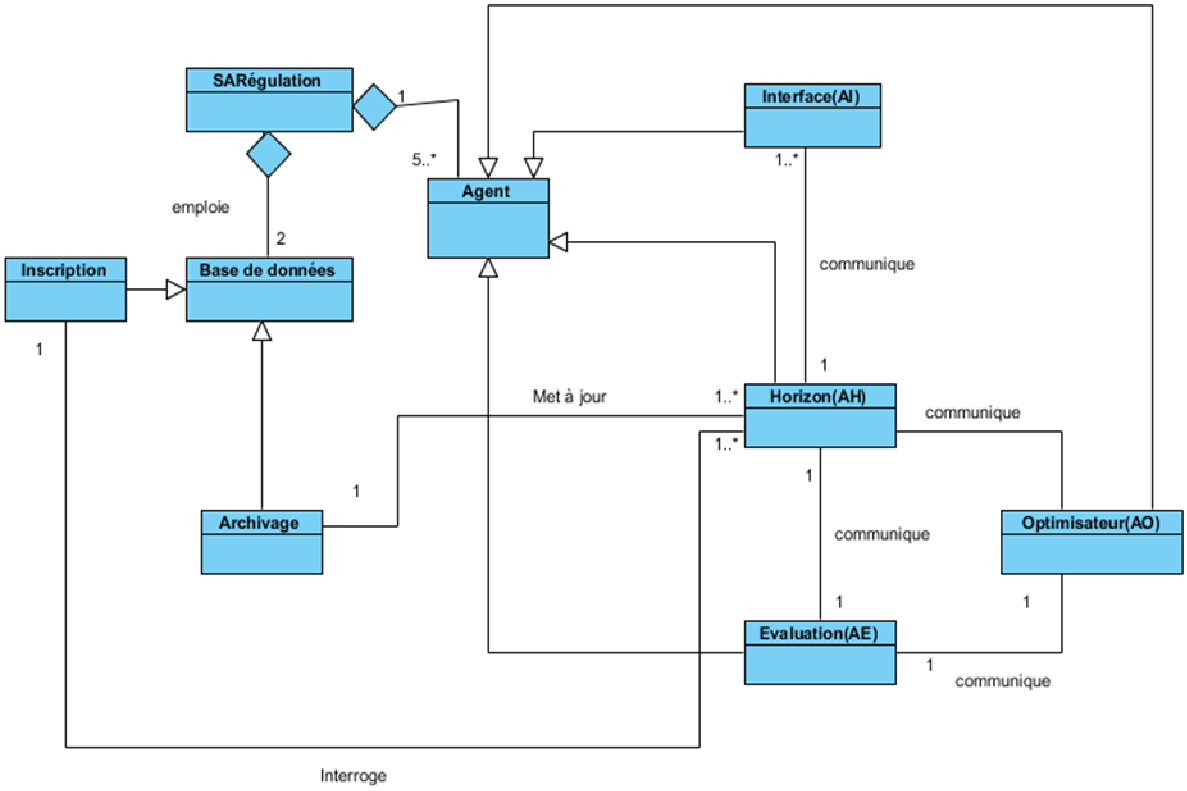


Figure V. 6 : Diagramme de Classes

La classe « Inscription » est utilisée lors de l'authentification pour permettre l'accès au système si les données entrées par l'utilisateur sont correctes. En outre, elle permet l'ajout, la suppression ou la modification de données enregistrées dans la base concernant la liste autorisée à accéder au système. La classe « Base de données » gère tout accès à la base de données ORACLE. La classe « SARégulation » est responsable du calcul de l'horizon de régulation relatif à chaque perturbation.

La classe « Agent » gère le comportement et l'interaction entre les différentes classes qui représentent les agents de notre architecture. La classe « Interface (AI) » permet la liaison entre le centre de régulation et les différents agents. La classe « Horizon (AH) » quant à elle opère lors de la présence de plusieurs perturbations simultanément. Elle permet de vérifier si les horizons relatifs à ces incidents sont sécants ou disjoints et de construire l'horizon global si les perturbations sont chevauchantes. Après avoir identifié les perturbations et leurs manœuvres, cette classe met à jour la classe « archivage ». Cette dernière regroupe toutes les données liées aux perturbations détectées et les solutions mises

en œuvre afin de les consulter pour des perturbations ultérieures. La classe « Optimisateur (AO) » est la classe utilisée pour l'application de l'algorithme évolutionniste. Elle permet de calculer la solution optimale. Finalement, la classe « Evaluation (AE) » est utilisée pour le calcul de l'intégrale de Choquet. Elle exprime les indices d'interaction entre les critères. La classe « Charge » calcule la charge des véhicules à leur sortie de chaque station.

V.4. Les interfaces du système d'aide à la régulation

- **L'authentification :** Afin de limiter l'accès au système, les personnes susceptibles de l'utiliser doivent s'authentifier en utilisant un login et un mot de passe qui sont stockés dans la base de données de l'opérateur (table UTILISATEUR).



Figure V. 7 : Interface Authentification

- **Interface Admins :** Cette interface présente la liste des utilisateurs enregistrés dans la base de données et permet de la gérer en ajoutant un nouvel utilisateur, modifiant les données ou en supprimant l'un d'eux.

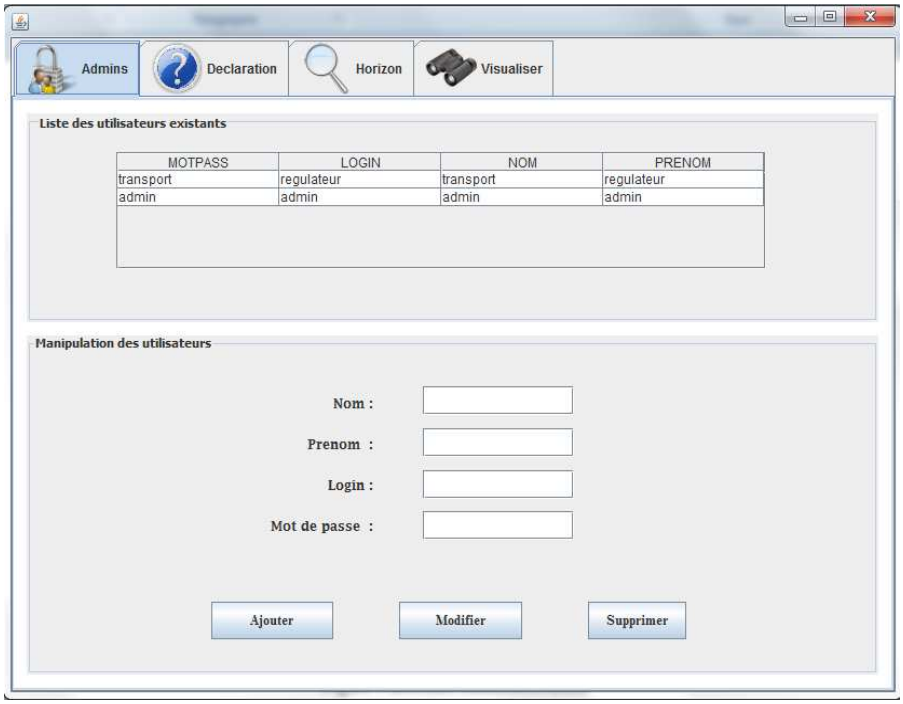


Figure V. 8 : Interface Admins

- **Interface Déclaration :** Cette interface est utilisée en première étape lors de la présence d'une perturbation puisqu'elle permet au régulateur d'indiquer les données relatives à la perturbation.

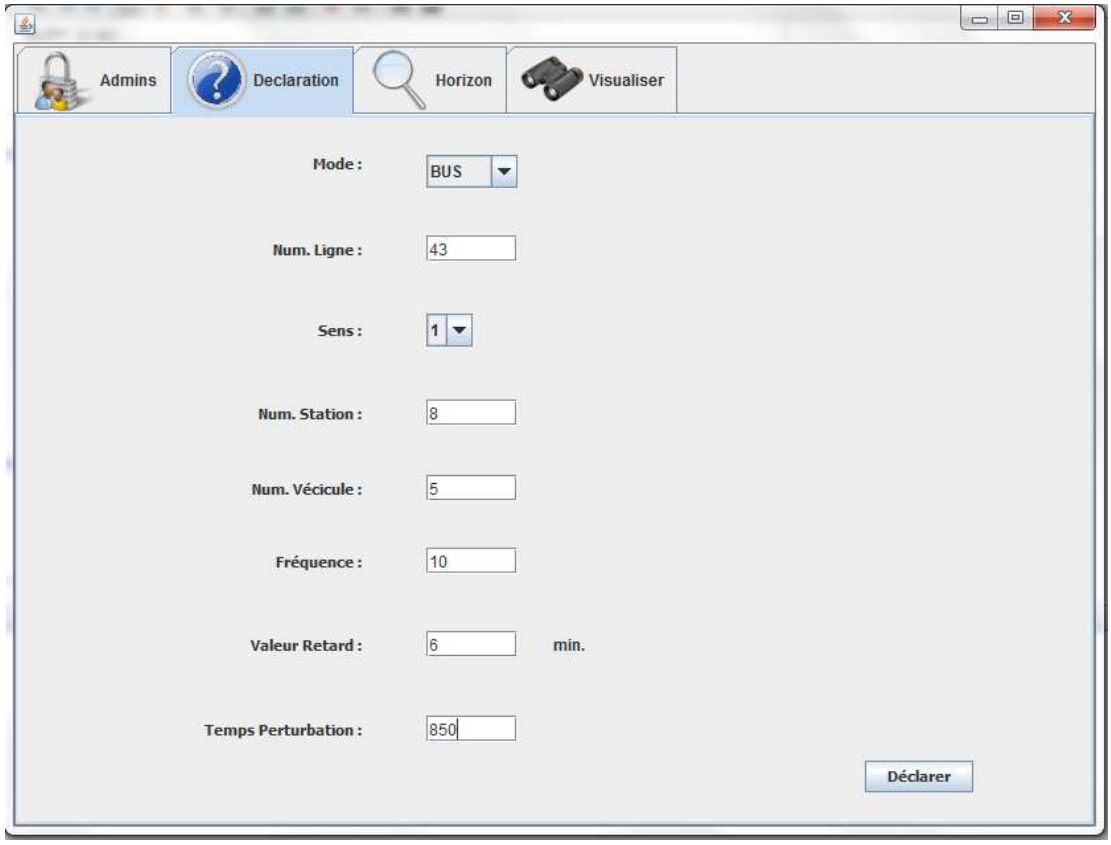


Figure V. 9 : Interface Déclaration

- **Interface Horizon :** Après avoir déclaré la perturbation, le régulateur passe à l'interface Horizon dans laquelle on trouve un récapitulatif des données relatives à l'incident (le mode, le numéro de la ligne, la fréquence…) ainsi que la zone de régulation déterminée par le système qui est représenté par le nombre de véhicules en amont et en aval de la véhicule perturbée et aussi le nombre de stations. Enfin, le régulateur doit choisir une manœuvre de régulation parmi la liste des choix présentée.

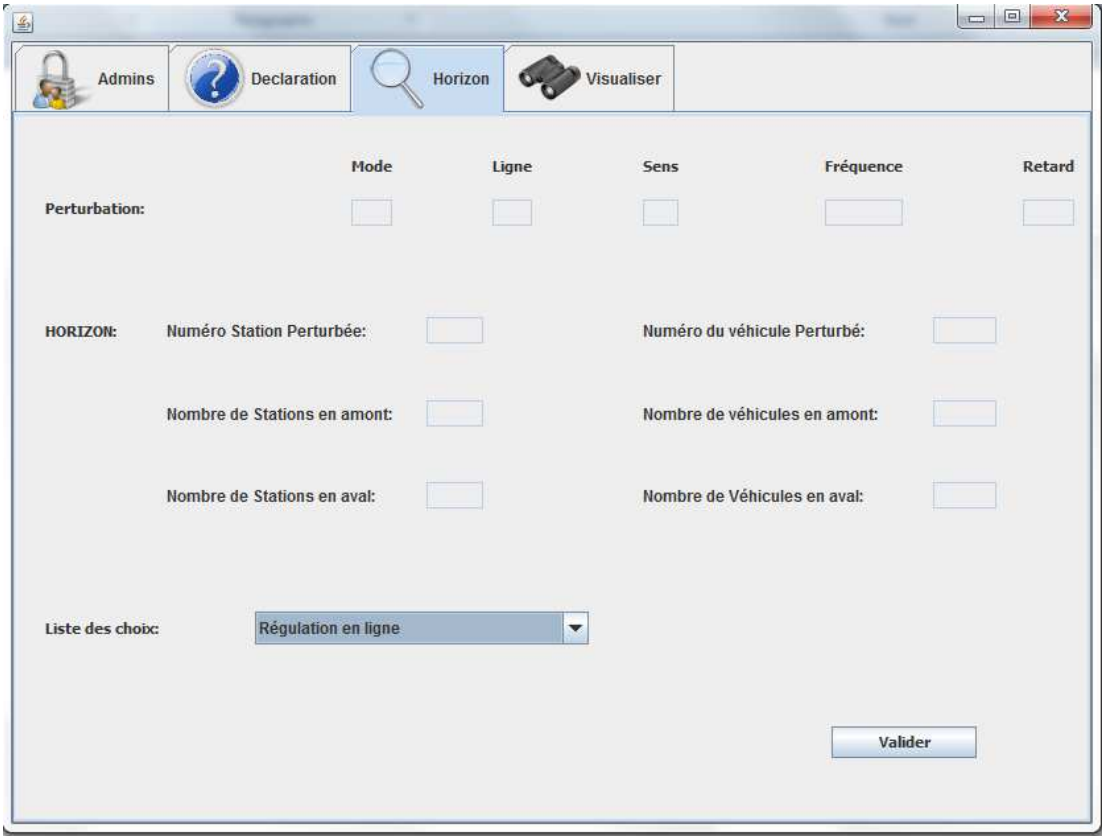


Figure V. 10 : Interface Horizon

- **Interface Visualiser :** Après avoir choisi une manœuvre de régulation, le régulateur peut visualiser l'impact de son choix sur les critères et comparer les résultats obtenus à ceux des états théorique et perturbé pour estimer l'efficacité de la solution choisie. L'utilisateur peut après cette étape mettre fin à la perturbation en cliquant sur le bouton « FIN » ou bien tester une autre manœuvre en revenant à l'interface Horizon et en choisissant une autre manœuvre parmi la liste de choix.

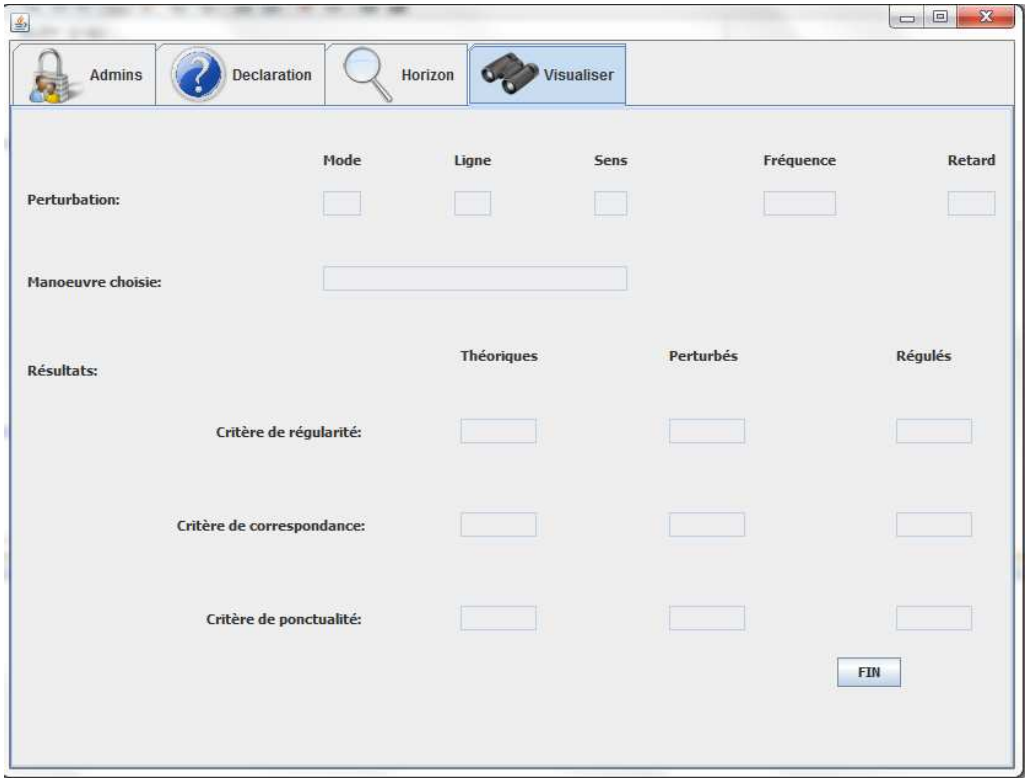


Figure V. 11 : Interface Visualiser

V.5. Les scénarii de simulations

V.5.1. Scénario 1 : Perturbation touchant une seule ligne

- **1er exemple**

➢ **Description de la perturbation**

On considère une perturbation qui agit sur la ligne de bus numéro 43, sens 1 à l'instant 8h45. Le véhicule numéro 10 arrive à la station numéro 7 de cette ligne avec un retard de 5 minutes.

Le flux d'arrivée des passagers aux différentes stations de la ligne 43 dans le sens considéré est montré sur la figure V.13. Les exploitants peuvent par ailleurs disposer des courbes de charges théoriques moyennes des véhicules à l'arrivée à chaque arrêt. Elles servent dans le calcul des charges perturbées et régulées par ajustement selon les retards et les décisions.

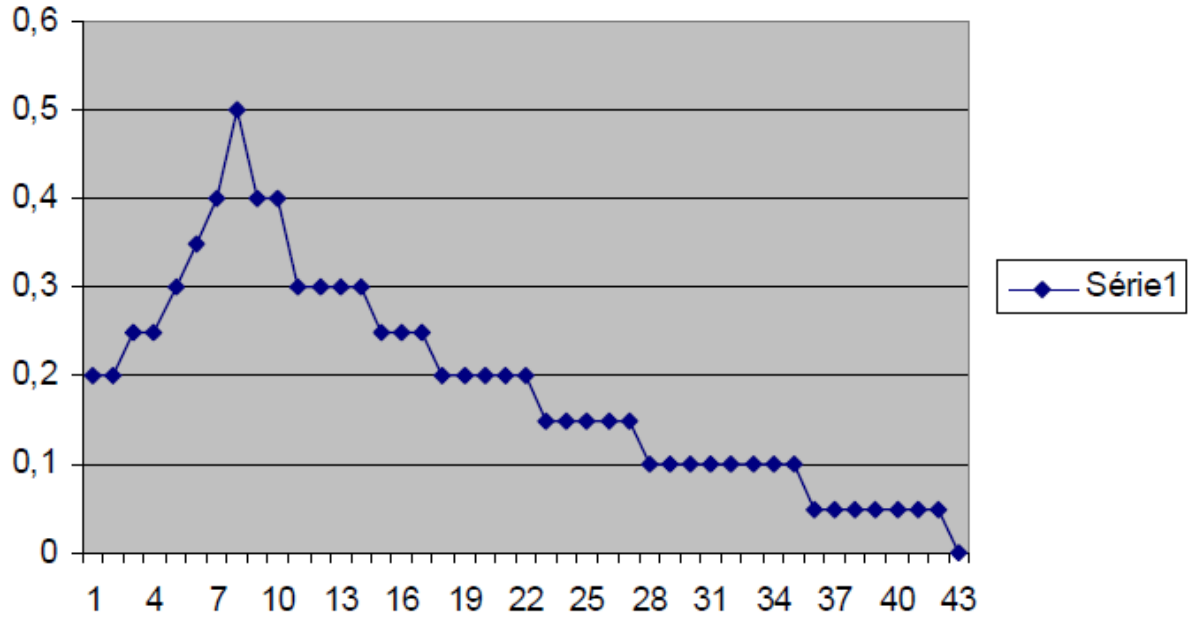


Figure V. 12 : Flux de voyageurs de la ligne 43 sens 1

- **Détermination de la zone de régulation**

Après qu'on ait entré ces données dans l'interface déclaration de notre système d'aide à la régulation, le résultat du calcul de l'horizon spatio-temporel de régulation est donc mentionné dans la sortie de l'application suivante :

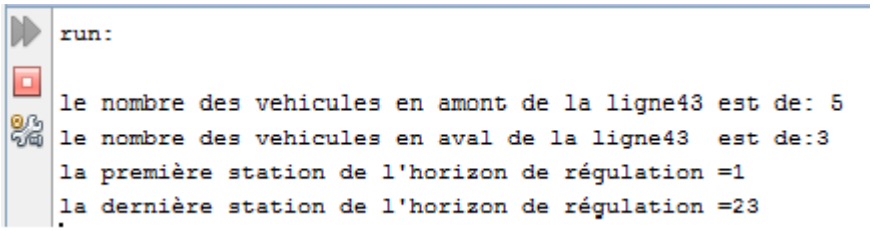


Figure V. 13 : Horizon spatio-temporel de régulation

On peut aussi vérifier ces résultats qui s'affichent notammaent dans l'interface horizon pour aider le régulateur à choisir la manœuvre de régulation à tester.

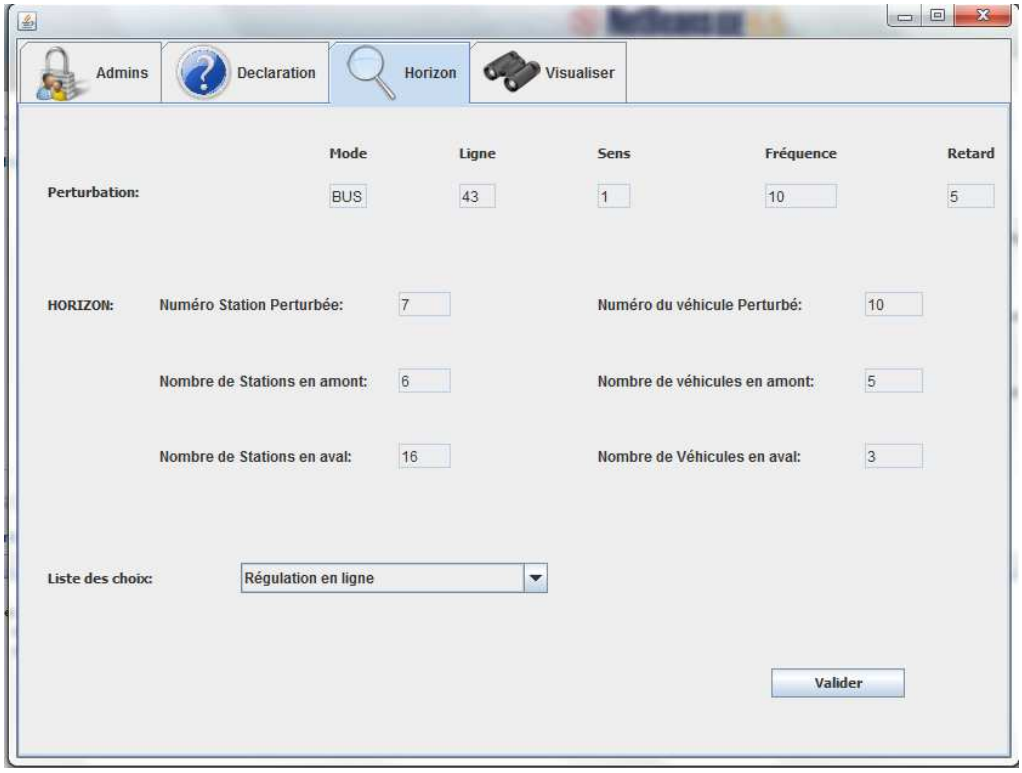


Figure V. 14 : Affichage de l'horizon de régulation

La zone de régulation obtenue en utilisant l'algorithme de détermination de l'horizon spatiotemporel comprend six véhicules et sept stations qui appartiennent tous à la ligne 43 car aucune autre ligne n'est impliquée dans cette perturbation.

Afin de mettre en évidence l'importance de l'évaluation de l'impact d'une perturbation sur le trafic d'un réseau de transport avant toute prise de décision, nous donnons ci-après la dégradation constatée en fonction du retard causé par l'incident. Cette évaluation est faite par comparaison des valeurs théoriques et perturbées de chaque critère. Pour les kilomètres commerciaux et la qualité de service, ce sont les actions de régulation qui en modifient les valeurs et pour cela nous ne présentons ici que les trois autres critères.

	at_per	tt_per	rt_per
$r=0$	5400	00	3699
$r=2$	5436	00	3529
$r=5$	5626	00	3259
$r=8$	5976	00	2971
$r=10$	6300	00	2769

Figure V. 15 : Dégradation des valeurs des critères avec l'évolution du retard

- **Génération et évaluation des décisions réalisables**

En appelant la base de règles construite à partir des conditions requises pour la mise en œuvre de chaque classe de décision, nous pouvons déterminer l'ensemble de décisions réalisables pour résorber cette perturbation. Il nous faut juste bien identifier cette perturbation, en indiquant la ligne, le véhicule et la station concernés, l'heure, les conditions de circulation et les circonstances de la perturbation. Ainsi, le module de génération de décisions nous propose deux classes de décisions qui sont le haut le pied hors ligne et la régulation en ligne.

Le haut le pied sera appliqué entre la station courante et la station perturbée, c'est-à-dire la station 1 et la station 7 de la ligne perturbée.

Afin de trouver la meilleure action de type régulation en ligne, nous avons utilisé l'approche évolutionniste agrégative classique et l'approche Pareto basée sur le calcul dynamique des poids.

Nous supposons que le régulateur a exprimé ses préférences en attribuant les scores aux différents critères, le vecteur de poids est supposé le suivant :

$$(W = w\ at, w_\ tt, w_\ rt, w_\ km, w_\ qs)T = (0.4, 0.1, 0.3, 0.1, 0.1)T$$

Pour bien choisir les probabilités de mutation et de croisement, nous avons effectué plusieurs tests qui nous ont conduits à fixer la probabilité de croisement à 0.7 et la probabilité de mutation à 0.03. Nous avons travaillé avec une population de 30 individus et le critère d'arrêt utilisé est le nombre maximal de générations effectuées qui a été fixé à 1000.

La meilleure solution de type régulation en ligne obtenue est montrée dans le tableau ci-après, elle a été obtenue par l'approche agrégative classique. Nous montrons aussi la convergence en calculant la moyenne de la fonction coût à chaque génération :

	$\mu(AT)$	$\mu(TT)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$	Score global
HLP	0.51	1	0	0.8	0.3	0.41
REL	0.19	1	0.18	1	1	0.43

Figure V. 16 : Evaluation des critères par l'approche agrégative classique

D'après le module d'évaluation, la régulation en ligne est mieux adaptée pour réagir à ce scénario de perturbation, car elle dégrade moins la qualité de service et les kilomètres commerciaux même si elle n'aide pas à retrouver des intervalles réguliers entre les passages de bus.

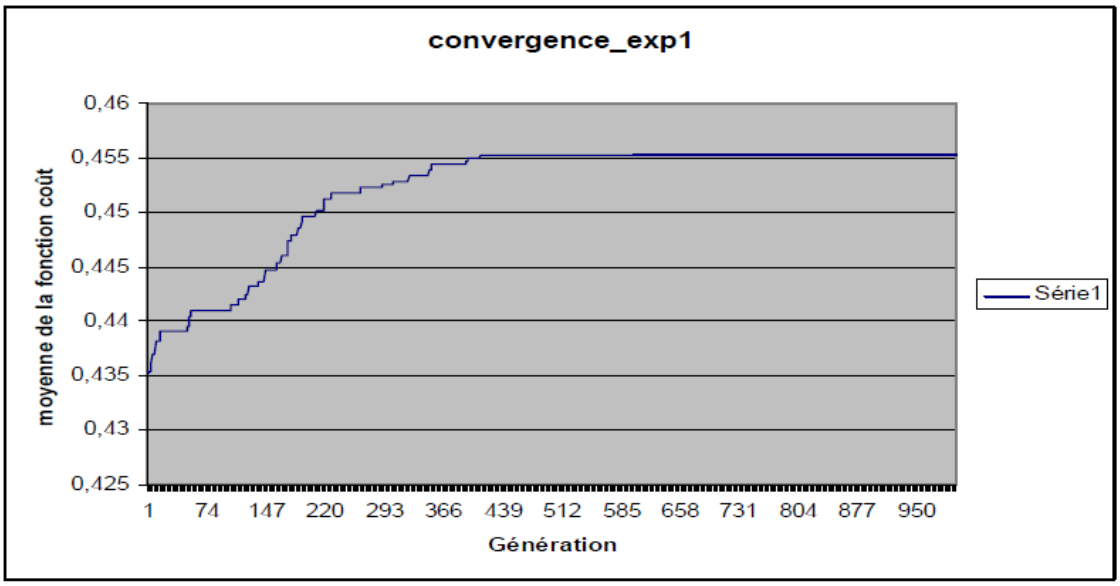


Figure V. 17 : Moyenne de la fonction coût

- **Exemple 2**

➢ **Description de la perturbation**

Nous considérons ici la ligne 43 sens 2 qui est totalement indépendante du reste du réseau de transport simulé. En effet, le principal pôle d'échange de cette ligne est l'Hôtel de Ville qui est son terminus de départ dans le sens de circulation considéré. Nous supposons qu'à 10 :48, une congestion ait lieu au niveau de l'arrêt Mont _de_Terre causant un retard d'environ 8 minutes au véhicule n°5 au-delà de son temps de battement. La fréquence de la ligne considérée est de 1 bus toutes les 20 minutes. Le flux d'arrivée des passagers aux arrêts de la ligne 43 est représenté sur la figure suivante

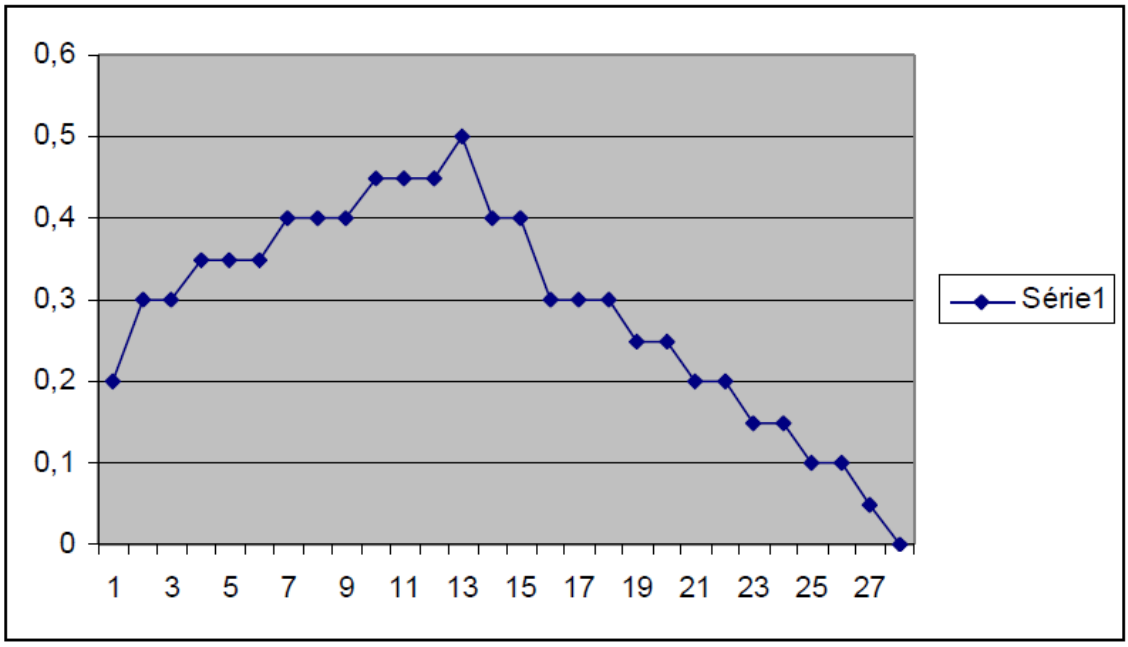


Figure V. 18 : Flux de voyageurs aux arrêtes de la ligne 43 sens 2

➢ **Détermination de la zone de régulation**

Le régulateur déclare cette perturbation et choisit la manœuvre régulation au terminus. Un choix logique vu que la perturbation a eu lieu au terminus. Le système d'aide à la décision présente la solution sous forme de retards à appliquer sur un certain nombre de véhicules qui suivent le bus perturbé afin de garder la régularité de passage par les stations du réseau. La figure suivante illustre la décision proposée par le système.

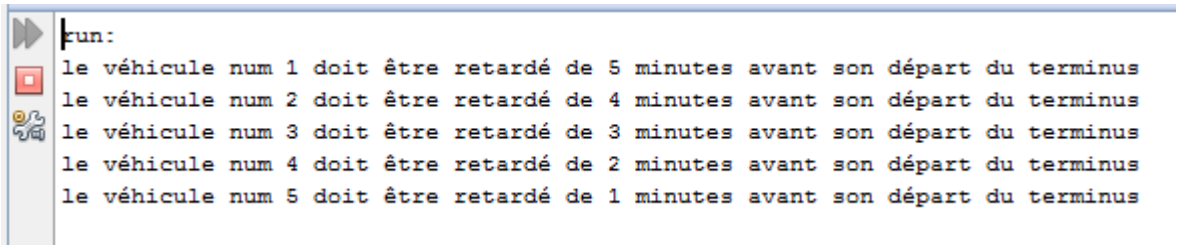


Figure V. 19 : Manœuvre régulation au terminus

L'agent évaluateur AE étudie l'impact de la perturbation sur le réseau par comparaison des valeurs théoriques et perturbées de chaque critère. Nous montrons par la figure suivante cette évaluation :

	at_per	tt_per	rt_per
$r=0$	6000	00	3318
$r=2$	6040	00	3138
$r=5$	6250	00	2853
$r=8$	6640	00	2550
$r=10$	6300	00	2769

Figure V. 20 : Impact de la congestion sur les valeurs des critères

- **Génération et évaluation des décisions réalisables**

De même que pour l'exemple précédent, le module de génération des décisions nous préconise de tester la régulation en ligne et le haut le pied hors ligne pour dissiper cette perturbation.

Le haut le pied hors ligne sera appliqué entre la station courante et la station perturbée de la ligne 43.

En ce qui concerne la régulation en ligne, nous avons utilisé les mêmes approches et le même vecteur de pondérations que pour l'exemple précédent vu la ressemblance entre les deux exemples. Nous avons constaté que l'algorithme évolutionniste intégré dans l'agent AO converge assez vite et qu'il arrive à trouver une solution optimisée. Cette solution présentée dans le tableau ci-dessous, montre bien le résultat de l'interaction entre l'agent AO et l'agent AE:

	$\mu(AT)$	$\mu(TT)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$	Score global
HLP	0.35	1	0.16	0.75	0.1	0.37
REL	0.29	1	0.93	1	1	0.69

Figure V. 21 : Evaluation des critères par intégrale de Choquet

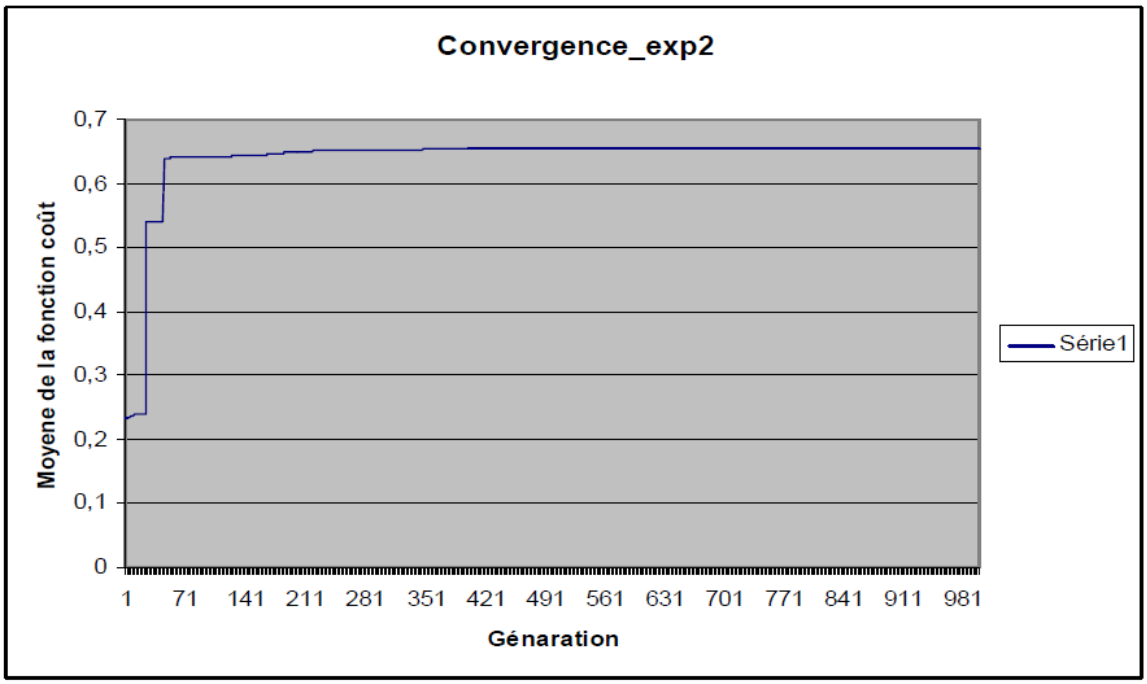


Figure V. 22 : Moyenne de la fonction coût

V.5.2. Scénario 2 : Détermination de l'horizon de régulation pour des perturbations simultanées et séparées

- **3ème Exemple :**

➢ **Description de l'incident**

On considère les deux incidents (notés respectivement pert.1 et pert.2 dans la figure suivante). Le premier incident affecte la ligne de métro numéro 1 dans les deux sens et bloque le trafic pour une période importante. Le deuxième incident est lié à la ligne de bus numéro 43. Le nœud de correspondance nommé « Hellemmes » est d'une grande importance puisqu'il permet aux voyageurs de la ligne 43 d'atteindre la station « Lille Flandres » pour effectuer des correspondances avec les trains « Ter2 » et « Ter3 ».

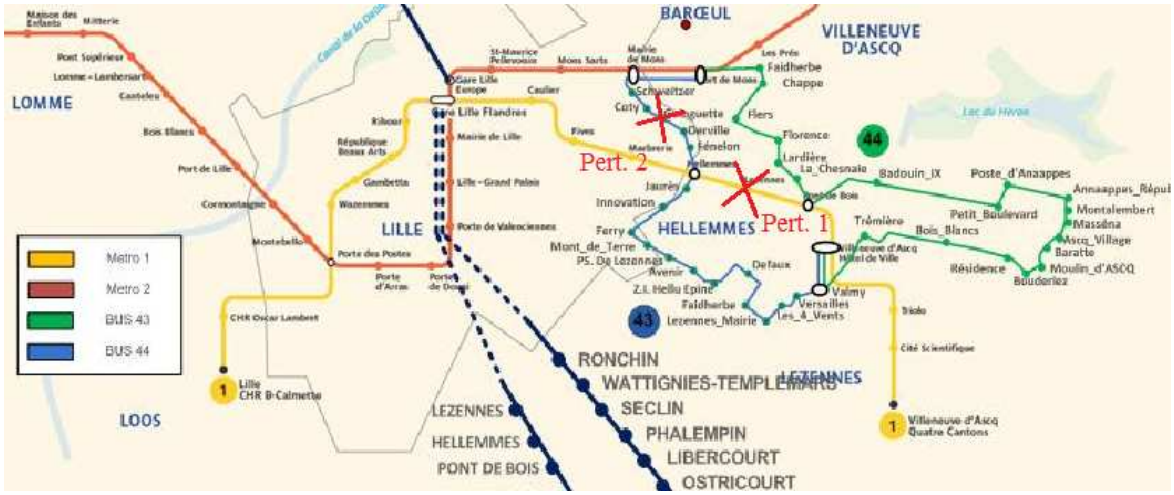
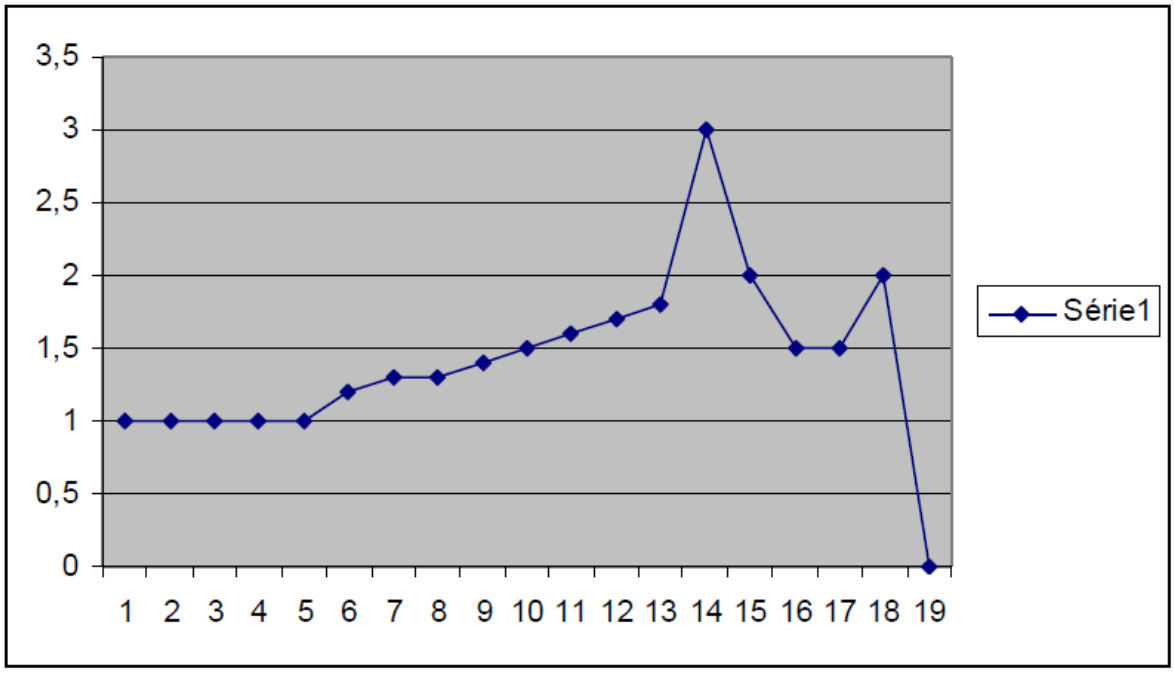


Figure V. 23 : Perturbations simultanées

La fréquence du métro dans le réseau simulé est d'1 métro/minute et celle du bus est de 1bus/20min. Supposons qu'à 8 :07 le conducteur du bus 43 à destination de l'hôtel de ville appelle le poste central de commande pour leur annoncer son blocage à cause d'une congestion importante à Derville. Il estime le retard engendré par cette perturbation à 7 minutes. Ce bus devait assurer la correspondance à 8 :12 à Hellemmes vers le métro 1. Suite à son retard la correspondance ne peut avoir lieu à temps et par conséquent, le métro 1 arrivera au pôle d'échange gare Lille Flandres après le départ du Ter.



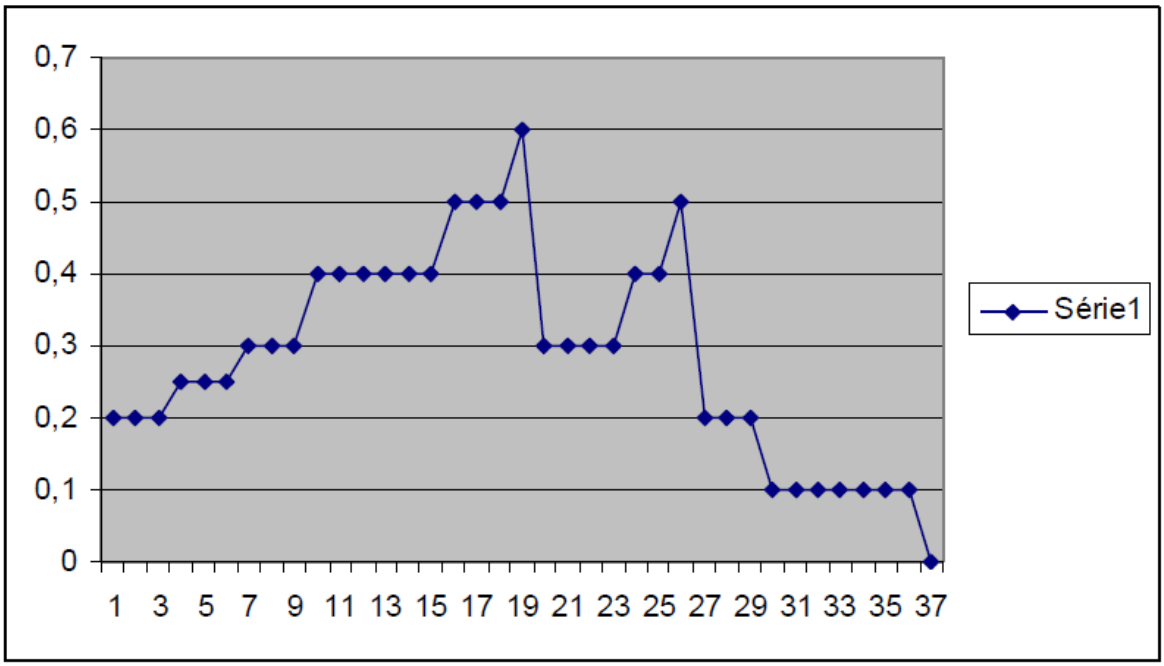


Figure V. 24 : Flux de voyageurs aux arrêtes de la ligne 43

- **Détermination de la zone de régulation**

En appliquant l'algorithme intégré dans l'agent AH qui permet de déterminer l'horizon de régulation, nous remarquons que l'horizon H_1 relatif à la première perturbation contient, en plus des véhicules et des stations de la ligne du métro numéro 1,

des véhicules et des stations de la ligne de bus numéro 43 pris en considération à cause des correspondances qui ne seront pas effectuées.

- **Génération et évaluation des décisions réalisables**

Pour ce scénario de perturbation, seule les actions de type régulation en ligne ont été recommandées par le générateur de décisions. Pour construire la meilleure décision de ce type, nous avons opté pour l'approche agrégative utilisant l'intégrale de Choquet, nous supposons que le régulateur a exprimé ses préférences comme suivant :

$$\begin{bmatrix} & WT & TT & RT & KM & SQ \\ WT & 0.15 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ TT & 0.1 & 0.35 & -0.1 & 0 & 0.1 \\ RT & 0.1 & -0.1 & 0.25 & 0.1 & -0.1 \\ KM & 0 & 0 & 0.1 & 0.1 & 0.05 \\ SQ & 0 & 0.1 & -0.1 & 0.05 & 0.15 \end{bmatrix} = I_{ij}$$

Figure V. 25 : Evaluation des préférences par intégrale de Choquet

Cette matrice contient, en fait les indices de Shapley et les indices d'interactions entre les critères de régulation. La meilleure solution obtenue et la convergence de l'algorithme sont montrées sur la figure suivante.

	$\mu(AT)$	$\mu(TT)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$	Score global
REL	0.25	1	0.53	1	1	0.74

Figure V. 26 : Evaluation des critères par intégrale de Choquet

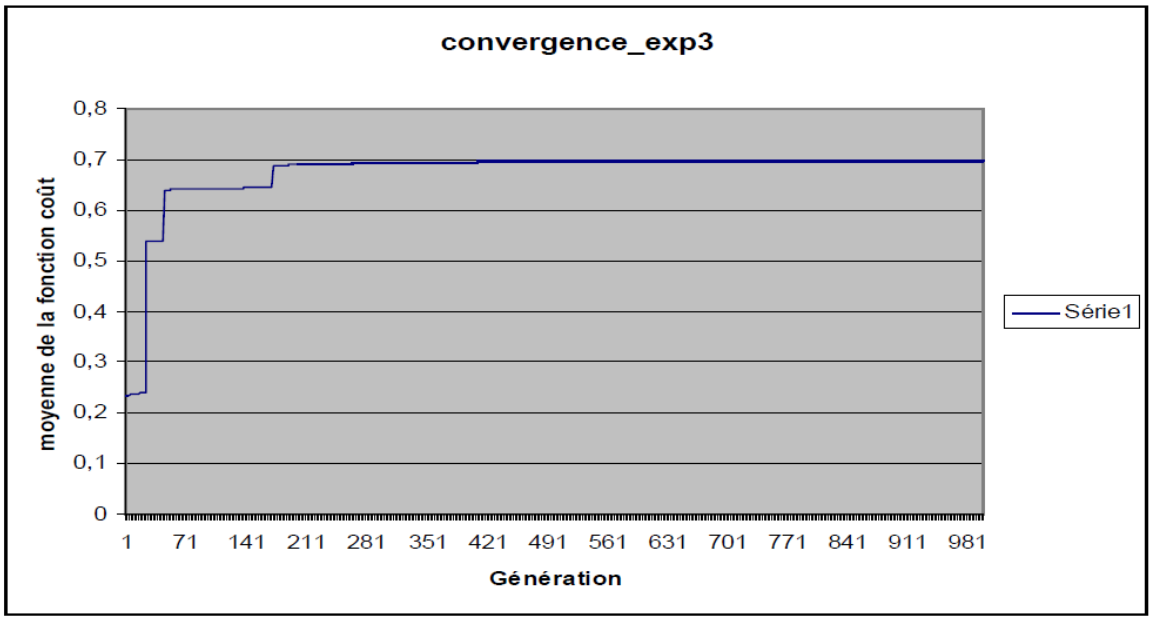


Figure V. 27 : Convergence de l'algorithme

- **4ème exemple :**

  - **Description de l'incident**

Il s'agit dans ce scénario, de quatre perturbations simultannées et séparées (voir figure du réseau ci-après). La recherche d'une solution de régulation s'effectue localement par la création de quatre sociétés d'agents comprenant chacune des agents AH, AO et AE. Chaque société traite chaque perturbation à part. Ensuite, nous contrôlons la faisabilité des solutions simultanément et au cas où deux solutions optimales ne peuvent pas être réalisées au même temps, nous favorisons la régulation de la perturbation la plus prioritaire au dépend de la moins prioritaire pour laquelle nous optons pour la deuxième meilleure solution.

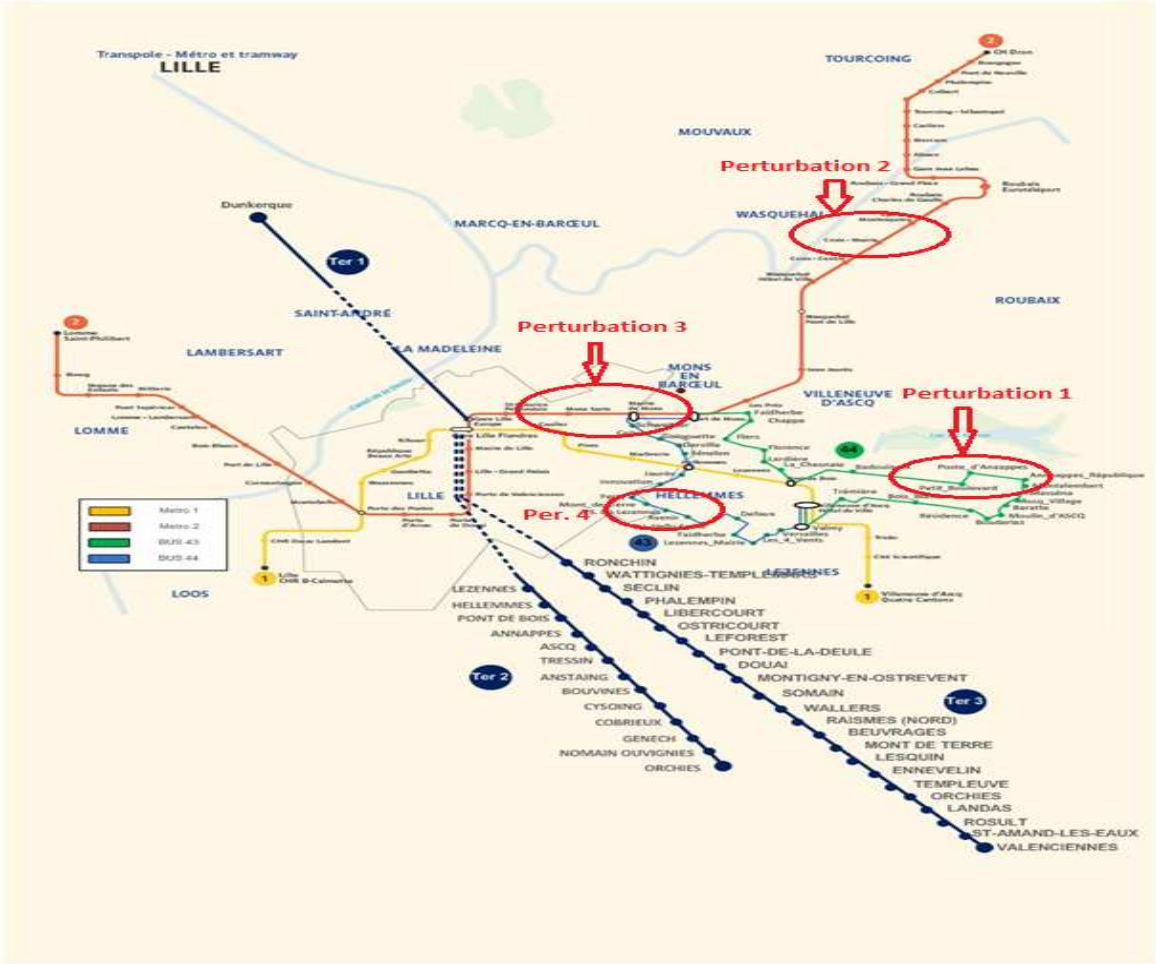


Figure V. 28 : Exemple de plusieurs perturbations simultanées et séparées.

V.5.3. Scénario 3 : Détermination de l'horizon de régulation pour des perturbations chevauchantes

- **Exemple 5**

➢ **Description de l'incident**

Nous considérons ici des perturbations qui touchent simultanément, les trois lignes : ligne 43 sens 1, ligne 44 sens 2 et la ligne métro 1 dans les deux sens. Supposons qu'à 11 :05 un accident de route entre deux véhicules personnels ait lieu sur un tronçon de la ligne 43 pas loin de la station Hellemmes, cette ligne a une fréquence de 1 bus/20 minutes. Cet incident va engendrer un problème de congestion qui bloquera la circulation et causera un retard de 11 minutes pour les véhicules de la ligne perturbée. Suite à ce retard, plusieurs correspondances ne seront pas assurées.

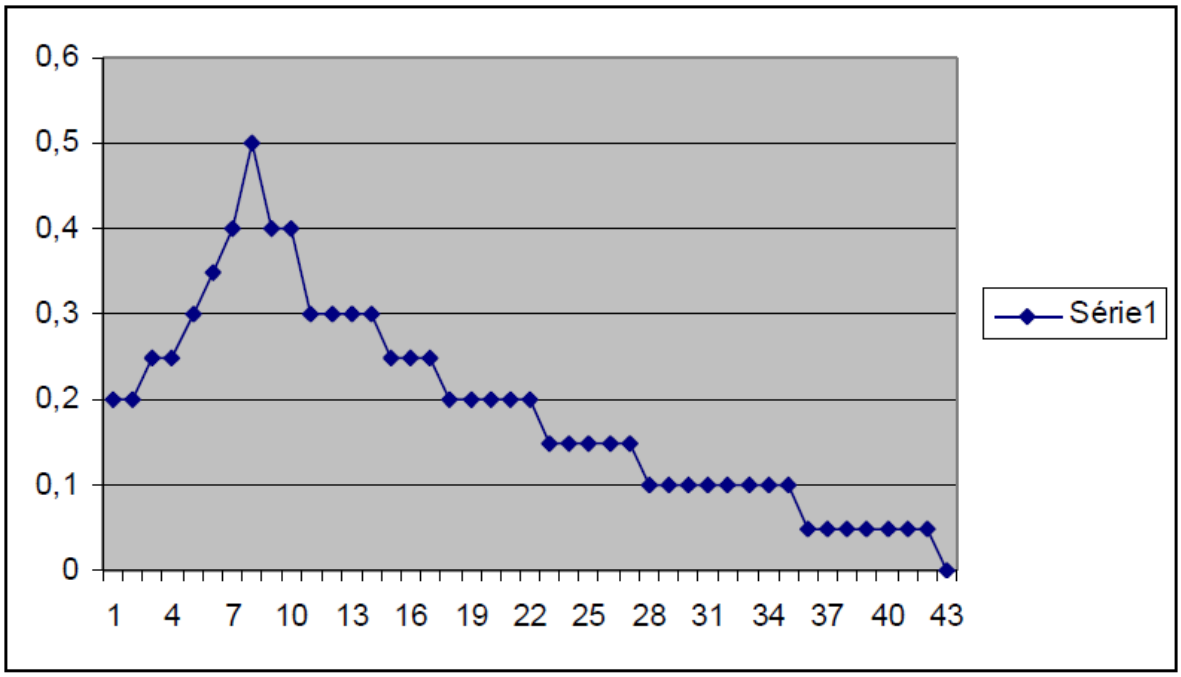


Figure V. 29 : Flux de voyageurs aux arrêtes de la ligne 44 sens 1

- **Détermination de la zone de régulation**

Comme le montre la figure du réseau ci-dessous, les deux perturbations sont chevauchantes. Ainsi, on ne peut pas régler chaque perturbation à part. Il est donc nécessaire de définir un horizon de régulation global qui prend en considération les entités impliquées dans chaque perturbation.

En appliquant l'algorithme de détermination de l'horizon de régulation intégré dans l'agent AH, nous remarquons aussi d'après la figure V.30, que l'horizon H résultant de l'horizon H_1 et H_2 relatifs à ces deux perturbations chevauchantes contient, des véhicules et des stations de la ligne du métro numéro 1, des véhicules et des stations de la ligne de bus numéro 43 et des véhicules et des stations de la ligne de bus numéro 44 pris en considération à cause des correspondances qui ne seront pas effectuées.

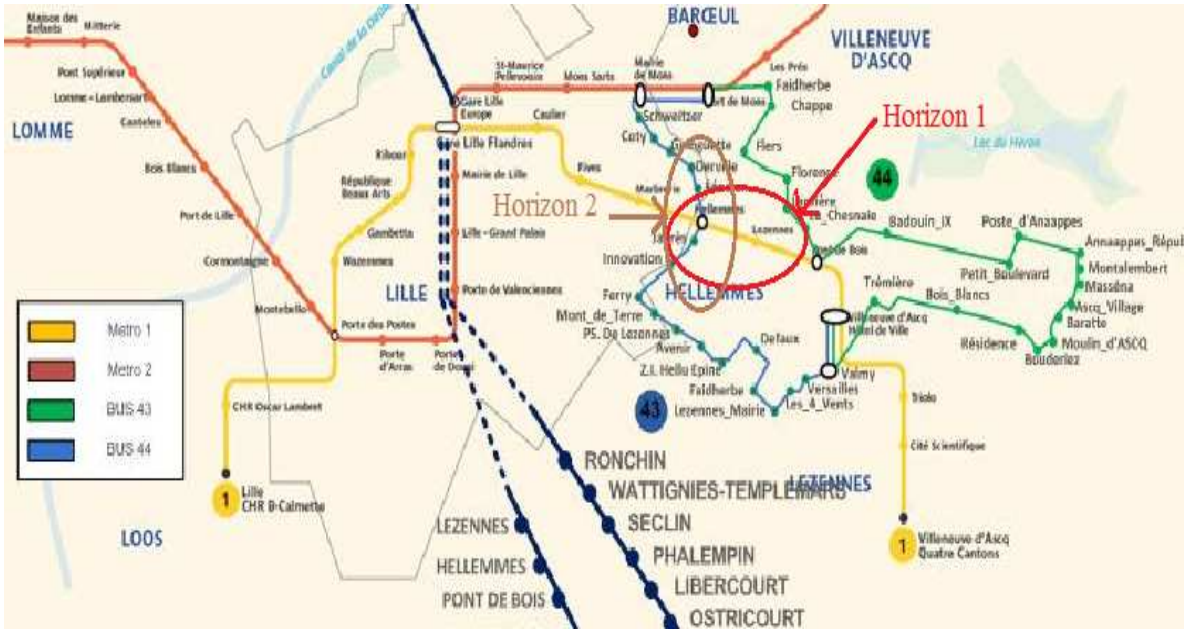


Figure V. 30 : Perturbations simultanées et chevauchantes

- **Génération de décisions**

De même que pour l'exemple précédent, les décisions réalisables d'après la base de règles sont le haut le pied hors ligne et la régulation en ligne. Le haut le pied hors ligne sera appliqué entre la station courante et le noeud de correspondance.

Pour trouver la meilleure solution de type régulation en ligne, nous avons utilisé l'approche agrégative intégrée dans l'agent AE. Nous avons supposé que le régulateur a exprimé ses préférences comme suit :

$$\begin{bmatrix} & WT & TT & RT & KM & SQ \\ WT & 0.15 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ TT & 0.1 & 0.35 & -0.1 & 0 & 0.1 \\ RT & 0.1 & -0.1 & 0.25 & 0.1 & -0.1 \\ KM & 0 & 0 & 0.1 & 0.1 & 0.05 \\ SQ & 0 & 0.1 & -0.1 & 0.05 & 0.15 \end{bmatrix} = I_{\bar{v}}$$

Figure V. 31 : Evaluation des critères par intégrale de Choquet

Le nombre de générations maximales utilisées dans l'algorithme évolutionniste de l'agent AO est de 1000 générations et les opérateurs génétiques utilisés sont les mêmes que pour les exemples précédents. Nous avons pu obtenir de bonnes solutions avec cette approche dont la meilleure est celle montrée ci-dessous.

	$\mu(AT)$	$\mu(TT)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$
HLP	0.27	1	0	0.7	0.4
REL	0.61	0.8	0.22	1	1

Figure V. 32 : Evaluation des critères par intégrale de Choquet

V.6. Communication inter- agents

Pour apercevoir les communications et les comportements des agents, JADE offre des outils graphiques, qui sont eux même des agents, tels que le « RMA » (Remote Management Agent) qui représente l'interface principale d'administration ; l'« introspector » qui permet de contrôler le cycle de vie d'un agent, ses messages ACL échangés et ses comportements ; le « sniffer » qui permet de suivre le cheminement des communications entre les différents agents du système. La partie suivante présente le comportement de l'agent « sniffer » dans les différent cas traités par notre SAR.

V.6.1. Cas d'une perturbation familière

Dans le cas d'une perturbation familière, on a seulement trois agents qui communiquent entre eux : AI, AH et AE.

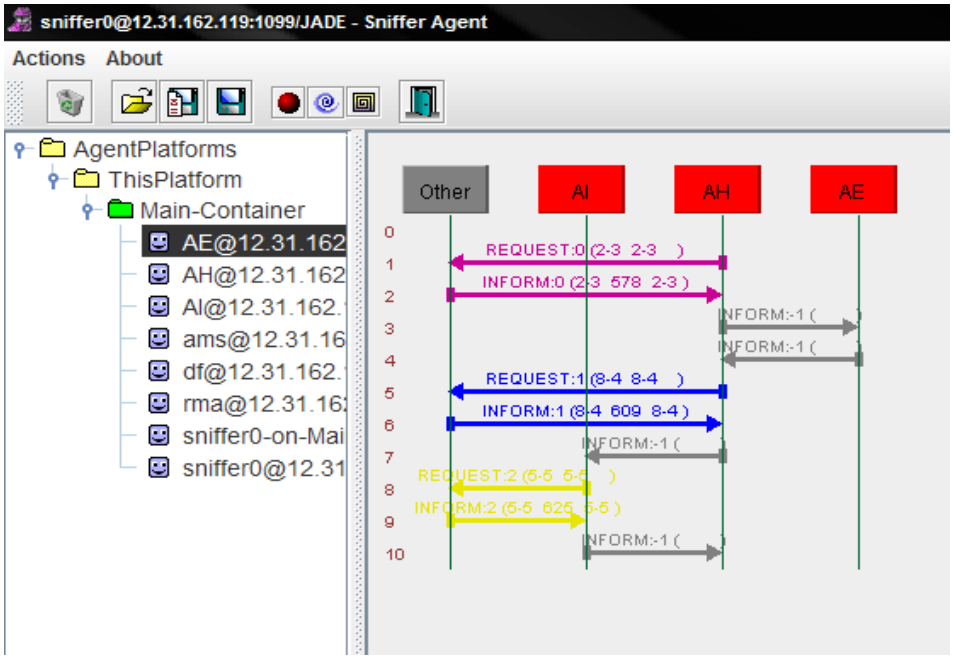


Figure V. 33 : Communication des agents dans le SAR (perturbation familière)

V.6.2. Cas d'une perturbation non familière

Lors d'une perturbation non familière, la communication sera déroulée entre les quatre agents de notre système **:** AI, AH, AO et AE**.** Alors le comportement se visualise comme suit :

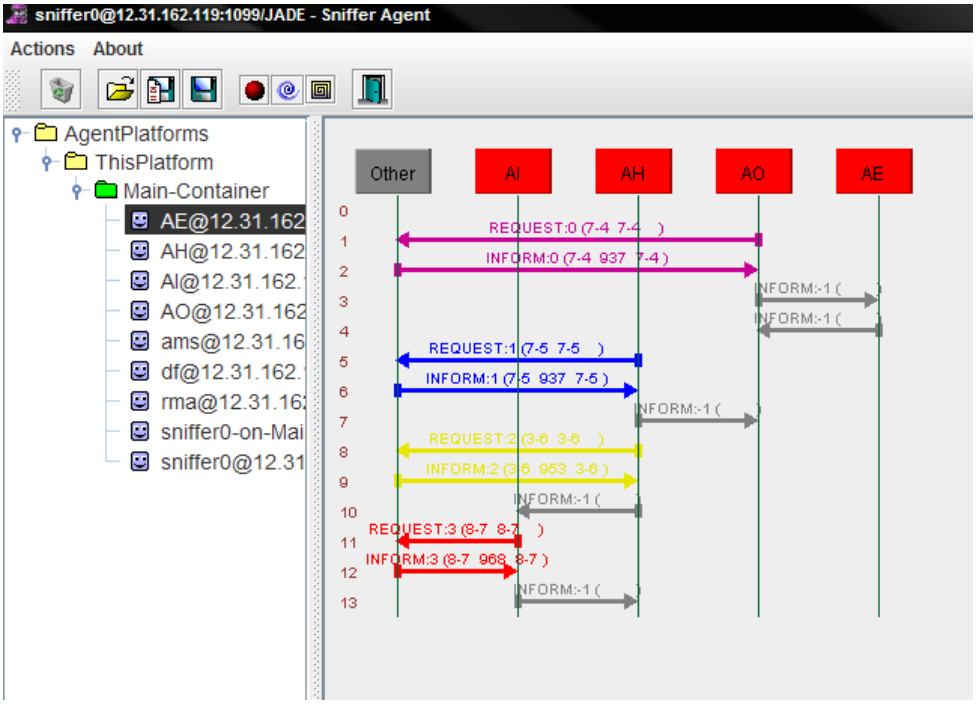
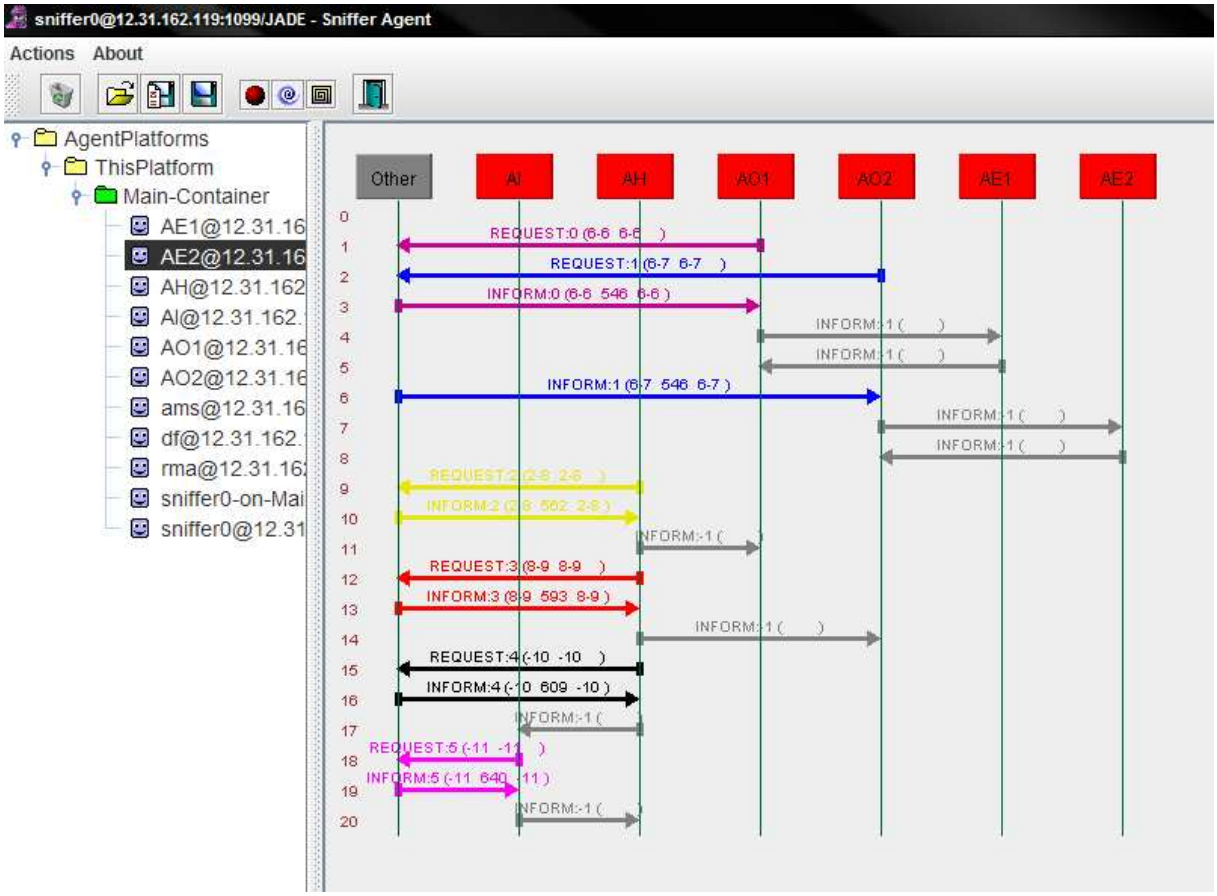


Figure V. 34 : Communication des agents dans le SAR (perturbation familière)

V.6. 3. Cas de deux perturbations simultanées

La présence de plusieurs perturbations simultanées et séparées engendre la création d'un agent AO et d'un agent AE pour chaque perturbation. D'où, la communication entre les différents agents se visualise comme suit:



<u>Figure V. 35</u> : Communication inter-agents dans le SAR (perturbations simultanées)

Dans le cas ou les perturbations sont simultanées et chevauchantes, le système se comporte comme si on a une seule perturbation.

V.7. Conclusion

Tout au long de ce chapitre, Nous avons comparé les différentes plateformes de développement de systèmes multi agents et procédé au choix de la plateforme JADE qui présente les meilleures caractéristiques adéquates à l'implémentation de notre système. Ensuite, nous avons procédé à la présentation de la base de données utilisée. Enfin, nous avons pu dégager plusieurs scénarii de simulations afin de tester les fonctionnalités et les résultats du système d'aide à la décision proposé.

Conclusion générale

Dans ce travail de thèse, nous avons abordé la thématique de la gestion des réseaux de transport multimodal, précisément le problème de régulation qui agit en temps réel pour dissiper les effets des perturbations détériorant la qualité de services offerts par l'exploitant du réseau de transport. L'état de l'art réalisé a montré que les problèmes de transport sont toujours difficiles à résoudre malgré la multitude des améliorations actuelles apportées par l'implantation des systèmes de régulation et de coordination. Dans ce contexte, nous avons proposé un système d'aide à la régulation qui aide les exploitants pour trouver des solutions efficaces lors de présence d'incidents et en particulier, lors de la présence d'une forte perturbation telle que la congestion. En effet, le problème congestion est un phénomène important qui menace la vie urbaine dans les grandes villes des pays. Il s'agit d'une source de perturbation qui handicape la circulation mais aussi d'une distorsion économique en ce sens que les coûts privés diffèrent des coûts sociaux. Pour cela, la recherche de solutions efficaces pour la lutte contre la congestion et toute source de perturbation pouvant affecter les réseaux de transport s'avère d'une importance primordiale. L'objectif de notre travail se situe dans ce cadre.

Au niveau des deux premiers chapitres, nous avons présenté une étude bibliographique sur la gestion des réseaux de transport multimodal et sur le phénomène de congestion comme étant un facteur important de perturbation qui gêne la circulation des moyens de transport. Nous avons étudié aussi les processus de planification et de régulation des systèmes de transport en présence de perturbations. La difficulté de cette dernière tâche exécutée en temps réel nous a amené à déduire la nécessité d'un système d'aide à la décision pour le régulateur.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté la formulation mathématique de notre problème qui introduit deux nouveaux critères de régulation très importants à la fois pour le client et l'exploitant à savoir les kilomètres commerciaux et la qualité de service. En outre, nous avons proposé une méthode de détermination de l'horizon spatio-temporel de régulation pour des perturbations simples mais aussi pour le cas de perturbations simultanées et chevauchantes. Ceci peut aider les régulateurs à bien définir la zone géographique concernée par une perturbation donnée.

Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté un état de l'art des approches utilisées pour la résolution du problème d'optimisation lié à la régulation. En effet, la majorité des approches de régulation existantes ne traitent pas le cas multimodal des réseaux de transport public, limitent le degré d'intervention du régulateur et les correspondances sont souvent traitées par des approches qui ne tiennent pas compte des autres critères de ponctualité, de régularité, etc. Nous avons ainsi, présenté notre méthode évolutionniste d'optimisation basée sur un codage et des opérateurs génétiques pour la résolution du problème de régulation. Cette approche a été utilisée principalement pour la construction des actions de régulation de type « régulation en ligne ». En outre, nous avons, présenté une approche agrégative utilisant une méthode d'évaluation basée sur la théorie des sous-ensembles flous. Cette approche a été par la suite améliorée en introduisant un nouvel opérateur d'agrégation au niveau de la fonction d'évaluation, qui est l'intégrale de Choquet. L'apport de cette intégrale dans l'aide à la régulation du trafic perturbé d'un réseau de transport collectif a été bien apprécié.

Par ailleurs, deux autres approches non agrégatives ont été proposées : l'une est une approche du type Pareto dominance classique mais utilise la méthode d'évaluation floue, afin de pouvoir comparer les objectifs un à un en respectant les préférences du régulateur. L'autre approche est l'une des dernières révélations du domaine des algorithmes évolutionnistes, elle utilise le concept de l'epsilon dominance pour contrôler la diversité des solutions proposées au décideur, afin de ne pas proposer deux solutions sauf si elles sont significativement différentes aux yeux de celui-ci.

Enfin et afin de valider les approches et méthodes proposées, nous avons réalisé au niveau du cinquième chapitre et après avoir implémenté notre système, une série de tests de simulations qui ont prouvé la qualité de nos approches. Les scénarios que nous avons simulés sont très variés et impliquent un nombre de lignes, de véhicules et de stations variables. Ils ont concerné des perturbations simultanées mais aussi chevauchantes.

A travers les résultats obtenus, nous avons pu montrer l'efficacité de nos approches et méthodes présentées à travers l'interaction entre les différents agents considérés dans l'architecture de notre système et en particulier le rôle important des agents AO et AE. Ainsi, la méthode de détermination de la zone de régulation que nous avons développée

nous a aidé à déterminer d'une manière dynamique l'ensemble de stations et des arrêts sur lequel le régulateur doit agir afin de résorber n'importe quelle perturbation.

Les résultats que nous avons pu obtenir nous semblent prometteurs et encourageants pour une application à un plus grand nombre de problèmes. Il serait donc intéressant d'approfondir notre recherche dans les travaux futurs.

Comme perspectives pour le présent travail, nous considérons tout d'abord de calculer la complexité de notre solution. Une solution pertinente à ajouter serait la reconfiguration du réseau de transport qui consiste à changer les itinéraires des véhicules en temps réel en fonction de la carte géographique et des conditions de circulation.

Une autre perspective qui devrait être intéressante pour le système d'aide à la régulation est l'intégration d'autres technologies pour la surveillance des véhicules et l'acheminement de données plus rapidement. Le GPS ainsi que les réseaux véhiculaires (VANET) sont éventuellement des technologies prometteuses pour l'amélioration des performances des réseaux de transport.

Il sera aussi, très utile d'améliorer les approches proposées en testant d'autres algorithmes hybrides plus performants. Ceci passe par l'amélioration des opérateurs et stratégies évolutionnistes utilisées et l'application de ces approches proposées à d'autres domaines tels que l'ordonnancement et le Fret.

Une piste qui semble prometteuse sera l'utilisation de l'intégrale de Choquet avec possibilité de générer les mesures floues sans passer par les indices d'interactions entre les critères.

Bibliographie

[Adamski 98] Adamski A. and Turnau A. : « Simulation support tool for real-time dispatching control in public transport", Transportation Research A, Volume 32, No.2, pp.73-87, 1998.

[Acemoglu et al. 05] Acemoglu D. et Ozdaglar: « Competition and efficiency in congested markets », National bureau of economic research, Marsh 2005.

[Afanassieva 96] L.G.Afanassieva, G.Fayolle et S.Yu.Popov : « Models for Transportation networks », Projet MEVAL, Rapport de recherche INRIA no.2834, mars 1996.

[Alexandre 09] Alexandre Beaudry, G. L. : « Dynamic transportation of patients in hospitals»OR Spectrum, 32(1), 77-107.

[Arnott et al. 93] Arnott R., De Palma A. et Lindsey.: « A structural model of peak period congestion: a traffic bottleneck with elastic demand », American economics review, 1993.

[Bailly 96] E.Bailly : « Etude de la régulation des lignes de métro automatisées : approche par la logique floue », Thèse de doctorat en Automatique et Informatique Industrielle à l'université des sciences et technologies de Lille, No d'ordre 1783, 11 juillet 1996.

[Balbo 00] F.Balbo : « ESAC: un module d'interaction Multi-Agent utilisant l'environnement comme support actif de communication, Application à la gestion des Transports Urbains », Thèse en Informatique, soutenu à Paris IX Dauphine en janvier 2000.

[Bannos 01] Bannos A. (2001): « Le lieu, le moment, le mouvement pour une exploration spatio-temporelle désagrégée de la demande de transport en commun en milieu urbain », thèse de doctorat- université de Franche-Comté, 2001.

[Barichard 04] V. Barichard, « Approches hybrides pour les problèmes multiobjectifs», Thèse de doctorat en informatique de l'université d'Angers, soutenue le 24 Novembre 2003.

[Barla 00] P.Barla, C.Constantatos : « Airline network structure under demand Uncertainty » , Journal of Transportation Research, Part E 36, pp. 173-180, 2000.

[Basseur 05] M. Basseur : « Conception d'algorithmes coopératifs pour l'optimisation multi-objectif : Application aux problèmes

d'ordonnancement de type Flow-shop », Thèse de doctorat en informatique de l'université Lille 1, soutenue le 21juin 2005.

[Belhareth 04] Belhareth T. (2004) : « Transport et structuration de l'espace urbain », Tome 40, 2004.

[Benkhaled 05] I. Benkhaled, M.A. Kamoun, K. Zidi, S. Hammadi, « Vers un système d'information voyageur multimodal (SIM) à base de système multiagents (SMA) ». REE N° 1 Janvier 2005, pp: 41-47.

[Berthier 98] Berthier J-P. : « Congestion urbaine : un modèle de trafic de pointe à courbe débit- vitesse et demande élastique », les cahiers scientifiques du transport N°34/1998- pages 3- 29.

[Borne 03] P.Borne, B.Fayech, S.Hammadi and S.Maouche : « Decision Support System for urban transportation networks », IEEE SMC Part C: Applications and Reviews, Special Issue on Decision Technologies in honour of Prof Madan Singh, Vol.33, No.1, pp.67-77, February 2003.

[Bouchon 95] B.Bouchon-Meunier : « La logique floue et ses applications », Addison-Wesley, octobre 1995.

[Bounsaythip, 98] C.K.Bounsaythip, "Algorithmes heuristiques et évolutionnistes : application à la résolution du problème de placement de formes irrégulières", Thèse de doctorat en Productique, université des sciences et technologies de Lille, 9 octobre 1998.

[Buisson et al. 95] Buisson M-A, Mignot P. : « Evaluation des villes et politiques de transport», les cahiers scientifiques du transport N° 30/1995- pages 19-30.

[Caux & al, 94] C.Caux, H.Pierreval, M.C.Portmann, : « Les algorithmes génétiques et leurs applications aux problèmes d'ordonnancement», Actes des journées d'étude : Ordonnancement et entreprise, applications concrètes et outils pour le futur, 16 et 17 juin 1994, Toulouse, France.

[CETUR 94] CETUR : « Les enjeux des politiques de déplacement dans une stratégie urbaine », 1994.

[CERTU 03] CERTU : « Les systèmes d'aide à l'exploitation et à l'information des transports publics urbains de surface », CERTU 2003.

[Chakroborty et al.95] P.Chakroborty, K.Deb and P.S.Subrahmanyam : « Optimal scheduling of urban transit systems using genetic algorithms », Journal of transportation engineering, novembre-décembre 1995.

[Champion et al.1] A. Champion, R. Mandiau, S. Espié, C. Kolski: « Multi-agent road traffic simulation : Towards coordination by game theory based mechanisms". Proceedings of the agents in traffic and transportation, Workshop in conjuction with the ITS world congress 2001, Sydney, Australia, October 2001.

[Clavel 07] Clavel, R. : « Le covoiturage en France et en Europe, Etat des Lieux et Perspectives, CERTU 2007.

[Chihaib 02] F.Chihaib-Bouzbouz : « Approche floue pour la régulation multimodale dans les réseaux de transport urbain en mode perturbé », Thèse de doctorat en Automatique et informatique industrielle, Université des sciences et technologies de Lille, No d'ordre 3231, 18 décembre 2002.

[Ciesielski & al, 98] V.Ciesielski and P.Scerri, : « Real time genetic scheduling of aircraft landing times", IEEE International Conference on Evolutionary Computation, ICEC98, in D.Fogel (Editor), pp.360-364, Anchorage, May 1998.

[Collette 02] Yann Collette et Patrick Siarry, « Optimisation multiobjectif », éditions Eyrolles, septembre 2002.

[Commission 01] Commission, E.: « European transport policy for 2010 : time to decide.Bruxelles: Commission of the european communities.

[Coquio, 08] J. Coquio : « La performance adaptative des systèmes de transports collectifs. Modélisation, mesures de vulnérabilité et évaluation quantitative du rôle de l'information des voyageurs dans la régulation des situations perturbées », Thèse de doctorat, Université François Rabelais de Tours, 2008.

[Crozet 01] CROZET Y. (2001) : « La tarification d'usage des infrastructures routières : équité, acceptabilité et durabilité », les cahiers scientifiques du transport N°40/2001.

[Crozet et al. 01] CROZET Y., MARLOT G. (2001) : « Péage urbain et ville « soutenable » : figures de la tarification et avatars de la raison économique », les cahiers scientifiques du transport N°40/2001.

[Cure 84] C.Cure et B.Foraste, : « Systèmes d'aide à l'exploitation et algorithmes de régulation", Revue Recherche Transport Sécurité, pp.14-22, juillet 1984.

[Danflous 01] D.Danflous : « Déploiement national des systèmes d'information multimodale, GOFAS : l'exemple suisse », Rapport d'étude, CERTU/CETE Méditerranée (Centre des études techniques et de l'équipement), Octobre 2001.

[Davis 91] L.Davis : « The genetic algorithm Handbook », Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.

[Deb 98] K.Deb and P.Chakroborty, : « Time scheduling of transit systems with transfer considerations using genetic algorithms", Evolutionary Computation 6(1), pp.1-24, 1998.

[Delahaye et al 96] D.Delahaye, N.Durand, J.M.Alliot and M.Schoenauer, "Genetic algorithms for air traffic control systems", ENAC, INFAUTOM'96, Toulouse, France, 14-15 mars 1996.

[De Palma 06] De Palma A., Prosst S. : « Imperfect competition and congestion in the city », Journal of urban economicus N°60/2006, pp : 477- 487.

[Desrochers & al, 99] M.Desrochers, C.V.Jones, J.K.Lenstra, M.W.P.Savelsbergh and L.Stougie, Towards a model and algorithm management for vehicle routing and scheduling problems", Decision Support Systems 25, pp. 109-133, 1999.

[Dridi 04] M.Dridi : « Contribution à la résolution des problèmes de régulation dans les systèmes de transport dans un contexte multicritère par approche évolutionniste », Thèse de doctorat de L'Ecole Centrale de Lille, Soutenue le 06 décembre 2004.

[Dupuy 99] Dupuy, G. : « La dépendance automobile : symptômes, analyses, diagnostic ». Anthropos, Ed. Economica(614-615), 160.

[Dupuy 99] Dupuy G. : « From the "magic circle" to "automobile dependance": measurements and political implications», Transport Policy 6 (1999), pp:1-17.

[Fan 04] W. Fan and R. B. Machemehl : « A tabu search based heuristic method for the transit route network design problem », Proceedings of the International conference on computer-aided scheduling of public transportation, San Diago, California, August 9-11, 2004.

[Fayech 03] B.Fayech : « Régulation des réseaux de transport multimodal : systèmes multi-agents et algorithmes évolutionnistes », Thèse de doctorat en Automatique et informatique industrielle, Université des sciences et technologies de Lille, No d'ordre 3349, 14 octobre 2003.

[Feki 10] Feki, M. F. : « Optimisation distribuée pour la recherche des itinéraires multi-opérateurs dans un réseau de transport co-modal », Ecole Centrale de Lille.

[Ferber, 95] J.Ferber : « Les Systèmes Multi-Agents : Vers une intelligence collective », Informatique et Intelligence Artificielle, InterEditions, Paris, 1995.

[Florez, 99] J R.A.Florez-Mendez: «Towards a Standardization of Multi-Agent System Frameworks», ACM Crossroads Student Magazine, Canada, 1999.

[Fraichard 05] Fraichard, T. : « l'alternative à la voiture particulière ». Navigation, 53(209), 53-75, 2005.

[Fogel, 94] L.J. Fogel, : « Evolutionary programming in perspective: the top-down view », Computational Intelligence, Imitating Life, Zurada & al editors, IEEE Press, pp.135-146, June 1994.

[Gandibleux 95] X. Gandibleux. « Système d'aide à décision pour la conduite de processus perturbés ; une approche hybride fondée sur l'intelligence artificielle, la programmation linéaire et l'aide multicritère à la décision », thèse de doctorat de l'université de Valenciennes, France, 1995.

[Ghaffari 99] A.Ghaffari : « Modélisation d'une ligne de métro en tenant compte du flux des passagers », Rapport de DEA en Informatique Industrielle à l'université des sciences et technologies de Lille, juin 1999.

[Jebsi 05] JEBSI, K. et LIONEL T. (2005) : « Tarification d'un bien soumis à la congestion », revue économique- Vol.56.N°3, Mai 2005.

[Gille 06] Gille, A. (2006) : « La co-modalité outil du développement durable » Mendeley, Éd. Transports, 16.

[Glover 86] F. Glover, « Future paths for integer programming and links to artificial intelligence », Computers and Operations Research 5 : 533-549, 1986.

[Goldberg 98] D.E.Goldberg : « Genetic algorithms in search, optimisation and machine Learning », Addison-Wesley, 1989.

[Greenwood, 05] D.Greenwood. JADE Web Service Integration Gateway (WSIG). Whitestein Technologies. Jade Tutorial. AAMAS 2005.

[Hansen 03] J.V.Hansen : « Genetic search in air traffic control », Corrected proof, Computers & Operations Research, to appear in 2003.

[Hansen 86] P.Hansen, « The steepest ascent mildest descent heuristic for combinatorial programming », In Numerical Methodes in combinatorial optimization, Capri, Italy, 1986.

[Hartani 95] R. HARTANI : « Modélisation des systèmes fous : Contributions théoriques et applications », thèse de doctorat, université de Paris 6, 1995.

[Hayat 93] S. HAYAT, Modélisation de la régulation de trafic des lignes de métro basée les approches neurofloues, rapport interne INRETS, juin 1993.

[Hayat 05] S. HAYAT : « Amélioration de la qualité des correspondances dans les réseaux de transports urbains », rapport interne INRETS, 2005.

[Heran 01] Heran F. : « La réduction de la dépendance automobile », Cahiers Lillois d'Economie et de Sociologie, pp : 61- 68.

[Huissman 01] D. Huisman, R.Freling, A.P.M.Wagelmans : « A Dynamic Approach to Vehicle Scheduling », Econometric Institute, Erasmus University Rotterdam, Netherlands, Report EI2001-17 (accepted for Transportation Science (focussed issue on Real-time Fleet Management) on August 22, 2002 with a new title : « A Robust Solution Approach to the Dynamic Vehicle Scheduling Problem ».

[Holland, 92] J. Holland, : « Adaptation in natural and artificial systems», Second Edition, MIT Press, 1992.

[Issaai 00] M.T.Isaai, M.G.Singh, Fellow : « An object-oriented, Constraintbased Heuristic for a class of passenger-train scheduling problems », IEEE Transactions on SMC, part C, Applications and Reviews, vol.30, NO.1, February 2000.

[Jade tutorials] http://jade.tilab.com/doc/tutorials/JADEProgramming-Tutorial-for-beginners.pdf .

[Kammoun 07] Kamoun, M. A.: « Conception d'un système d'information pour l'aide au déplacement multimodal : Une approche multi-agents pour la recherche

et la composition des itinéraires en ligne ». Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, Lille 2007.

[Kirkpatrick 82] Kirkpatrick S., Gelatt C.D, Vecchi M.P: « Optimization by simulated annealing. », Science, 220: 671-680, 1983.

[Laichour 02] H.Laïchour : « Modélisation multi-agent et aide à la décision: application à la régulation des correspondances dans les réseaux de transport urbain », Thèse de doctorat en Automatique et informatique industrielle, Université des sciences et technologies de Lille, No d'ordre 3239, 20 décembre 2002.

[Lamure 98] LAMURE, C. (1998): « Automobiles pour la ville à l'horison 2010 », ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Paris 1998.

[Laurent 10] Laurent, G. : « Modélisation et Optimisation de la Gestion Opérationnelle du Trafic Ferroviaire en cas d'Aléas ». Thèse de doctorat, École doctorale de Mathématiques et Informatique - Université de Bordeaux, Bordeaux.

[Lebacque 02] J.P.Lebacque : « Modélisation des réseaux multimodaux », Groupe de travail multimodalité, INRETS Paris, 07 février 2002.

[Li et al.91] Y.Li, J.M.Rousseau and M.Gendreau : « Real-Time Scheduling on a Transit Bus Route: A 0-1 Stochastic Programming Model », Rapport de recherche PUB-772, Centre de Recherche sur le Transport, CRT, Université de Montréal, May 1991.

[Liesbeth 04] Liesbeth J. et Macioto J.: « Nouvelle étude INFRAS/IWW sur l'impact environnemental des transports présentés à Bruxelles », communiqué de presse N°198- Bruxelles/Paris, 2004.

[Mankiw 98] Mankiw, N. G (1998) : « Principes de l'économie », Economica 1998, pp : 655- 674.

[Mejri et al.09] Mejri H. Indiaye A. : « La lutte contre la congestion urbaine et la disposition à payer des usagers : cas de la grande ville de Tunis ». IEEE international workshop sur le thème : Logistique et transport, 22-24 mars 2009.

[Mejri et al.11a] Mejri H., Jeribi K., Zgaya H., Hammadi S. (2011): « Vehicule Sharing Services Optimization Based on Multi-Agent Approach », 18th World

Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC 2011), August 28- September 2, 2011, Milano, Italy.

[Mejri et al.11b] Mejri H., Jeribi K., Zgaya H., Hammadi S. : « Distributed Graphs for Solving Co-modal Transport Problems », 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2011), 5-7 October, Washington DC, USA.

[Mejri et al.12] Mejri H. Jeribi K., Zgaya H., Hammadi S. (2012) : « Combination of an Evolutionary Approach and Multi-agent Coalition in a co-modal Transport System », 10th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems, 28-30th March, 2012, University of Salamanca, Spain.

[Melki, 08] A. Melki: «Système d'aide à la régulation et l'évaluation des transports multimodaux intégrant les cybercars », Thèse de doctorat en Automatique et Informatique Industrielle, Ecole Centrale de Lille, 28 Novembre 2008.

[Mer 07] Mer, M. d : « La situation des transports et de la mobilité au terme de l'année 2006 », sur http://www.developpement-durable.gouv.fr/Etude-transports-et-mobilite-au,3403.html

[Mesghouni 02] K. Mesghouni, E. Castelain : « Regulation of a public transport network with consideration of the passenger flow: modelling of the system with high-level Petri nets », IEEE SMC, Hammamet, Tunisia, 6-9 October 2002.

[Meskine 01] A.Meskine et P.Gendre : « Algorithmes et calculs d'optimisation d'itinéraires pour l'information multimodale », Rapport d'étude, CERTU/EMSE (Ecole des Mines de Saint-Étienne et Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les onstructions urbaines), Novembre 2001.

[Mirabel 99] Mirabel, F. (1999) : « Répartitions modales urbaines, externalités et instauration de péages : le cas des externalités de congestion et des « externalités croisées » », 1999.

[Michalewicz, 94] Michalewicz Z.: « Genetic algorithms + Data structures = Evolution programs », second extended Edition, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 1994.

Nelson [04] Nelson R. (2004) : « Les limites de l'économie de marché », sciences économiques N°2.862, Novembre 2004, pp : 40- 44.

[Ngamchai 00] S.Ngamchai and D.J.Lovell : « Optimal time transfer in bus transit route network design using genetic algorithms », 8th international Conference CASPT, Computer Aided Scheduling of Public Transportation, Berlin, Germany, 21-23 June 2000.

[Ouldsidi 04b] MM. Ould Sidi, S. Hammadi, S. Hayat, P. Borne : « Approche floue d'un système d'évaluation des stratégies de régulation d'un réseau de transport perturbé », Journées francophones de la logique floue et ses applications, 17-18 Novembre 2004, Nantes, France.

[Ouldsidi 06] MM. Ould Sidi : « contribution à l'amélioration des systèmes d'aide à la décision pour la régulation du trafic des réseaux de transport collectif », Thèse de doctorat de l'université de Lille 1, 2006.

[Pini 00] PiniG., Torricelli G.P., Martinelli A., Widmer G. (2000) : « Indicateurs d'accès pour une mobilité durable », Berne, 2000.

[Pierreval & al, 03] H.Pierreval, C.Caux, J.L.Paris and F.Viguier :« Evolutionary approaches to the design and organization of manufacturing systems », Computers and Industrial Engineering, Vol.44, pp.339-364, 2003.

[Potvin, 96] J.Y.Potvin, : « Genetic algorithms for the travelling salesman problem », Annals of Operation Research, Netherlands, 63, pp.339-370, 1996.

[Prud'homme 00] Prud'homme R., Ming SunY. : « Le coût économique de la congestion du périphérique parisien : une approche désagrégée », cahiers scientifiques du transport N°37/2000.

[Raffaud 00] Raffaud F. (2000): « L'urbain, l'environnement et le développement durable en France », Thèse de doctorat, essai d'analyse- revue d'urbanisme 1964- 2000.

[Renders, 95] J.M.Renders, : « Algorithmes génétiques et réseaux de neurones », Hermès, Paris, 1995.

[Reymond 03] Reymond M. :« Analyse comparative des instruments tarifaires d'internalisation de la congestion en milieu urbain : quels choix pour le décideur ? », Lyon, Septembre 2003.

[Reymond 05] Reymond M. : « La tarification de la congestion automobile : acceptabilité sociale et redistribution des recettes du péage », thèse de doctorat, université Montpellier I, Décembre 2005.

[Rousseau 85] J.M.Rousseau and J.Y.Blais : « HASTUS: An interactive systems for buses ans crew scheduling », Computer Scheduling of Public Transport-2, J.M.Rousseau ed., pp.45-60, Amsterdam, North Holland, 1985.

[Roze 03] Roze, C. P. : « Organisation multi-agents au service de la personnalisation de l'information ». Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Valenciennes, France 2003.

[Roze, 03] Roze, C. P.: « Organisation multi-agents au service de la personnalisation de l'information», Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Valenciennes, France, 2003.

[Salim et al.97] V.Salim and X.Cai : « A genetic algorithm for railway scheduling with environmental considerations», Environmental Modelling and Software, Vol.12, No.4, pp.301-309, 1997.

[Schwefel 97] H.P.Schwefel and T.Bäck : « Artificial Intelligence: How and why? », Genetic Algorithms and evolution strategies in engineering and computer science, Edited by D.Quagliarella & al, J.Wiley Editions, 1997.

[Sghaier 11] Sghaier M : « Combinaison des techniques d'optimisation et de l'intelligence artificielle distribuée pour la mise en place d'un système de covoiturage dynamique », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, Lille, 2011.

[Sommerlatt 02] Isabelle Sommerlatt : « Incitation et contrôle en univers multiinstitutionnel: Nature et rôle d'outils d'aide à la décision. Application à l'amélioration de la qualité de service dans les transports urbains », thèse de doctorat de l'université Paris-Dauphin, juillet 2002.

[Soulhi 00] A.Soulhi : « Contribution de l'intelligence artificielle à l'aide à la décision dans la gestion des systèmes de transport urbain collectif », Thèse de doctorat à l'université des sciences et technologies de Lille, 18 janvier 2000.

[Stevens 95] G.Stevens : « An approach to scheduling aircraft landing times using genetic algorithms », Honours thesis, RMIT, Department of Computer Science, November 1995.

[Stopher P.R.] Stopher P.R. : « Reducing road congestion: a reality check», Transport Policy 11 (2004), pp: 117-131.

[Sycara 98] K.P.Sycara : « Multi-agent Systems », American Association for Artificial Intelligence, AI Magazine, pp.79-92, Eté 1998.

[Tortel 01] Tortel, L. : « La voiture, cet incontournable objet du désir : le rapport de l'individu à la voiture : approche psychologique, approche sémiologique, approche philosophique, approche sociologique », Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU), Transport/Transportation.

[Valouxis] C.Valouxix and E.Housous : « Combined bus and driver scheduling », Computers and Operations Research 29, pp.243-259, 2002.

[Varian 02] VARIAN H. R : « Introduction à la micro- économie », 5 ème édition 2002.

[Wren 00] A.Wren, R.S.K.Kwan and A.S.K.Kwan : « Hybrid genetic algorithm for scheduling bus and train drivers », Report 2000.05, School of Computer Studies, University of Leeds, UK, February 2000.

[Wren 98] A.Wren : « Heuristics ancient and modern: transport scheduling through the ages », Journal of Heuristics, 4, pp.87-100, Kluwer Academic Publishers, 1998.

[Wynter 03] L.Wynter et P.Lolito : « Boîte à outils affectation du trafic de Scilab : étude sur l'analyse de transport en région périurbaine », 10ème rencontre INRIA-Industrie, Applications de l'informatique et de l'automatique aux transports, Paris-Rocquencourt, 16 janvier 2003.

[Yan 97] S.Yan and Y.P.Tu : « Multifleet routing and multistop flight scheduling for schedule perturbation », European Journal of Operational Research, Vol.103, Issue 1, pp.155-169, November 1997.

[Zgaya 07] Zgaya, H. (2007) : « Conception et optimisation distribuée d'un système d'information d'aide à la mobilité urbaine : Une approche multi-agent pour la recherche et la composition des services liés au transport », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, Lille, 2007.

[Zidi 07] B. Zidi : « Système d'aide à la régulation et la reconfiguration des réseaux de transport multimodal », Thèse de doctorat en Automatique et Informatique Industrielle, Université des Sciences et Technologies de Lille, 04 Juillet 2007.

[Zhu 95] Zhu K.Q. : « A New Genetic Algorithm for VRPTW », IC-AI 2000, Las Vegas, USA.

Annexes

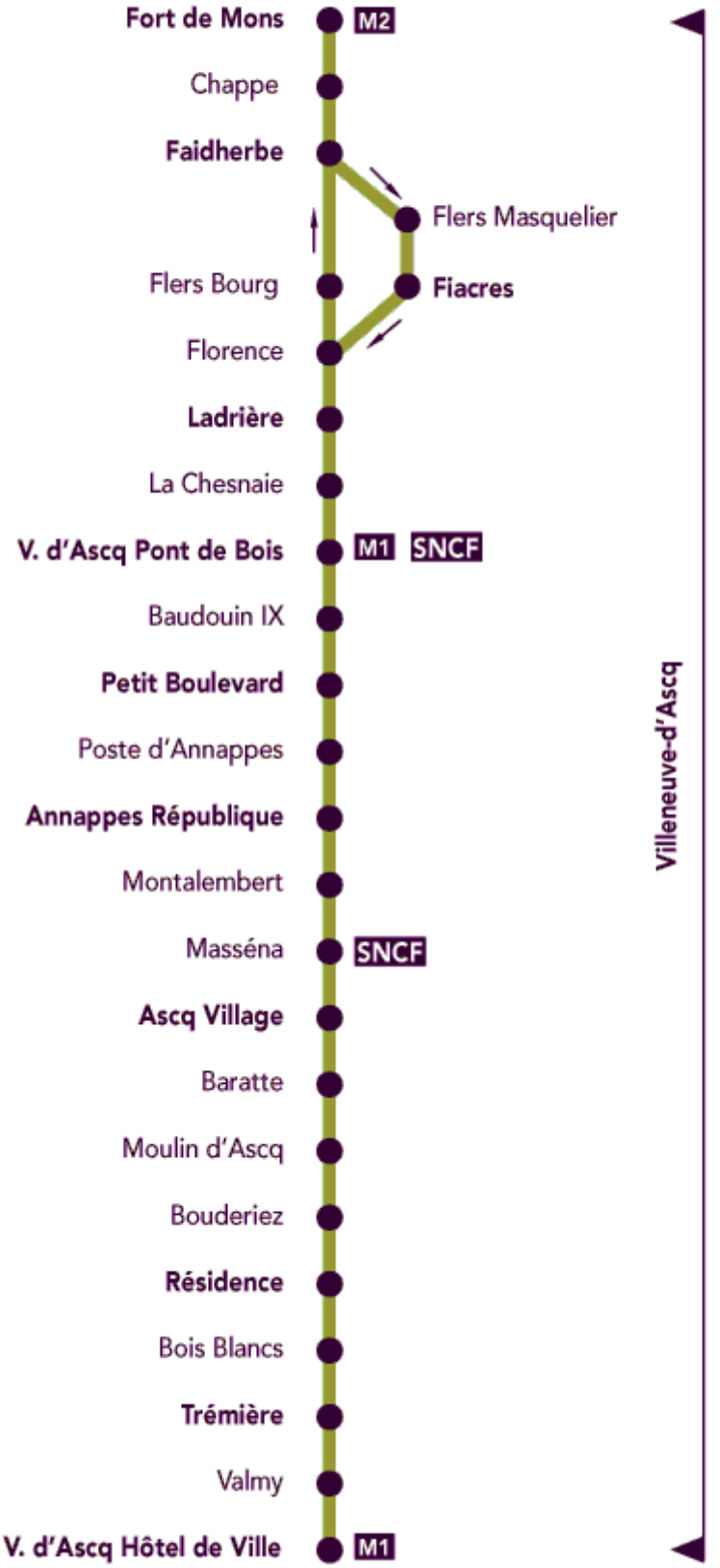
<u>Annexe 1</u> : Les lignes de Transpole utilisées dans les scénarios

Le site de l'exploitant du réseau de transport lillois, www.transpole.fr nous a permis de récupérer les différentes données concernant les 2 lignes de bus (43 et 44) et les 2 lignes de métro (1 et 2) du réseau de Transpole qui ont fait l'objet de nos tests de simulation.

TMT de la ligne 43

FORT DE MONS	7.13	7.25	7.35	7.45	7.55	8.05	8.17	8.27	8.37	8.45	8.55	9.05	9.15	9.25	9.35	9.50	10.05	10.20	10.35	10.50	11.05	11.20	11.35	11.46	11.57
FAIDHERBE	7.17	7.29	7.39	7.49	7.59	8.09	8.21	8.31	8.41	8.49	8.59	9.09	9.19	9.29	9.39	9.54	10.09	10.24	10.39	10.54	11.09	11.24	11.39	11.50	12.01
FIACRES	7.19	7.31	7.41	7.51	8.01	8.11	8.23	8.33	8.43	8.51	9.01	9.11	9.21	9.31	9.41	9.56	10.11	10.26	10.41	10.56	11.11	11.26	11.41	11.52	12.03
LADRIERE	7.21	7.34	7.44	7.53	8.03	8.14	8.26	8.36	8.46	8.53	9.03	9.13	9.23	9.33	9.43	9.58	10.13	10.28	10.43	10.58	11.13	11.28	11.43	11.54	12.05
V. D'ASCQ PONT DE BOIS	7.25	7.38	7.48	7.57	8.07	8.18	8.30	8.40	8.50	8.58	9.07	9.17	9.27	9.37	9.47	10.02	10.17	10.32	10.47	11.02	11.17	11.32	11.47	11.58	12.09
PETIT BOULEVARD	7.29	7.42	7.53	8.01	8.11	8.23	8.35	8.44	8.54	9.02	9.11	9.21	9.31	9.41	9.51	10.06	10.21	10.36	10.51	11.06	11.21	11.36	11.51	12.02	12.13
ANNAPPES REPUBLIQUE	7.31	7.45	7.55	8.04	8.14	8.25	8.37	8.47	8.57	9.04	9.13	9.23	9.33	9.43	9.53	10.08	10.23	10.38	10.53	11.08	11.23	11.38	11.53	12.04	12.16
ASCQ VILLAGE	7.36	7.50	8.01	8.09	8.19	8.31	8.43	8.52	9.02	9.09	9.17	9.27	9.37	9.48	9.58	10.12	10.27	10.42	10.57	11.12	11.28	11.43	11.58	12.09	12.21
RESIDENCE	7.41	7.55	8.06	8.14	8.24	8.36	8.48	8.57	9.07	9.14	9.22	9.32	9.42	9.53	10.03	10.17	10.32	10.47	11.02	11.17	11.33	11.48	12.03	12.14	12.26
TREMIERE	7.43	7.57	8.08	8.17	8.27	8.39	8.51	8.59	9.09	9.16	9.24	9.34	9.44	9.55	10.05	10.19	10.34	10.49	11.04	11.19	11.35	11.50	12.05	12.16	12.28
V. D'ASCQ HOTEL DE VILLE	7.47	8.01	8.12	8.21	8.31	8.43	8.55	9.03	9.13	9.20	9.28	9.38	9.48	9.59	10.09	10.23	10.38	10.53	11.08	11.23	11.39	11.54	12.09	12.20	12.32

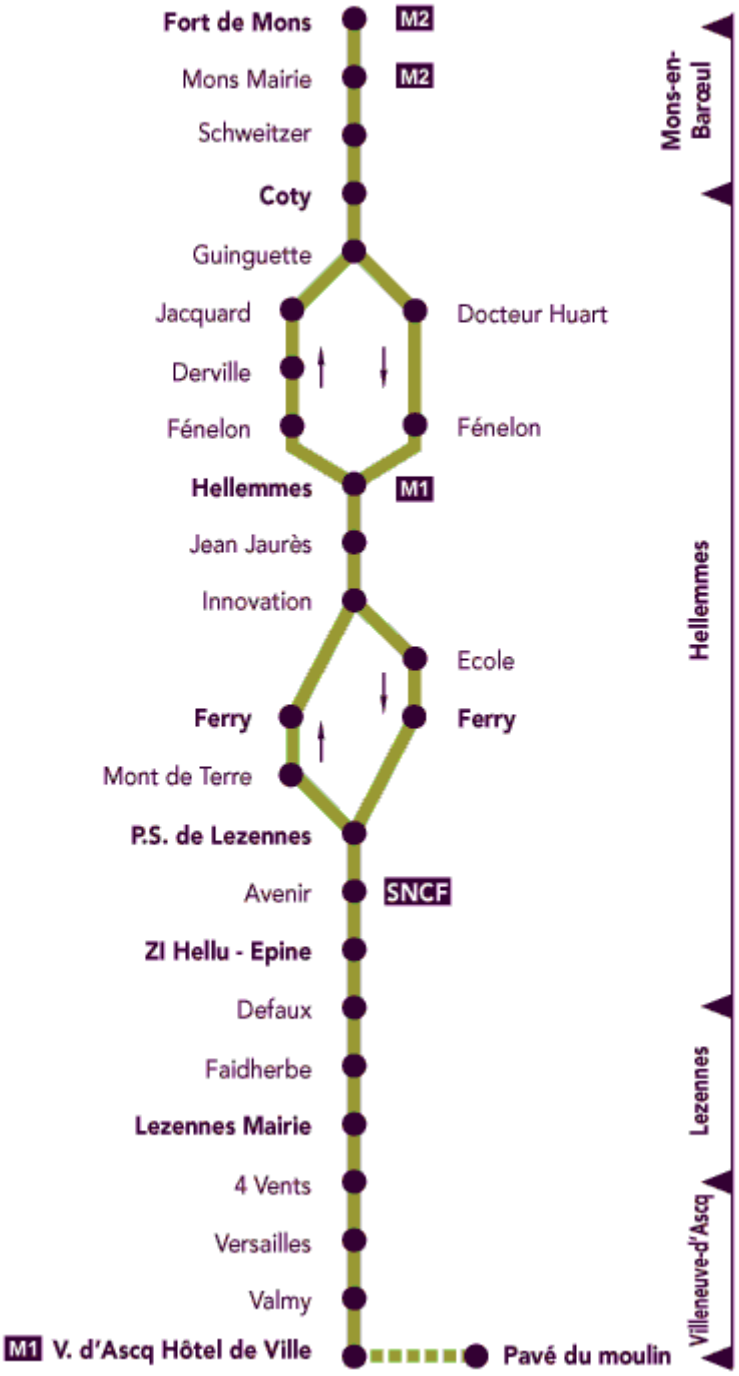
Ligne 43


Fort de Mons
M2
Chappe
Faidherbe
Flers Masquelier
Flers Bourg
Fiacres
Florence
Ladrière
La Chesnaie
V. d'Ascq Pont de Bois
M1
SNCF
Baudouin IX
Petit Boulevard
Poste d'Annappes
Annappes République
Montalembert
Masséna
SNCF
Ascq Village
Baratte
Moulin d'Ascq
Bouderiez
Résidence
Bois Blancs
Trémière
Valmy
V. d'Ascq Hôtel de Ville
M1
Villeneuve-d'Ascq

TMT de la ligne 44

FORT DE MONS	7.05	7.17	7.27	7.36	7.46	8.00	8.10	8.18	8.29	8.39	8.51	8.59	9.09	9.17	9.30	9.46	10.02	10.18	10.34	10.50	11.06	11.19	11.38	11.53
COTY	7.09	7.21	7.31	7.40	7.50	8.04	8.14	8.22	8.33	8.43	8.55	9.03	9.13	9.21	9.34	9.50	10.06	10.22	10.38	10.54	11.10	11.23	11.42	11.57
HELLEMMES	7.16	7.28	7.38	7.47	7.57	8.11	8.21	8.29	8.40	8.50	9.02	9.10	9.20	9.28	9.41	9.58	10.14	10.29	10.45	11.01	11.17	11.30	11.49	12.04
FERRY	7.21	7.33	7.43	7.52	8.01	8.15	8.26	8.34	8.45	8.54	9.06	9.14	9.24	9.32	9.45	10.02	10.18	10.33	10.49	11.05	11.21	11.34	11.53	12.08
P.S. DE LEZENNES	7.23	7.35	7.45	7.54	8.03	8.17	8.28	8.36	8.47	8.56	9.08	9.16	9.26	9.34	9.47	10.04	10.20	10.35	10.51	11.07	11.23	11.36	11.55	12.10
Z.I. HELLU EPINE	7.25	7.37	7.47	7.56	8.05	8.19	8.30	8.38	8.49	8.58	9.10	9.18	9.28	9.36	9.49	10.06	10.22	10.37	10.53	11.09	11.25	11.38	11.57	12.12
LEZENNES MAIRIE	7.29	7.41	7.51	8.00	8.09	8.23	8.34	8.42	8.53	9.02	9.14	9.22	9.32	9.40	9.53	10.10	10.26	10.41	10.57	11.13	11.29	11.43	12.02	12.17
V. D'ASCQ HOTEL DE VILLE	7.37	7.49	7.59	8.08	8.17	8.31	8.42	8.50	9.01	9.10	9.22	9.30	9.39	9.47	10.01	10.18	10.34	10.49	11.04	11.20	11.36	11.51	12.10	12.25
PAVE DU MOULIN	.	.	.	.	8.22	.	.	8.55	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	11.56	.	.
V. D'ASCQ HOTEL DE VILLE	.	.	.	.	8.27	.	.	9.00	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	12.01	.	.

Ligne 44


Fort de Mons
M2
Mons Mairie
M2
Schweitzer
Coty
Guinguette
Jacquard
Docteur Huart
Derville
Fénelon
Fénelon
Hellemmes
M1
Jean Jaurès
Innovation
Ecole
Ferry
Ferry
Mont de Terre
P.S. de Lezennes
Avenir
SNCF
ZI Hellu - Epine
Defaux
Faidherbe
Lezennes Mairie
4 Vents
Versailles
Valmy
M1 V. d'Ascq Hôtel de Ville
Pavé du moulin
Mons-en-Barœul
Hellemmes
Lezennes
Villeneuve-d'Ascq

Ligne du métro 1 et TMT



Premiers et derniers départs.

Station C.H.R B - CALMETTE

1er départ vers :	4 Cantons	CHR B Calmette
Du lundi au samedi	5h12	X
Dimanche et jours fériés	6h24	X

Dernier départ vers :	4 Cantons	CHR B Calmette
Du lundi au Dimanche	0h21	X

Fréquences de passage

	Heures de pointes	Heures creuses	Soirée
Semaine	1 minute	2 à 3 minutes	4 à 6 minutes
Samedi	2 minutes	3 minutes	4 à 6 minutes
Dimanche et jours fériés	3 minutes	4 à 6 minutes	4 à 6 minutes

Ligne du métro 2 et TMT



Premiers et derniers départs.

Station ST PHILIBERT

1er départ vers :	Lomme St Philibert	Tourcoing C.H Dron
Du lundi au samedi	X	5h12
Dimanche et jours fériés	X	6h24

Dernier départ vers :	Lomme St Philibert	Tourcoing CH Dron	Fort de Mons
du lundi au dimanche	X	23h40	0h10

Fréquences de passage

	Heures de pointes	Heures creuses	Soirée
Semaine	1 minute	2 à 3 minutes	4 à 6 minutes
Samedi	2 minutes	3 minutes	4 à 6 minutes
Dimanche et jours fériés	3 minutes	4 à 6 minutes	4 à 6 minutes

Liaison entre les deux lignes de metros



Résumé:

Un système d'aide à la régulation d'un réseau de transport multimodal perturbé : réponse au problème de congestion

Les réseaux de transport se sont amplifiés par l'accroissement du nombre des véhicules et des stations ainsi que l'apparition de nouvelles notions essentiellement la multimodalité et l'intermodalité. Ainsi, la tâche de gestion des réseaux de transport collectif est devenue très complexe et difficile pour les régulateurs. Pour faire face à ces difficultés, on note le développement des systèmes d'aide à la décision comme solution efficace de régulation de la circulation. Ils permettent de transmettre en temps réel les informations concernant le trafic sur les réseaux de transport.

Notre travail se base sur la conception d'un système de régulation des réseaux de transport multimodal. Il peut se révéler comme un outil primordial pour apporter des solutions efficaces et en temps réel à la problématique de la congestion routière. Il peut communiquer l'information nécessaire à l'usager afin de prendre sa décision de déplacement avec ou sans sa voiture. Le système proposé est une approche hybride entre une modélisation par graphes du réseau et un système multi-agents. Ceci sera appuyé par une approche évolutionniste pour la génération d'une solution de régulation optimale. Ce choix est justifié par le caractère ouvert, distribué et complexe des réseaux de transport multimodal.

Mots clés : Congestion urbaine, développement durable réseaux de transport multimodal (RTM), aide à la décision, modèles distribués, Systèmes multi-Agents, algorithmes évolutionnistes.

Summary

A support system for the regulation of a multimodal transportation network disruption: response to the problem of congestion

Transport networks have been amplified by the increasing number of vehicles and stations and the emergence of new concepts essentially multimodal and intermodal. Thus, the task of managing public transport systems has become very complex and difficult for regulators. To cope with these difficulties, there is the development of systems decision support as an

effective solution to traffic control. They can transmit real-time traffic information on transport networks.

Our work is based on designing a control system of multimodal transport networks. It may be as an essential tool for effective solutions and real-time to the problem of traffic congestion. It can provide the necessary information to the user in making its decision to move with or without his car. The proposed system is a hybrid between a graph modeling the network and a multi-agent system. This will be supported by an evolutionary approach for generating an optimal control solution. This is justified by the open, distributed and complex network of multimodal transport.

Keywords : Urban congestion, sustainable development, multimodal transport networks (RTM), decision support, distributed models, multi-agent systems, evolutionary algorithms