

N° d'ordre : 4001

Université des Sciences et Technologies de Lille  
Ecole Centrale de Lille

## THESE

Présentée en vue d'obtenir le grade de

## DOCTEUR

en Automatique et Informatique Industrielle

par

**Salah ZIDI**

Doctorat délivré par l'Université des Sciences et Technologies de Lille

### **SARR : SYSTEME D'AIDE A LA REGULATION ET LA RECONFIGURATION DES RESEAUX DE TRANSPORT MULTIMODAL**

Soutenue le 04 juillet 2007 devant le jury d'examen :

<b>Président :</b>	<b>Mireille BAYART</b>	Professeur, Université de Lille 1 (USTL)
<b>Rapporteurs :</b>	<b>Alexandre DOLGUI</b>	Professeur, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne
	<b>Mohammed EL BAGDOURI</b>	Professeur, Université de Technologie Belfort-Montbéliard (UTBM)
<b>Examineurs :</b>	<b>Aziz MOUKRIM</b>	Professeur, Université de Technologie de Compiègne (UTC)
	<b>Christian TAHON</b>	Professeur, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis (UVHC)
	<b>Hakim ARTIBA</b>	Professeur, Institut supérieur de mécanique de Paris (Supméca)
<b>Directeur :</b>	<b>Salah MAOUCHE</b>	Professeur, Université de Lille 1 (USTL)
<b>Co-directeur :</b>	<b>Slim HAMMADI</b>	Professeur, Ecole Centrale de Lille

*A mes chers parents et grand-mère,  
à mes frères et sœurs,  
à toute ma grande famille  
et à Toi...*

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma reconnaissance à mon directeur de thèse, Le professeur Salah MAOUCHE, professeur à l'Université des Sciences et Technologies de Lille, pour l'énorme soutien scientifique et moral qu'il a su m'adresser. Je le remercie également pour ses précieux conseils et pour tout le temps qu'il m'a consacré.

J'exprime ma profonde gratitude à mon co-directeur de thèse le Professeur Slim HAMMADI, professeur à l'Ecole Centrale de Lille, pour avoir structuré et améliorer la qualité de ce travail et de m'avoir toujours encouragé à aller de l'avant

Que Professeur Mireille BAYART, Professeur à l'Université des Sciences et Technologies de Lille, USTL, reçoive mes plus sincères remerciements pour l'honneur qu'elle m'a fait en présidant ce jury.

J'adresse mes remerciements à Monsieur Alexandre DOLGUI, Professeur de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne et directeur du centre Génie Industriel et Informatique (G2I) et Monsieur Mohammed EL BAGDOURI, Professeur de l'Université de technologie Belfort-Montbéliard pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant d'être les rapporteurs de cette thèse.

Un témoignage de ma profonde reconnaissance s'adresse à Professeur Aziz MOUKRIM, Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne, UTC, Professeur Christian TAHON, Professeur à l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, UVHC et Professeur Hakim ARTIBA, Professeur à la Facultés Universitaires Catholiques de Mons, FUCAM. Merci de m'avoir fait l'honneur de participer au jury en tant qu'examineurs.

Je remercie également tout le personnel du laboratoire LAGIS où j'ai effectué mes activités de recherche.

Je n'oublie pas d'adresser mes vifs remerciements à mes amis en France et en Tunisie pour leur soutien.

Je ne peux terminer mes remerciements sans exprimer ma sincère gratitude à mes parents, ma grand-mère, mes frères et sœurs pour leurs affections, leurs encouragements et leurs nombreux sacrifices. De même, je ne peux qu'être infiniment reconnaissant envers toute ma grande famille sans oublier le soutien de mes frères Mongi et Fethi.

# Table des matières

<b>Glossaire.....</b>	<b>5</b>
<b>Index des Tableaux et Figures.....</b>	<b>8</b>
<b>Introduction Générale .....</b>	<b>10</b>
<b>Chapitre I: Exploitation des réseaux de transport urbain .....</b>	<b>14</b>
I.1 Introduction .....	15
I.2 Planification en temps anticipé.....	15
I.2.1 Configuration physique d'un réseau de transport.....	15
I.2.2 Configuration horaire .....	17
I.2.2.1 Ggraphicage .....	18
I.2.2.2 Habillage .....	19
I.2.3 Transport multimodal .....	20
I.2.3.1 Configuration d'un réseau multimodal.....	20
I.2.3.2 Information multimodale .....	21
I.2.4 Processus de planification.....	22
I.3 Perturbations.....	25
I.3.1 Définition d'une perturbation.....	25
I.3.2 Types d'alarme.....	25
I.3.3 Sources de perturbation .....	26
I.4 Régulation et reconfiguration .....	27
I.4.1 Processus de régulation.....	27
I.4.2 Logiques de régulation .....	28
I.4.3 Manœuvres de régulation.....	29
I.4.4 Contraintes de régulation.....	31
I.4.5 Dynamique de régulation.....	35
I.4.6 Reconfiguration.....	36
I.5 Conclusion.....	37
<b>Chapitre II: Système d'aide à la décision pour les réseaux de transport multimodal.....</b>	<b>39</b>
II.1 Introduction.....	40
II.2 Système d'aide à l'exploitation .....	40

II.2.1 Principe d'un SAE.....	40
II.2.2 Rôle d'un SAE .....	41
II.3 Système d'aide à la régulation.....	43
II.3.1 Systèmes d'aide à la décision.....	43
II.3.2 Exemple d'application des SAD .....	45
II.3.3 Système d'aide à la régulation .....	45
II.3.4 Modélisation des réseaux de transport.....	46
II.3.5 Approches existantes pour l'aide à la régulation .....	47
II.3.5.1 Approche floue .....	47
II.3.5.2 Approche multi-agent.....	48
II.3.5.3 Approche évolutionnistes .....	48
II.3.5.4 Autres approches.....	49
II.4 Système d'Aide à la Régulation et la Reconfiguration (SARR) .....	50
II.4.1 Rôle du système.....	50
II.4.2 Architecture du système .....	52
II.4.2.1 Module d'analyse et régulation.....	53
II.4.2.2 Module de reconfiguration spatiale .....	53
II.4.2.3 Module de régulation horaire .....	54
II.4.3 Fonctionnement du système.....	54
II.4.4 Caractéristiques du Système.....	57
II.5 Conclusion .....	58

## **Chapitre III: SVM pour la régulation des réseaux de transport multimodal.....60**

III.1 Introduction .....	61
III.2 Séparateurs à Vaste Marge (SVM) .....	61
III.2.1 Principe général.....	61
III.2.2 Apprentissage statistique .....	62
III.2.3 SVM linéaire .....	63
III.2.4 SVM non linéaire .....	66
III.2.5 Multi classes SVM (MSVM).....	67
III.3 SVM pour la régulation .....	69
III.3.1 Processus de régulation.....	69
III.3.2 Vecteur perturbation.....	70
III.3.3 Classes de régulation .....	72
III.3.4 Noyau gaussien.....	73
III.3.5 Apprentissage .....	74

III.3.6 Classification.....	76
III.4 Conclusion .....	78
<b>Chapitre IV: Algorithme à colonie de fourmis pour la reconfiguration et la régulation.....</b>	<b>79</b>
IV.1 Introduction .....	80
IV.2 Algorithme à Colonie de Fourmis ACF.....	80
IV.2.1 Principe de l'ACF.....	80
IV.2.3.1 Inspiration biologique .....	81
IV.2.3.2 Algorithme informatique .....	83
IV.2.2 Caractéristiques de l'ACF .....	84
IV.2.3 ACF pour l'optimisation.....	85
IV.2.3.1 Problème du voyageur de commerce.....	85
IV.2.3.2 ACF pour d'autres problèmes d'optimisation .....	91
IV.3 ACF pour la reconfiguration .....	92
IV.3.1 Reconfiguration spatiale.....	92
IV.3.2 Fonction coût .....	94
IV.3.3 Algorithme à Colonie de Fourmis pour la Reconfiguration Spatiale (ACFRS).....	96
IV.3.4 Génération d'une nouvelle solution.....	97
IV.3.5 Mise à jour de la quantité de phéromone.....	98
IV.3.6 Deuxième solution.....	99
IV.4 ACF pour la régulation horaire .....	100
IV.4.1 La régulation horaire .....	100
IV.4.2 Critères de régulation horaire.....	101
IV.4.2.1 Critère de régularité .....	101
IV.4.2.2 Critère de correspondance.....	105
IV.4.2.3 Critère de ponctualité.....	106
IV.4.3 Fonction objectif.....	108
IV.4.4 Présentation des solutions .....	109
IV.4.5 Algorithme ACFRH .....	109
IV.4.6 Génération d'une nouvelle solution.....	110
IV.4.7 Mise à jour de la quantité de phéromone.....	111
IV.4.8 Recherche locale dynamique .....	111
IV.5 Conclusion.....	113
<b>Chapitre V: Applications et résultats.....</b>	<b>115</b>
V.1 Introduction.....	116

V.2 Outil informatique utilisé.....	116
V.3 Module de classification.....	117
V.3.1 Apprentissage.....	117
V.3.2 Quelques exemples de perturbations .....	118
V.3.3 Test.....	120
V.4 Application d'ACFRS.....	121
V.4.1 Paramètres de l'algorithme.....	121
V.4.2 Applications et résultats.....	124
V.4.2.1 Scénario 1.....	124
V.4.2.2 Scénario 2.....	124
V.5 Application d'ACFRH .....	127
V.5.1 Scénario 1.....	127
V.5.1.1 Description.....	127
V.5.1.2 Résultats proposés par ACFRH.....	129
V.5.2 Scénario 2.....	130
V.5.2.1 Description .....	130
V.5.2.2 Résultats proposés par ACFRH.....	132
V.5.3 Scénario 3.....	134
V.5.3.1 Description .....	134
V.5.3.2 Résultats proposés par ACFRH.....	135
V.5.4 Scénario 4.....	137
V.5.4.1 Description .....	137
V.5.4.2 Résultats proposés par ACFRH.....	138
V.5.5 Comparaisons des résultats.....	139
V.6 Conclusion .....	141
<b>Conclusion et perspectives .....</b>	<b>143</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>146</b>
<b>Récapitulatif des Publications.....</b>	<b>157</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>160</b>

## Glossaire

ACFRS	: Algorithme à Colonie de Fourmis pour la Reconfiguration Spatiale.
ACFRH	: Algorithme à Colonie de Fourmis pour la Régulation Horaire.
$Arrêt\_Prec(V_i^l, S_j^m)$	: Dernière station desservie par $V_i^l$ avant $S_j^m$ .
$AT$	: Attente totale des passagers aux arrêts dans l'horizon de la régulation.
$AT_0$	: Attente totale des passagers aux arrêts dans l'horizon de la régulation selon l'état perturbé du réseau.
$a_{ij}^{lm}$	: Variable de passage associée au véhicule $V_i^l$ et à l'arrêt $S_j^m$ .
Capi	: La capacité du véhicule concerné par la reconfiguration sur l'arc $i$ (Nombre de places libres)
Cdi	: Le nombre de passagers qui vont descendre à la station d'arrivée $A_i$ de l'arc $i$ .
$C_{ij}^{lm}$	: Charge de $V_i^l$ au départ de $S_j^m$ .
Cmi	: Le nombre de passagers en attente dans la station d'arrivée $A_i$ de l'arc $i$ .
$Cout^f(t)$	: Le coût total d'un chemin emprunté par la fourmi $f$ .
$C_i$	: Le nombre de passagers servis sur l'arc $i$ .
$D_i$	: La distance de parcours de l'arc $i$
$\mathcal{H}$	: Horizon de la régulation.
N	: Nombre de fourmis.
$Nmont_{ij}^{lm}$	: 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 $S_j^m$ .
$N_{i'jk}^{l'mr}$	: Nombre de personnes qui montent à bord de $V_{i'}^{l'}$ à $S_j^m$ et qui ont $S_k^r$ pour destination
P1	: La probabilité de la transition aveugle.
P2	: La probabilité de la transition intelligente.
P	: La probabilité de choix de type de la transition (aveugle ou intelligente).
$RT$	: Durée totale des Routes dans l'horizon de la régulation.
$RT_0$	: Durée totale des Routes dans l'horizon de la régulation selon l'état perturbé du réseau.

$\mathcal{R}$	: Réseau de transport multimodal.
$\mathcal{S}$	: Ensemble des stations dans le réseau.
$\mathcal{S}^{\mathcal{H}}$	: Ensemble des stations considérées dans l'horizon $\mathcal{H}$ .
$S_k^r$	: $k$ -ème station de la ligne $r$ .
SARR	: Système d'Aide à la Régulation et la Reconfiguration.
SVM	: Séparateur à vaste marge.
$T_i$	: Le temps de parcours de l'arc $i$
Tabouf	: la liste taboue de la fourmi $f$ , elle contient l'ensemble des stations visitées par $f$ .
$ta_{ij}^{lm}$	: Horaire d'arrivée du véhicule.
$td_{ij}^{lm}$	: Horaire de départ de $V_i^l$ de l'arrêt $S_j^m$ .
$t_{ijk}^{lmr}$	: Durée du trajet direct de $V_i^l$ de la station $S_j^m$ à la station $S_k^r$ .
TM	: Tableau de Marche.
TMT	: Tableau de Marche Théorique.
TMP	: Tableau de Marche Perturbé.
TMR	: Tableau de Marche Régulé.
$TT$	: Durée totale des transferts dans l'horizon de la régulation.
$TT_0$	: Durée totale des transferts dans l'horizon de la régulation selon l'état perturbé du réseau.
$t_{pert}$	: Horaire de détection de l'incident.
$ts_{ij}^{lm}$	: Temps d'arrêt de $V_i^l$ à la station $S_j^m$
$t_{mont}$	: Temps moyen que prend une personne pour monter dans le véhicule
$t_{desc}$	: Temps moyen que prend une personne pour descendre d'un véhicule
$\mathcal{V}$	: Ensemble des véhicules qui y circulent.
$\mathcal{V}^{\mathcal{H}}$	: Ensemble des véhicules considérés dans l'horizon $\mathcal{H}$ .
$V_i^l$	: $i$ -ème véhicule de la ligne $l$ .
$Veh^+(V_i^l, S_j^m, S_k^r)$	: Premier véhicule qui succède $V_i^l$ à $S_j^m$ et qui passe également par $S_k^r$ après $S_j^m$ .
$\omega_{i'i'}^{ll'm}$	: Nombre de personnes en transfert de $V_i^l$ à $V_{i'}^{l'}$ à la station $S_j^m$ .
$x_{ijk}^{lmr}$	: Variable de destination associée à $V_i^l$ et l'arc entre $S_j^m$ et $S_k^r$ .

- $\gamma_{ii'j}^{ll'm}$  : Variable de correspondance de  $V_i^l$  à  $V_{i'}^{l'}$  à la station  $S_j^m$ .
- $\delta_{ijk}^{lmr}$  : Modification du temps de parcours de  $V_i^l$  entre  $S_j^m$  et  $S_k^r$ .
- $\varepsilon_{ij}^{lm}$  : Temps supplémentaire de stationnement imposé sur le véhicule  $V_i^l$  à l'arrêt  $S_j^m$ .
- $\mu(\Delta t_l, S_j^m, S_k^r)$  : Taux constant d'arrivée pendant  $\Delta t_l$  à la station  $S_j^m$  et en destination de  $S_k^r$ .
- $\rho_{ii'j}^{ll'm}$  : Taux de correspondance de  $V_i^l$  à  $V_{i'}^{l'}$  à l'arrêt  $S_j^m$ .
- $\tau_i(t)$  : La dernière quantité de phéromone déposée sur l'arc  $i$  avant la mise à jour.
- $\rho$  : Le taux de persistance des traces de phéromone ( $0 \leq \rho \leq 1$ ).
- $\Omega_s$  : L'ensemble des arcs qui ont comme station de départ la station  $s$ .
- $\Delta \tau_i^f(t)$  : La quantité de phéromone ajoutée par la fourmi  $f$  sur l'arc  $i$  à l'instant  $t$ .

# Index des Tableaux et Figures

## Index des Tableaux

Tableau V.1: nombre des vecteurs supports pour différents valeur de $\sigma$ .....	118
Tableau V.2: Résultat de l'algorithme de classification SVM.....	121
Tableau V.3: Résultats de quelques exemples.....	123
Tableau V.4: Résultats de reconfiguration spatiale scenario 2.....	125
Tableau V.5: Les horaires de passage théoriques pour la ligne l.....	128
Tableau V.6: Résultats de la régulation du premier scénario.....	130
Tableau V.7: TMP des deux lignes 1 et 2.....	131
Tableau V.8: Résultats de régulation monocritère.....	133
Tableau V.9: Résultat de régulation multicritère.....	133
Tableau V.10: TMP des deux lignes T et B.....	134
Tableau V.11: Résultats des exemples monocritères.....	135
Tableau V.12: Résultats des exemples multicritères.....	136
Tableau V.13: TMT de la ligne 5.....	137
Tableau V.14: TMP de la ligne 7.....	137
Tableau V.15: Régulation de la correspondance.....	138
Tableau V.16: Régulation de la régularité.....	138
Tableau V.17: Régulation de la ponctualité.....	139
Tableau V.18: Tableau de comparaison entre ACS et ACFRH.....	140
Tableau V.19: Tableau de comparaison entre AE et ACFRH.....	141

## Index des figures

Figure I.1: Les structures de lignes.....	16
Figure I.2: Liaison de raccordement.....	17
Figure I.3: Exemple de réseau multimodal.....	20
Figure I.4: Processus classique de planification.....	23
Figure I.5: Graphique des horaires des véhicules.....	23
Figure I.6: Organigramme d'une méthode de graphilage [Rizzi, 88].....	24
Figure I.7: Classification des incidents.....	26
Figure I.8: Fonctionnement d'un réseau de transport en temps réel.....	27
Figure I.9: Dynamique de la régulation.....	36
Figure II.1: boucle fermée de la régulation.....	41
Figure II.2: Fonctionnement d'un SAE.....	42
Figure II.3: Processus de décision.....	44
Figure II.4: Principe des SAD.....	44

Figure II.5: Processus de contrôle en temps réel du trafic d'un réseau de transport urbain.....	46
Figure II.6: Position du SARR dans le processus global de contrôle du réseau.....	51
Figure II.7: Architecture du SARR.....	52
Figure II.8: Processus de régulation.....	56
Figure II.9: Diagramme de séquence du SARR.....	57
Figure III.1: Importance du choix de l'ensemble $\psi$ .....	63
Figure III.2: Optimisation de la marge.....	65
Figure III.3: Processus de classification.....	69
Figure III.4: Distribution des données.....	75
Figure III.5: Arbre binaire de la classification des décisions.....	77
Figure IV.1: Expérience du double pont binaire.....	81
Figure IV.2: Effet de la coupure d'une piste de phéromone.....	83
Figure IV.3: Algorithme ACF.....	84
Figure IV.4: Exemple de reconfiguration.....	93
Figure IV.5: Structure de l'algorithme ACFRS.....	97
Figure IV.6: Distribution des arrivées de passagers à un arrêt.....	102
Figure IV.7 : Graphe des décisions de la régulation horaire.....	109
Figure IV.8: Algorithme à colonie de fourmis pour la régulation horaire ACFRH.....	110
Figure IV.9: ACFRH avec la recherche locale dynamique.....	113
Figure V.1: Exemple d'exécution de l'algorithme.....	120
Figure V.2: Représentation des itinéraires théoriques des véhicules des lignes 5 et 7.....	122
Figure V.3: Exemple de graphe de déplacement pour les véhicules de la ligne 7.....	122
Figure V.4: Exemple de résultat d'exécution de l'ACFRS.....	126
Figure V.5: Courbes de convergence de ACFRS.....	127
Figure V.6: Courbe des charges théoriques des véhicules de la ligne 0.....	128
Figure V.7: schéma de régulation de l'exemple 4.....	130
Figure V.8: Charges théoriques des véhicules aux arrêts de l'horizon.....	132
Figure V.9: Schéma de régulation de l'exemple 2.....	136

## Introduction Générale

### *Contexte général*

De nos jours, des millions d'utilisateurs utilisent quotidiennement les systèmes de transport. Dans les zones urbaines à forte densité de population, ces systèmes véhiculent un public de plus en plus important et deviennent un service indispensable dans la vie des usagers. En parallèle avec l'augmentation considérable du nombre de citoyens, la croissance de l'usage des automobiles pose des problèmes aigus, tant sociaux qu'économiques et environnementaux. Le transport en commun est ainsi devenu un des enjeux majeurs de la vie collective et de la vie quotidienne. L'intérêt mondial pour ce domaine ne fait que croître depuis les deux dernières décennies.

Ainsi, les réseaux de transport public se sont amplifiés. Aux nombres des stations et des véhicules qui ne cessent d'augmenter, se sont ajoutées les notions de multimodalité et d'intermodalité. Les difficultés de la gestion ne peuvent alors qu'augmenter et être encore plus complexes à cause de la taille de ces réseaux et de la présence de plusieurs modes de transport.

Avec le développement des technologies de l'information, les pouvoirs publics et les exploitants de transport cherchent à développer des outils informatiques permettant d'améliorer la qualité du service offert aux usagers du transport en commun. Ces outils concernent, entre autres, l'établissement de l'offre prévisionnelle de transport en temps anticipé et le réajustement, en temps réel, de cette offre par rapport à la demande.

### *Problématique*

La planification de l'exploitation des réseaux de transport multimodal, réalisée en temps anticipé, se base sur des prévisions des conditions de circulation, des durées des trajets et de la demande de transport. Ainsi, il est bien difficile en temps réel de suivre les Tableaux de Marche Théoriques (TMT) issus de ce processus à cause de l'apparition de phénomènes complexes et aléatoires affectant le trafic du réseau. Afin d'éviter la détérioration de la qualité de service, les perturbations provoquées par ces phénomènes doivent être traitées dans les plus brefs délais à travers un processus de régulation (Figure 1).

La régulation est alors le processus d'adéquation en temps réel des tableaux de marche aux conditions réelles d'exploitation. Elle est réalisée par un ou plusieurs opérateurs humains appelés régulateurs, qui entreprennent des mesures de régulation en cas de perturbation.

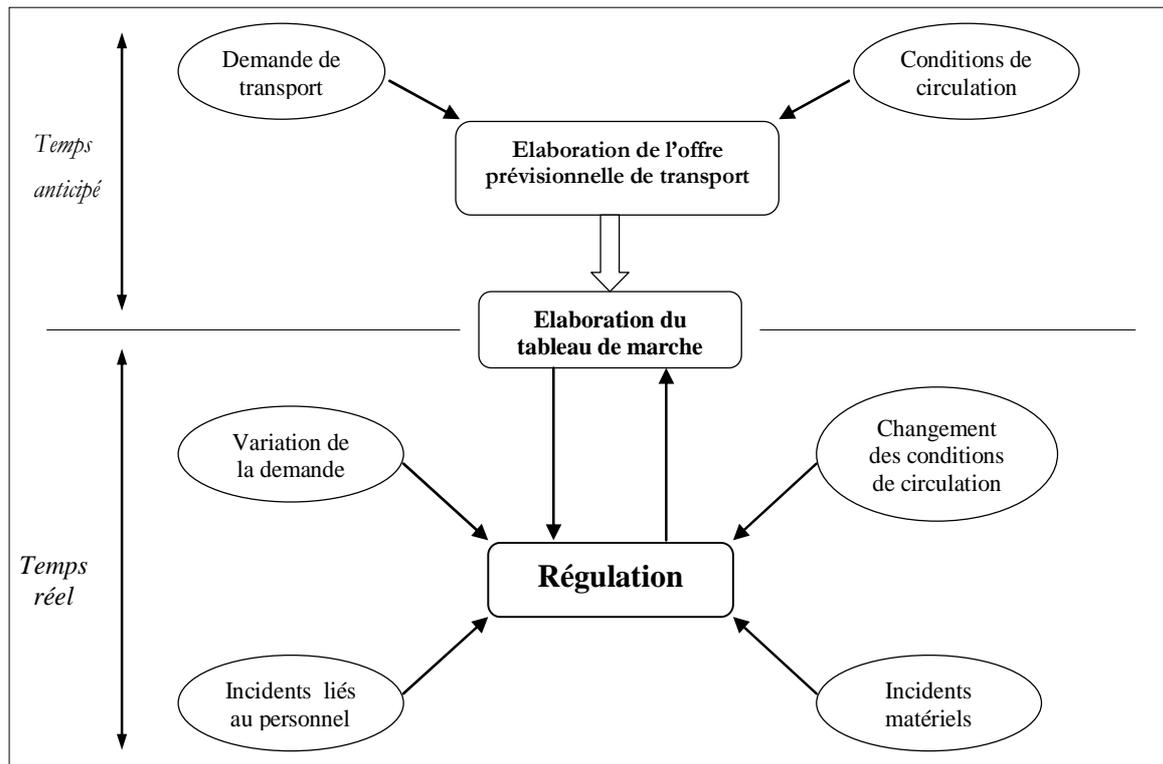


Figure 1: Exploitation des réseaux de transport multimodal.

L'action de régulation n'agit que sur les horaires de passage des véhicules. Néanmoins, dans des cas de perturbations plus complexes et difficiles à gérer, le régulateur ne peut proposer aucune décision de régulation mais il doit refaire une planification totale ou partielle du réseau en temps réel.

Dans ces conditions, le régulateur doit chercher l'itinéraire optimal qui permet d'absorber le flux des voyageurs entre deux stations. Il s'agit bien d'une reconfiguration qui ne concerne pas seulement les horaires mais aussi les itinéraires. En effet, la reconfiguration consiste en une réaffectation des horaires, des itinéraires et des stations aux véhicules.

### **Cadre de la thèse**

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de recherches sur la régulation des réseaux de transport menées au LAGIS et subventionnées par le Groupement Régional pour la Recherche dans les Transports (G.R.R.T). Notre recherche s'inscrit dans le projet « système d'aide à la régulation du réseau de transport valenciennois et de ses pôles d'échanges » ; l'objectif étant la minimisation des temps d'attente des usagers des systèmes de transports urbains en mode normal et perturbé. Ce projet est coordonné par l'unité de recherche ESTAS : « Evaluation des Systèmes de

Transport Automatisés et de leur Sécurité ». Les autres partenaires du projet sont le LAGIS (EC-Lille, l'USTL), le LAMIH (UVHC) et SEMURVAL (exploitant du réseau de transport collectif de la ville de Valenciennes et de ses environs). Parmi les méthodes utilisées pour la régulation, nous pouvons citer celles qui sont basées sur les réseaux de Pétri [Mesghouni, 02], la logique floue [Chihaiab, 00] [Ould sidi, 06], les systèmes multi-agents [Laichour, 02] ou encore les algorithmes évolutionnaires [Fayeche, 03] [Dridi, 04].

### ***Objectifs de la thèse***

Les travaux effectués dans cette thèse sont consacrés à la recherche et la mise au point des approches d'optimisation pour la régulation et la reconfiguration des réseaux de transport multimodal. Nous avons pour objectif de concevoir un outil informatique qui assiste les régulateurs dans les différentes tâches qui leur sont attribuées afin de préserver au mieux le confort des usagers des réseaux de transport multimodal. Il s'agit de réaliser un système d'aide à la décision qui utilise des algorithmes de régulation prenant en compte différents critères. Nous devons aussi prendre en compte la reconfiguration de réseau.

Ainsi, nous proposons un Système d'Aide à la Régulation et à la Reconfiguration (S.A.R.R). Les approches utilisées pour atteindre un tel objectif sont basées sur les algorithmes de séparation de régions baptisés Séparateurs à Vaste Marge (S.V.M : Support Vector Machines) et les Algorithmes à Colonie de Fourmis (A.C.F).

Le choix des SVM est justifié par le fait qu'il s'agit d'un outil mathématique très performant issu de la théorie d'apprentissage statistique. Il permet une classification rapide dans un espace des données multidimensionnelles. Ce qui répond à nos besoins dans un premier module de notre système. Il assure, à travers une vision globale de la zone perturbée, une première régulation rapide en proposant une hiérarchisation des décisions connues et utilisées par les régulateurs. Les données classées sont des perturbations caractérisées par un vecteur de dimension 24.

Etant donné l'échec des méthodes exactes dans le traitement de la régulation et la reconfiguration, nous avons choisi un algorithme à colonie de fourmis. C'est une méthode approchée qui nous permet d'effectuer une reconfiguration spatiale et une régulation horaire en un temps de calcul beaucoup moins important que celui nécessaire à la mise en œuvre d'autres méthodes dites exactes. Son principal avantage par rapport aux autres techniques d'optimisation est la combinaison de l'exploration de l'espace de recherche en utilisant une transition aléatoire et

l'exploitation des meilleures solutions en utilisant une transition plus intelligente avec une probabilité qui dépend des caractéristiques heuristiques.

### ***Organisation du manuscrit***

Ce mémoire, composé de cinq chapitres, débute par une présentation de l'exploitation des réseaux de transport multimodal. Nous commençons par la planification en temps anticipé puis nous décrivons les perturbations et nous expliquons la régulation en temps réel. Dans ce premier chapitre, nous montrons le travail des exploitants pour la gestion des réseaux multimodaux.

Dans le second chapitre, nous nous intéressons aux outils informatiques dédiés à cette gestion de l'exploitation. Nous présentons les Systèmes d'Aide à l'Exploitation, SAE, ainsi que les systèmes d'aide à la régulation. Nous proposons aussi un état de l'art sur les travaux effectués dans ce cadre. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous présentons le système d'aide à la régulation et la reconfiguration (SARR) que nous proposons.

Nous présentons le premier module de notre système d'aide à la décision dans le troisième chapitre. Il s'agit d'un processus de classification à base de SVM. Après avoir détaillé cette technique d'apprentissage statistique, nous expliquons son application pour la régulation des réseaux de transport.

Le quatrième chapitre est consacré à l'application de l'approche à colonie de fourmis aux problèmes de transport. Nous commençons par présenter le principe et les différentes versions de cet algorithme. Après cette étude bibliographique, nous expliquons les deux algorithmes proposés : ACFRS, Algorithme à Colonie de Fourmis pour la Reconfiguration Spatiale et ACFRH, Algorithme à Colonie de Fourmis pour la Régulation Horaire.

Le dernier chapitre de ce manuscrit concerne les résultats du SARR appliqué à plusieurs scénarios réels. Nous présentons les résultats de chaque module et nous comparons avec d'autres approches utilisés pour le même problème de régulation.

Nous finissons par présenter quelques conclusions et des perspectives de ce travail de recherche.

## **Chapitre I: Exploitation des réseaux de transport urbain**

## **I.1 Introduction**

Les déplacements urbains sont de plus en plus complexes et la planification du trafic dans un réseau, en particulier, multimodal sont de plus en plus difficiles. En effet, ce processus réalise l'ordonnancement des véhicules afin de leur allouer 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.

Néanmoins, 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. C'est pourquoi 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 réduire 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.

Dans ce chapitre, nous présentons, d'abord, les réseaux de transport multimodal. Ainsi nous décrivons les configurations physique et horaire. Puis, nous expliquons la gestion d'exploitation des réseaux de transport. En outre, nous commençons par le travail assuré en temps anticipé en tant que planification puis nous passons en temps réel pour définir : les perturbations, leurs types et leurs origines. En fin, la régulation de ces incidents fera l'objet de la troisième partie.

## **I.2 Planification en temps anticipé**

### **I.2.1 Configuration physique d'un réseau de transport**

Un réseau de transport urbain est constitué, physiquement, d'un ensemble de lignes et de dépôts. Une ligne contient des arrêts. Parmi ces arrêts, on distingue quatre types. Les arrêts simples sont caractérisés par des horaires de départ et des horaires d'arrivée des véhicules. Les arrêts de régulation sont caractérisés, en plus des arrêts simples, par la localisation des véhicules (arrêts équipés de capteurs) et la possibilité de commander des actions de régulation. Les arrêts terminus sont caractérisés, en plus des arrêts régulation, par des véhicules vidés de ses voyageurs. Enfin, un ensemble d'arrêts dépendants, un ensemble d'arrêts de régulation liés par les horaires d'arrivée et de départ par exemple, est appelé nœud de correspondances.

Dans un réseau de transport urbain, on trouve deux types de dépôts : le dépôt d'exploitation et le dépôt de remisage. Un dépôt d'exploitation assure la préparation et le contrôle d'un service sur une ligne. Alors qu'un dépôt de remisage assure l'affectation des conducteurs, l'entretien des véhicules et le remisage proprement dit qui permet d'acheminer un véhicule du dépôt à l'itinéraire commercial et réciproquement.

Logiquement, une ligne contient plusieurs itinéraires : des itinéraires commerciaux et des itinéraires spéciaux (par exemple : chercher des élèves de la sortie d'une école ou des travailleurs à la sortie d'une usine) qui appartiennent, respectivement, aux lignes commerciales et aux lignes spéciales.

L'itinéraire commercial d'une ligne est composé de liaisons reliant des arrêts où s'effectuent la montée et la descente des clients. L'itinéraire spécial d'une ligne est composé de liaisons reliant des arrêts où la montée et la descente des clients s'effectuent aux terminus. Des itinéraires de lignes différentes peuvent présenter des tronçons communs.

La structure d'une ligne peut être plus au moins complexe ; voici quelques exemples courants de structure de lignes :

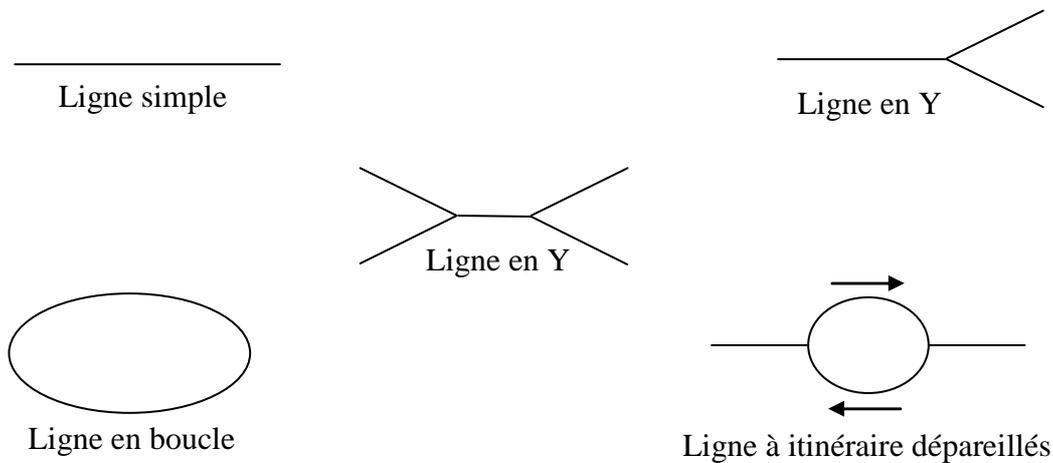


Figure I.1: Les structures de lignes.

Certains arrêts offrent la possibilité de commander des demi-tours et des possibilités de garer les véhicules. La liaison entre deux arrêts consécutifs est appelée inter-arrêt. Dans l'exploitation, on peut être amené à utiliser des liaisons de raccordement situées en dehors de l'itinéraire commercial pour effectuer des déviations et des retournements (figure I.2). Certes, certains tronçons d'une ligne peuvent être à sens unique.

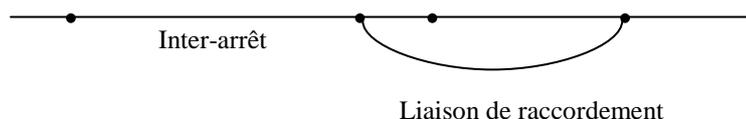


Figure I.2: Liaison de raccordement.

L'offre de service sur une ligne est composée de courses reliant un terminus de départ à un terminus d'arrivée et desservant des arrêts selon un horaire. Une course est une mission effectuée par un véhicule : entre deux terminus extrêmes (course pleine), entre un terminus extrême et un arrêt (course partielle), sans desserte des arrêts entre l'arrêt de départ et l'arrêt d'arrivée (course dite haut le pied HLP) et enfin l'emprunt des itinéraires spéciaux (course spéciale). Donc sur une ligne donnée on trouve plusieurs types de courses possibles selon les arrêts desservis, l'itinéraire emprunté ou les consignes d'exploitation. La révolution sur une ligne est constituée d'une course allée et d'une course retour avec emprunt du même itinéraire.

Le tracé d'une ligne est souvent déterminé en concertation avec les instances communales concernées et les différents demandeurs (association de quartier, écoles, commerçant, etc.). Il doit évidemment tenir compte des contraintes liées à la circulation [Hastus].

Une fois le tracé établi, il s'agit de déterminer les différents temps de parcours qui seront appliqués sur la ligne. Ceux-ci peuvent être variables selon le type de jours (jours ouvrables ou week-ends) et les différents moments de la journée (heures creuses, heures de pointe, fin de soirée...). Les temps de parcours d'une ligne sont étudiés grâce aux véhicules laboratoires capables d'enregistrer les différentes données des temps de parcours et d'en réaliser un traitement statistique. Ils sont déterminés par des contrôleurs à l'aide de chronométrages manuels.

## I.2.2 Configuration horaire

Le respect des horaires, la régularité de passages des véhicules et la rapidité des déplacements conditionnent la qualité du service rendu à la clientèle des transports urbains [Hastus].

La conception de l'horaire d'une ligne est une tâche assez complexe qui nécessite la définition de tous les itinéraires de cette ligne. Le travail manuel peut être assez lourd puisque la vitesse peut varier en cours de journée (heure de pointe) et que l'offre varie suivant les jours (jours ouvrables ou week-ends) et les périodes (scolaire, vacances, etc.).

### I.2.2.1 Graphicage

Afin de définir l'offre d'une ligne, une représentation en graphique de l'ensemble des parcours au cours d'une journée est nécessaire. Cette opération, appelée graphicage, définit l'heure de passage des véhicules aux arrêts, les vitesses, les temps de battement, le nombre de véhicules nécessaires et le nombre d'heures de conduite nécessaires à la satisfaction de la demande sur ligne. Cette étape de planification est assurée par des logiciels comme [Hastus] qui utilise un module (HASTUS-véhicule) pour le graphicage, c'est-à-dire la confection des horaires de véhicules. HASTUS est utilisé aussi bien pour planifier les réseaux d'autobus urbains et régionaux que ceux de tramways, de métros et de trains. De nombreux scénarii peuvent être générés pour différents jours de la semaine et différentes périodes de l'année.

Parmi les caractéristiques du graphicage qui influencent la régulation, trois sont à retenir [Frollof & al., 89] :

***La longueur des intervalles*** : plus les intervalles sont grands, plus le nombre de voitures en service est faible, ce qui rend plus difficile les manœuvres de régulation. En particulier, le contrôleur commandera moins de demi-tour et haut-le-pied que sur les lignes à petit intervalle pour que l'attente maximale des voyageurs aux points d'arrêts reste dans les limites de la norme minimale de qualité de service admise. Dans ce cas, le contrôleur privilégiera la prise de retard au terminus. D'autre part, plus l'intervalle est grand plus tôt le contrôleur devra déclencher les dérives en terminus afin de pouvoir effectuer les prises de retard ou d'avance sur un nombre maximal de voitures.

***La position des voitures rentrantes*** : leur position dans l'ordre de toutes les voitures du tableau de marche est importante pour le travail de régulation. En cas de retard important, lorsque les voitures encore en service alternent avec des voitures en fin de service, il est intéressant de commander des demi-tours aux voitures encore en service en vue de leur remise à l'heure. Ces demi-tours sont alternés avec des courses pleines effectuées par les voitures rentrantes pouvant supporter le retard. Par contre, dans le cas des voitures encore en service successives, le contrôleur est amené à effectuer soit des demi-tours à toutes ces voitures consécutifs, ce qui provoque des lacunes importantes après le point de retournement (irrégularités dans les passages à certaines stations), soit des distancements couplés avec des demi-tours plus courts.

***L'existence de voitures spécialisées sur une mission donnée*** : l'existence de voitures spécialisées pendant le graphicage offre une plus grande facilité d'application des changements de mission ; en effet, quand les temps de parcours pour des missions différentes sont sensiblement

différents, la transformation de deux ou plusieurs missions courtes en une mission longue (ou inversement) est plus facile à réaliser avec des voitures spécialisées, le contrôleur pouvant récupérer presque en même temps les deux voitures au point de convergence.

### **I.2.2.2 Habillage**

Lorsque les données définies par le graphilage sont prêtes, il faut répartir les heures de travail à effectuer par les conducteurs en tenant compte de la législation du travail, des conventions locales qui président à la définition du temps travaillé au cours d'une journée, des types d'organisation du travail (services coupés, nombre de jours travaillés par séries, etc.). Cette opération est dite habillage des services. C'est un exercice fondamental pour le fonctionnement de toute entreprise de transport urbain. D'une part, il assure les plannings de travail des conducteurs et d'autre part, il minimise les coûts et construit une solution acceptable pour l'entreprise.

Il est assez difficile d'obtenir une solution optimale d'habillage. Plusieurs semaines sont parfois nécessaires pour effectuer manuellement l'habillage, et si l'offre de service (le graphilage) est modifiée au cours d'une période, il faut réaliser un nouvel habillage. En outre il est intéressant de réaliser plusieurs habillages d'un même graphilage afin de permettre un choix entre plusieurs solutions acceptables.

Lorsque le réseau est défini, le résultat doit être communiqué, pour chaque type de période (scolaire, vacance...) et de jour, à l'extérieur pour les voyageurs, par l'édition de documents horaires (affiche aux arrêts, dépliant par ligne,...), mais également à l'intérieur, pour le graphiqueur qui doit pouvoir juger de son travail, pour le conducteur, qui doit recevoir une description détaillée du service (ordre de marche), pour le contrôleur, qui doit vérifier la régularité, et pour le gestionnaire du parc du matériel roulant, qui doit connaître le nombre de véhicules nécessaires à l'exploitation, leurs dates de sortie et leur type.

Deux facteurs d'habillage influencent significativement le travail de régulateur :

***Le type d'habillage***: les lignes sont habillées soit en tableau A, soit en tableau B. La différence essentielle entre ces deux tableaux réside dans l'existence de services semi-directs pour le tableau B. Le temps minimal de coupure ne peut être réduit à moins de deux heures en cas de service en deux parties, à moins de 30 minutes en cas de service semi-direct. En conséquence, lorsqu'une perturbation empêche d'assurer ces temps minimaux, le contrôleur doit repousser l'heure de reprise de service (temps repris).

**La nature des services** : le contrôleur est contraint de manœuvrer en priorité les services aux limites maximales des conditions de travail statutaires (temps de coupure de 2 heures, service à amplitude maximale,...).

### I.2.3 Transport multimodal

#### I.2.3.1 Configuration d'un réseau multimodal

Un réseau de transport multimodal est caractérisé par la présence simultanée de différents modes de transport des personnes tels que les bus, les métros et les tramways. La liaison entre ces modes 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 (figure I.3). Les nœuds de correspondances sont constitués d'arrêts situés à même lieu et liés par les horaires d'arrivées et de départs des véhicules. Ce genre de réseau devient indispensable dans les zones à haute densité de population qui nécessitent alors un plus grand nombre de déplacements.

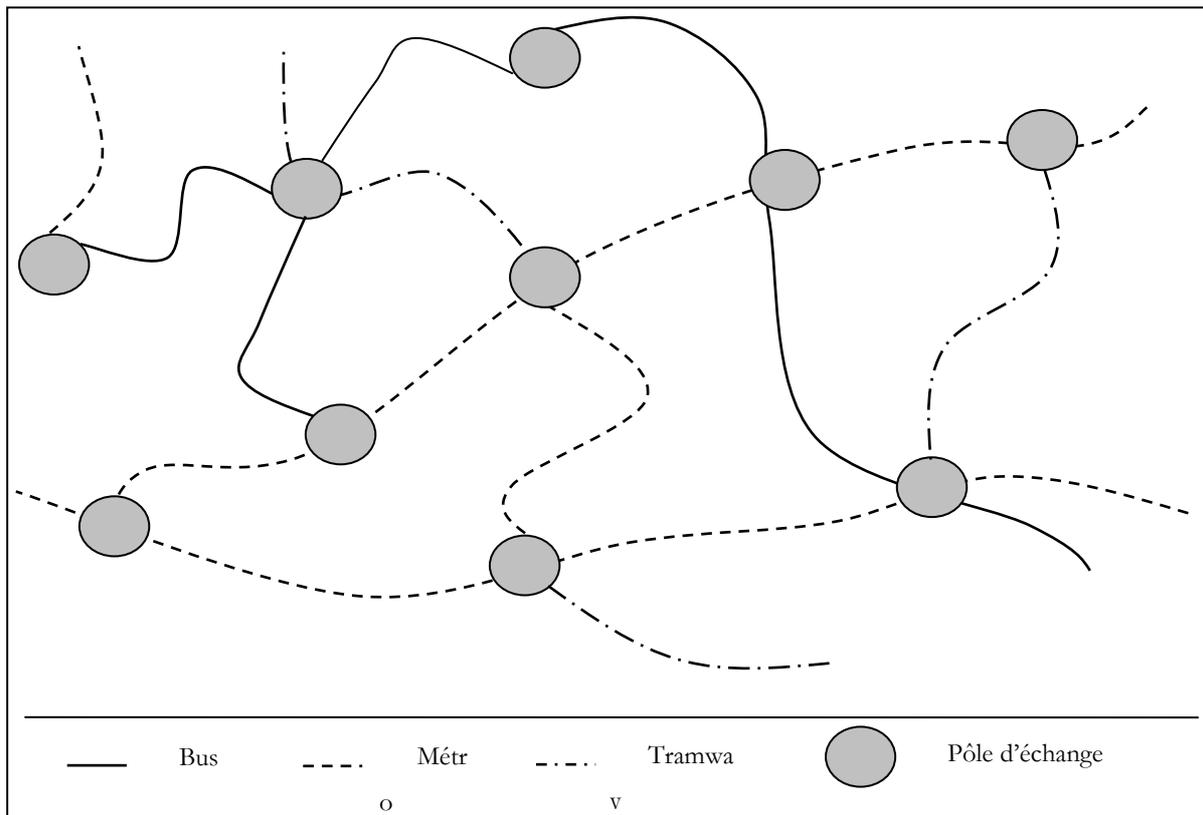


Figure I.3: Exemple de réseau multimodal.

Ces 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 guidé 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.

Dans un cadre plus global, on parle aussi d'intermodalité lorsqu'on traite les réseaux multimodaux de transport terrestre, dits aussi de surface. En effet, ces derniers comportent également les modes de transport individuel tels que les voitures particulières (VP). Ainsi, pour des raisons économiques et environnementales, les Plans de Déplacement Urbain affichent des objectifs ambitieux quant à l'amélioration de l'usage des transports en commun et à la diminution de l'usage des voitures particulières. 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.2.3.2 Information multimodale**

Elle sert à renseigner tout « utilisateur » d'un mode de transport (route, fer, air, mer, fleuve, ...) sur les modalités et conditions d'un déplacement ou d'un voyage qu'il souhaite effectuer ou qu'il effectue. Cette notion d'utilisateur doit être prise au sens large : il peut s'agir d'un voyageur « utilisateur potentiel » de l'un des modes de transport, mais aussi de tout organisme (public ou privé) intéressé pour ses besoins propres par l'exploitation de cette information (agence de voyage, office de tourisme, agence d'urbanisme, collectivité locale, localisation de voiture, opérateurs télécoms, fournisseurs de service à valeur ajoutée...).

Les services d'information multimodale sont diffusés par différents canaux et supports. Ils fournissent des fonctions aussi bien de calcul d'itinéraires sur le Web ou sur le minitel, que des affichages ou diffusions d'horaires (guichet, Web, téléphone, bornes, panneaux lumineux...), que des conditions de circulation transmises par radio ou sur le Web. Ils diffusent des informations sur les réservations, sur les tarifs, sur la disponibilité de places de parking, sur des temps d'attente, et ce aussi bien « en théorie » qu'en temps réel.

Les exploitants, ainsi que les autorités, visent à améliorer les services à proposer aux clients des transports en commun. Dans ce sens, plusieurs projets ont vu le jour. Certains sont réalisés par

les exploitants, d'autres par les régions ou bien par le ministère de transport public. Ces projets cherchent à étudier la faisabilité et la réalisation de systèmes qui améliorent les services offerts aux clients. Ces systèmes 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] [Meskine & Gendre, 01].

Actuellement, plusieurs régions et exploitants des transports en commun (TC) cherchent à développer l'information multimodale. Il existe plusieurs plates-formes notamment LePILOTE de l'agglomération marseillaise et les Bouches-du-Rhône, le SAE de Metz, DELFI en Allemagne. Dans notre équipe il y a aussi des chercheurs qui ont travaillé coté client pour le développement d'une plate-forme d'aide aux déplacements [Ben Khaled & al., 05]. Nous pouvons citer le travail réalisé par Kamel [Kamel, 06] dans le cadre de sa thèse. Il s'agit d'une réalisation d'un Système Interactif d'Aide aux Déplacements (SIADM), en mode normal, et en mode dégradé de fonctionnement du réseau de transport en commun.

#### **I.2.4 Processus de planification**

L'objectif du processus de planification est d'établir une offre prévisionnelle de transport qui suit bien la demande. Le processus traditionnel est illustré par la figure I.4 [Huissman & al., 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.

Ensuite, l'affectation de ces courses aux véhicules consiste en une tâche d'ordonnancement statique, à l'issue de laquelle nous avons 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 aussi sous forme de Tableaux de Marche Théoriques (TMT). Ces derniers représentent les différents horaires de passage des véhicules aux arrêts du réseau. Ils sont établis en tenant compte de la période de la journée (heures de pointe ou creuses), 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,...).

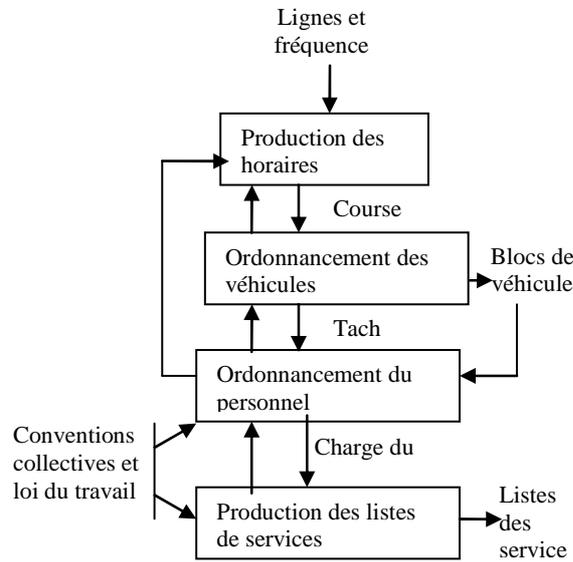


Figure I.4: Processus classique de planification

La création des TMT est effectuée par les graphistes qui les illustrent par des graphiques horaires pour les véhicules, selon le temps et la distance (figure I.5). Chaque véhicule détient son évolution sous forme d'une droite discontinue entre son origine et sa destination et dont la pente exprime la vitesse moyenne entre des arrêts consécutifs. Les longueurs des segments des lignes horizontales représentent les durées des arrêts aux stations.

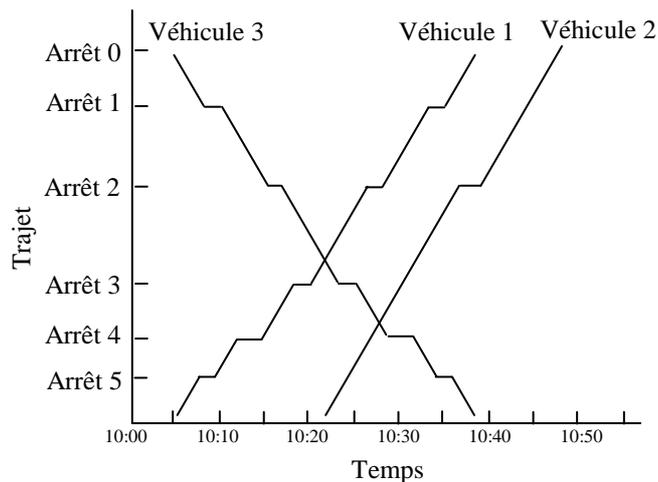


Figure I.5: Graphique des horaires des véhicules.

Ce travail est effectué en temps anticipé, mais l'adaptation de ces tableaux de marche théoriques aux conditions réelles d'exploitation d'un réseau de transport nécessite d'autres manœuvres. C'est l'étape de la régulation qui se base sur certaines logiques (critères) tel que la logique d'enlèvement de la charge, la logique de correspondance, la logique de ponctualité....

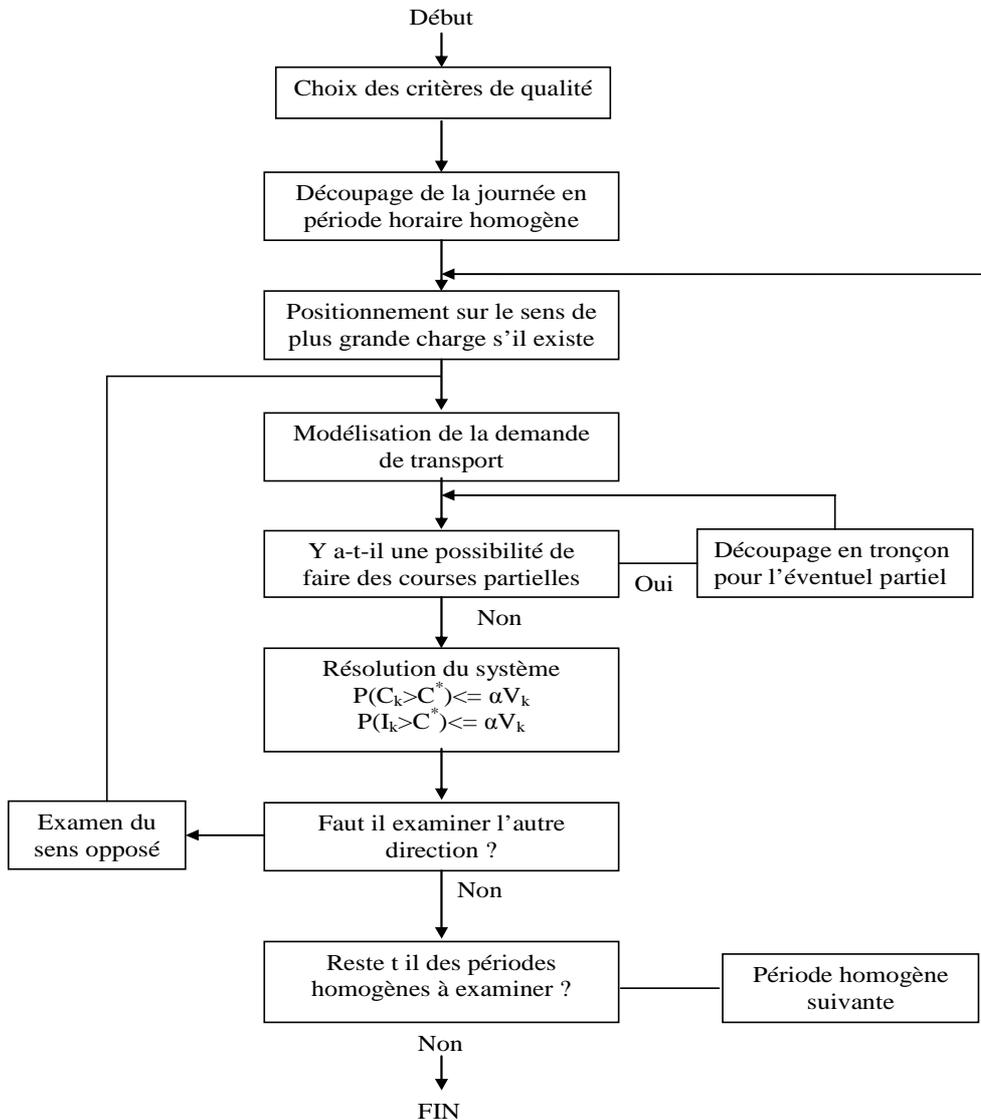


Figure I.6: Organigramme d'une méthode de graphissage [Rizzi, 88].

Depuis les années 80, plusieurs études sur la planification des réseaux de transport ont été réalisées. Le but de ces études est de bien configurer et organiser les trafics. Quelques outils informatiques traitant ce type de problème sont utilisés par les entreprises de transport, notamment HASTUS utilisant un logiciel convivial et des algorithmes d'optimisation. L'auteur de [Rizzi, 88] a proposé une méthode de graphissage (figure I.6) des lignes d'autobus qui se fonde sur la définition de norme minimale de qualité de service puis la détermination de l'intervalle maximum qui satisfasse à ces normes en fonction de la demande de transport. Nous citons aussi

le système « GeoRoute » de [Rousseau & al., 89] ainsi que l'algorithme de planification d'itinéraire SAS (Sparse A\* Search) de [Robert & al., 00], l'algorithme de [Stiles & al., 91] et celui de [Guzolek & al., 89].

## I.3 Perturbations

### I.3.1 Définition d'une perturbation

Une perturbation est tout incident pouvant affecter un réseau de transport d'une manière aléatoire et qui a comme effet un écart entre le TMT et le tableau de marche réel. Ainsi, elle engendre des irrégularités qui se traduisent par, d'une part, le non-respect des horaires prévus et d'autre part, l'irrégularité des intervalles entre les véhicules ce qui conduit à l'apparition de trains de véhicules et aussi de lacunes. La qualité de service offert subit alors une détérioration à cause de l'accroissement des temps de déplacement en ligne, de l'inconfort issu d'une mauvaise répartition des charges entre les véhicules et surtout à cause du temps d'attente aux arrêts, d'où la nécessité d'une rapide prise en charge des incidents par le régulateur.

### I.3.2 Types d'alarme

Pour respecter le TM initial, les SAE actuels peuvent déclencher des alarmes lors de situations où les écarts entre les horaires théoriques et les horaires réels sont importants. Il existe différents types d'alarmes dans [Balbo, 00] qui sont:

- ✓ **Avance / Retard** : il s'agit de déterminer pour chacun des véhicule en activité sur le réseau, son avance ou son retard sur son horaire théorique. Il s'agit d'une alarme primaire servant d'indicateur de l'état d'une ligne.
- ✓ **Respect des correspondances** : il s'agit d'une alarme plus élaborée, indiquant qu'une correspondance ne sera pas assurée.
- ✓ **Avance / Retard en centre ville** : cette alarme repose sur le même principe que la précédente puisqu'il s'agit de déterminer l'avance ou le retard d'un véhicule à un arrêt précis du réseau. Dans ce cas, l'arrêt se trouve en centre ville. Il est important de pouvoir connaître l'état d'avancement d'un véhicule à un arrêt critique du réseau afin de permettre au régulateur d'intervenir avant que la situation ne s'aggrave.
- ✓ **Train de bus** : Certain SAE [Cure & al., 84] permettent la signalisation du risque de train de bus (au moins deux véhicules se suivant 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. Le véhicule a accumulé un retard important dans sa course précédente.

### I.3.3 Sources de perturbation

Il y a plusieurs incidents qui peuvent perturber l'exploitation du transport collectif. Ils peuvent affecter les véhicules du réseau qui sont en circulation, le personnel du réseau, les passagers, le trafic routier global, etc. Les perturbations peuvent alors être classées selon leurs origines. Le dysfonctionnement peut être dû à un problème externe ou interne à la société de transport public. Le régulateur a certes plus d'impact sur un problème d'origine interne qu'un autre d'origine externe et dont il ne maîtrise pas les paramètres. La figure I.7 présente une classification des incidents typiques.

Tout incident se traduit par un retard ou une avance. Le retard peut être lié à une marche forcée ou à un arrêt complet du véhicule selon la source de l'incident. Cette classification peut éventuellement servir à l'analyse à posteriori des perturbations qui ont eu lieu afin d'évaluer et améliorer l'organisation.

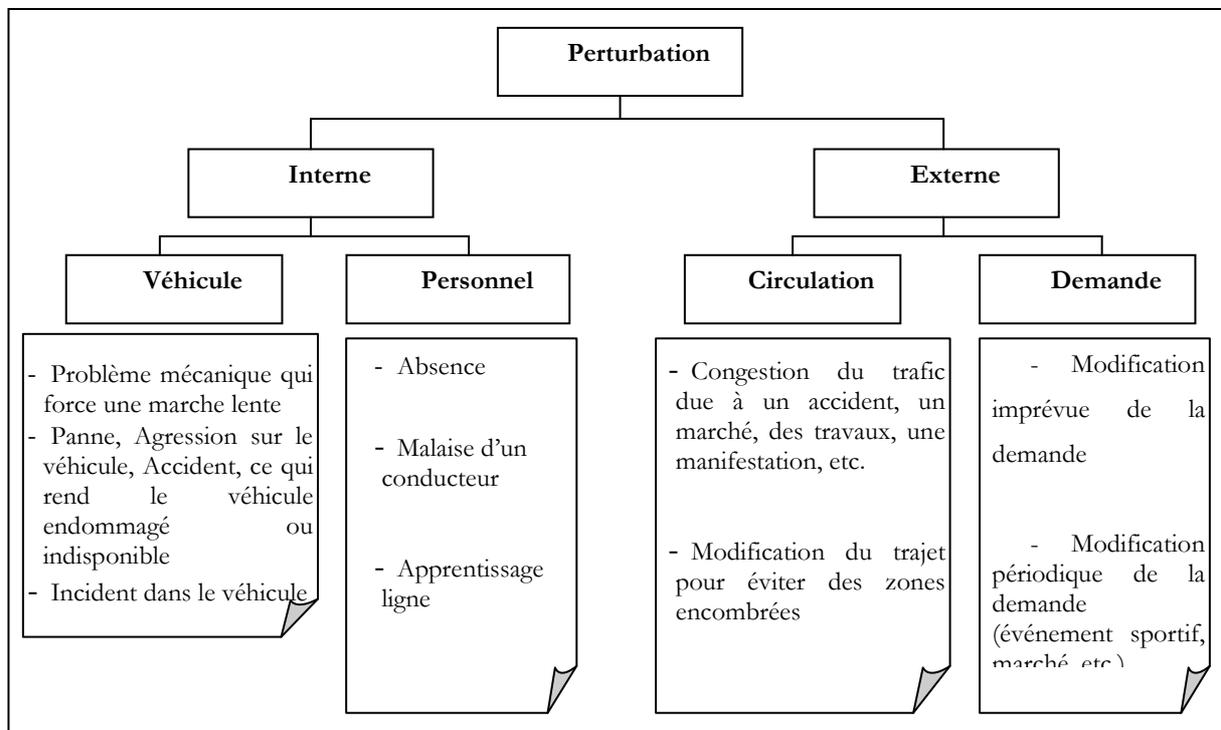


Figure I.7: Classification des incidents.

## I.4 Régulation et reconfiguration

### I.4.1 Processus de régulation

On peut caractériser une ligne de réseau de transport comme un système qu'on schématise ainsi :

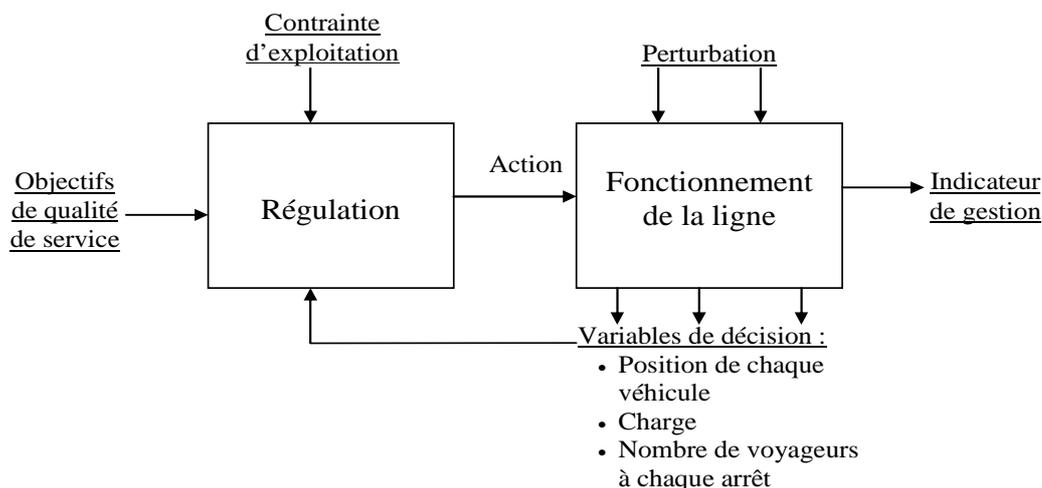


Figure I.8: Fonctionnement d'un réseau de transport en temps réel.

Ce système se compose essentiellement de deux éléments :

- le sous-système de fonctionnement de la ligne proprement dit, dont l'état est décrit par un ensemble de variables de décision (position et charge des bus, voyageurs en attente aux arrêts,...).
- Le sous-système de régulation qui analyse les écarts existants entre les objectifs de qualité de service et la réalité, et qui met en œuvre des actions susceptibles de les combler, compte tenu des contraintes liées à l'exploitation. Par exemple, au niveau des moyens disponibles (les véhicules et les conducteurs) et les règles d'utilisation de ces moyens (le nombre de kilomètres à parcourir par un véhicule dans la journée, le nombre d'heures de travail d'un conducteur limité à 35 heures par semaine, etc.).

La régulation est alors le processus d'adéquation en temps réel des tableaux de marche aux conditions réelles d'exploitation. Elle est réalisée par un ou plusieurs opérateurs humains appelés régulateurs, qui entreprennent des mesures de régulation en cas de perturbation.

Par ailleurs, hormis les régulateurs qui effectuent la supervision en temps réel du réseau, les conducteurs des véhicules sont aussi des acteurs dans le processus de régulation du réseau. Ils sont en fait les capteurs de l'activité réelle de transport, les exécutants des manœuvres de régulation. Ils sont aussi capables d'autorégulation en cas de perturbation.

D'autre part, les graphiqueurs participent à la régulation hors ligne. Ils effectuent, si nécessaire, des modifications des horaires et des prévisions des courses pour répondre aux variations de la circulation et de la demande.

Le processus de régulation contient ainsi différentes tâches allant de la détection des perturbations à la prise de décision. La phase de diagnostic consiste à détecter et analyser les perturbations afin d'évaluer leur gravité. Cette phase est basée sur les données fournies par le système d'aide à l'exploitation (SAE) qui représente un support de surveillance du réseau. Le régulateur peut ensuite entamer une phase de décision dans laquelle il doit choisir les mesures appropriées de régulation en tenant compte des contraintes d'exploitation et selon les critères qui conviennent aux objectifs d'exploitation et à la nature des perturbations. Ces deux phases s'appuient sur une projection dans le futur de l'impact des perturbations et de leur évolution, ainsi que de l'effet des décisions éventuelles sur le trafic du réseau.

## I.4.2 Logiques de régulation

Dans son travail, le régulateur est amené à appliquer des actions de régulation en respectant des objectifs d'exploitation. Ces objectifs d'exploitation sont différents d'un réseau de transport urbain à un autre. On relève, en combinant les travaux réalisés à la RATP [Rizzi, 89] et [Froloff, 89] et les travaux effectués dans notre laboratoire [Besma, 03] et [Laichour, 02], cinq logiques de régulation :

➤ **Logique d'enlèvement de la charge** : elle est appliquée pendant les heures de pointe et aussi dans d'autres cas (sortie des écoles,..). L'objectif est d'enlever les voyageurs sans en laisser aux arrêts, en concentrant les moyens sur le (ou les) point(s) de montée le(s) plus important(s). Les procédures de régulation mise en œuvre dans le cadre de cette logique seront par conséquent très variées et fonction de la configuration de la charge.

➤ **Logique de régularité** : elle est envisagée lorsque l'arrivée des voyageurs aux arrêts est indépendante des passages des véhicules. Cette logique prévaut notamment dans les périodes de creux, ainsi qu'aux pointes pour les lignes où la charge est répartie sur un grand nombre de points d'arrêt. Du point de vue de la qualité du service offert, la régularité de passage permet de satisfaire deux objectifs :

- minimiser l'attente ( $A$ ) des voyageurs aux arrêts ; en effet, dans le cas où les voyageurs arrivent à l'arrêt de façon uniforme, l'attente moyenne en un point donné est donnée par la formule [Froloff, 89] :

$$E(A) = \frac{E(I)}{2} \left( 1 + \frac{V(I)}{E(I)^2} \right) \quad (1)$$

ou  $E(I)$  et  $V(I)$  sont respectivement la moyenne et la variance des intervalles ( $I$ ) entre les bus ;  $E(A)$  est bien minimum pour  $V(I)=0$ , c'est-à-dire lorsque tous les intervalles sont égaux.

- équilibrer les charges entre les véhicules et donc maximiser le confort des voyageurs à bord des bus ; en effet, le taux d'occupation virtuel, c'est-à-dire le taux de charge moyen tel qu'il est perçu par les voyageurs, s'exprime par la formule :

$$E(T) = \mu \frac{E(I)}{K} \left( 1 + \frac{V(I)}{E(I)^2} \right) \quad (2)$$

ou  $K$  est la capacité des véhicules et  $\mu$  le débit des voyageurs par minute sur la ligne ;  $E(T)$  est bien minimum pour  $V(I)=0$ , c'est-à-dire lorsque tous les intervalles sont égaux.

➤ **Logique de ponctualité** : cette logique s'applique évidemment en premier lieu sur les lignes à horaires. On la trouve également sur l'ensemble du réseau dans le cas de départ à respecter impérativement : premier départ en début de journée et dernier départ en fin de journée.

➤ **Logique de correspondance** : dans le cas d'existence d'échanges entre deux lignes du même réseau ou entre deux modes de transport différents, on envisage la logique de correspondance pour assurer au mieux les liaisons en minimisant le temps de transfert des voyageurs en transit.

➤ **Logique de gestion du personnel** : cette logique joue un rôle essentiel dans les périodes de la journée où se pose le problème des fins de service et des relèves des machinistes. Le contrôleur poursuit trois objectifs dans ses manœuvres :

- respecter les conditions statutaires de travail des machinistes : durée maximale de chaque service, amplitude maximale et coupure minimale dans les cas de services en deux fois, temps de décalage.
- Assurer les relèves du personnel, notamment en cas d'absence d'un machiniste.
- Répartir au mieux le temps de travail total sur l'ensemble des machinistes.

### I.4.3 Manœuvres de régulation

Dans les procédures de régulation, le régulateur met en œuvre des actions pour atteindre des objectifs qu'il s'est fixés. Il s'agit en quelques sortes de la boîte à outils dont il dispose pour gérer sa ligne. Nous allons présenter ces manœuvres de régulation que nous avons utilisées dans notre processus de classification SVM (chapitre III). [Froloff, 89] et [Laichour, 02] ont classé ces manœuvres en trois groupes :

■ **Six manœuvres de régulation en terminus :**

- ✓ **Le sautage** : cette manœuvre consiste, lors d'une prise de service ou de fin de décalage, à utiliser une voiture disponible (garée, rentrante, en retard) en remplacement de celle initialement prévue et devenue indisponible (panne, retard...).
- ✓ **Le distancement** : il s'agit d'une permutation des départs entre les véhicules existant en terminus.
- ✓ **La dérive** : le régulateur peut choisir d'avancer ou de reculer un ou plusieurs départs sans les supprimer ou insérer un autre.
- ✓ **La suppression d'un départ** : elle consiste à supprimer un départ du tableau de marche commandé.
- ✓ **L'insertion d'un départ** : elle consiste à ajouter un départ au tableau de marche commandé.
- ✓ **La retombe** : cette action consiste à décaler les horaires de départ des voitures à un terminus suite à une suppression ou à une injection de départ. Elle permet de rééquilibrer les intervalles entre les départs des voitures pour éviter une lacune.

■ **Onze manœuvres de régulation en ligne :**

- ✓ **La modification des temps de parcours alloués** : il s'agit d'accélérer ou de ralentir la progression d'un véhicule pour effectuer une partie de la course par rapport à l'horaire commandé dans le TM commandé. Cette action permet de faire correspondre les temps de parcours réels lorsque les conditions de circulations changent.
- ✓ **L'attente à un point d'arrêt** : l'attente consiste à différer d'une ou de plusieurs minutes le départ d'un véhicule à un point d'arrêt. Cette action permet soit la création volontaire d'un regroupement de véhicules ou au contraire le rétablissement de la régularité, ou encore l'absorption d'une charge ponctuelle (sortie d'école, d'usine, etc...)
- ✓ **Le transbordement** : c'est le transfert des voyageurs d'une voiture dans une autre. Cette manœuvre permet de libérer une voiture de sa charge en cas de panne ou de réaffectation de service.
- ✓ **Le dépassement sur ligne** : cette action consiste à doubler un véhicule par le suivant.
- ✓ **La permutation de machinistes sur ligne** : consiste à permuter deux véhicules circulant en sens opposé entre deux conducteurs à leur point de croisement.
- ✓ **La déviation** : consiste à faire circuler un ou plusieurs véhicules sur un itinéraire différent de l'itinéraire commandé. Cette action permet d'éviter une congestion risquant de perturber le trafic.
- ✓ **Parcours en descente** : le véhicule ne prend plus des voyageurs en montée mais permet la descente.

- ✓ ***Parcours haut-le-pied (HLP)*** : un véhicule réalise à vide une partie de la ligne afin de rejoindre un arrêt choisi par le régulateur.
- ✓ ***Film blanc*** : il combine le parcours haut-le-pied et le parcours en descente. Le véhicule n'affiche pas sa destination afin de ne faire que des descentes puis à vide réalise un haut-le-pied.
- ✓ ***Délestage*** : il consiste à mettre en déviation une partie des véhicules de la ligne.
- ✓ ***Le changement de conducteur sur ligne*** : il consiste à faire changer le conducteur d'un véhicule.

■ **Trois qui peuvent être commandées en terminus ou en ligne :**

- ✓ ***Le changement de mission par raccourcissement (demi-tour)*** : le demi-tour est un changement de course pour lequel la voiture effectue une course plus courte que celle commandée. Cette action permet de compenser un retard substantiel ou de replacer une voiture par rapport à son TM commandé.
- ✓ ***Le changement de mission par allongement*** : cette action consiste à affecter à une voiture prévue sur une course courte une course plus longue. Elle permet de conserver une fréquence élevée sur une partie chargée et non pas sur la totalité de la ligne.
- ✓ ***Injection d'un véhicule en réserve*** : une nouvelle course est insérée dans le TM commandé.

Suivant l'état de la ligne et le ou les critères à satisfaire, il reste à choisir les actions de régulation nécessaires.

#### **I.4.4 Contraintes de régulation**

Dans son travail de gestion de la ligne en temps réel, le régulateur est amené à prendre en considération un certain nombre de contraintes qui définissent un cadre décisionnel propre à la ligne qu'il exploite. Ces contraintes font qu'à logique identique les régulations peuvent être différentes. Ces contraintes peuvent être regroupées en quatre séries de facteurs :

- ✓ ***Conditions de circulation*** : Les conditions de circulation influent beaucoup sur les manœuvres de régulation. De nombreux phénomènes nuisent à la fluidité du trafic et entraînent un allongement important des temps de parcours : livraisons, embouteillages, carrefours, feux tricolores, mauvaise synchronisation des feux, stationnement illicite, traversée d'axe prioritaire, travaux, marchés, sorties d'établissements scolaires, etc ....

On peut distinguer trois aspects qui influent sur les procédures de régulation.

1. Adéquation des temps de parcours réel au temps de parcours alloués : Le temps de parcours alloué prend en compte des conditions moyennes de circulation. Or les temps de parcours

réel peuvent s'éloigner significativement de ces conditions moyennes. C'est le cas par exemple des différences très importantes dans les conditions de circulation en fonction des mois, des conditions météorologiques (jours de pluie ou beau temps), du jour de la semaine (jour de marché, vendredi après midi, ...). Le régulateur prend alors des mesures préventives en commandant des dérivés : prise d'avance si la perturbation est limitée dans le temps, prise de retard s'il est prévu qu'elle se prolonge.

2. Mode d'évolution de l'irrégularité sur chaque tronçon : Chaque tronçon de la ligne possède un mode d'évolution propre de l'irrégularité qui se traduit au niveau des intervalles :

- Soit l'irrégularité s'amplifie sur le tronçon, accentuant la déformation des intervalles, provoquant des lacunes et éventuellement des groupages (c'est le cas le plus fréquent) ; le régulateur est alors amené à effectuer des demi-tours avec transbordement de voyageurs s'il en a la possibilité ; sinon, il peut envoyer à son arrivée au terminus une voiture HLP pour résorber d'éventuelles lacunes.
- Soit l'irrégularité se résorbe sur le tronçon, et les intervalles tendent à s'équilibrer (c'est le cas le moins fréquent) ; il y a alors autorégulation sans intervention du régulateur.

3. Probabilité de congestion pour chaque tronçon : Sur certains tronçons, il peut se créer une situation de congestion (notamment en cas de livraison sur des voies à une file). Dans ce cas trois éléments sont à prendre en considération.

- Le temps perdu par le fait de la congestion : Si la congestion se prolonge dans le temps, le régulateur peut commander des déviations et des HLP
- La situation géographique du tronçon par rapport au terminus : Suivant que le tronçon se situe en début, au milieu ou en fin de ligne, le régulateur utilise des manœuvres différentes. En effet, si le tronçon se situe en début de ligne, le régulateur commande éventuellement des déviations, des HLP ou des demi-tours. Si le tronçon se situe en milieu de ligne, le régulateur a la possibilité supplémentaire d'exploiter la ligne en navette de part et d'autre du point dur.
- La situation géographique du tronçon par rapport à la charge : Si un phénomène de congestion apparaît sur un tronçon où beaucoup de voyageurs montent ou descendent, le régulateur ne peut effectuer de déviation systématique. Il peut alors adopter une position de compromis telle que la déviation d'une voiture sur deux.

✓ ***Demande de transport*** : dans la logique d'enlèvement de la charge, si l'offre ne répond plus à la demande, le régulateur gère différemment la ligne selon trois cas : le cas d'une charge ponctuelle, le cas d'une charge répartie sur l'ensemble de la ligne et le cas d'une charge répartie par tronçon.

1. Cas d'une charge ponctuelle : Afin d'acheminer le plus vite possible des voitures au point de charge, le régulateur est amené à effectuer des demi-tours, des HLP et des doublages. En général, le régulateur s'intéresse d'abord au sens le plus chargé mais les manœuvres seront très différentes selon l'importance de la charge dans l'autre sens.
  - La charge est importante dans les deux sens.
  - Les charges des deux sens sont différentes
2. Cas d'une charge répartie sur l'ensemble de la ligne : Dans ce cas, les voyageurs montent tout au long de la ligne. Dans la logique d'enlèvement de charge, la manœuvre de HLP destinée à acheminer le plus rapidement possible une voiture à un point de charge n'est donc pas efficace. Quand aux demi-tours, ils sont très mal perçus par le voyageur dans cette configuration. Dans le cas d'un retard important, le régulateur peut être amené à commander des pertes de révolution pour une ou plusieurs voitures.
3. Cas d'une charge répartie par tronçons : Dans ce cas, chaque tronçon est un tout qu'il est difficile de dissocier. Le régulateur devra gérer la ligne comme deux lignes consécutives. Dans la logique d'enlèvement de charge, aucune manœuvre n'est recommandable à l'intérieur de chaque tronçon. Par contre, le régulateur privilégiera les demi-tours et les HLP au début de chaque tronçon chargé.

✓ **Topographie de la ligne :** en ce qui concerne la configuration de la ligne, les variables à prendre en compte par le régulateur sont l'existence de point de retournement (demi-tour), d'itinéraire de déviation, d'itinéraire HLP, d'antennes, de tronçons communs avec d'autres lignes ainsi que la longueur de la ligne.

1. Existence de point de retournement : S'il n'existe pas de point de retournement, il n'y a pas possibilité pour le régulateur d'effectuer des demi-tours. Par contre, s'il y a plusieurs points de retournement, le régulateur choisira de commander un demi-tour au point de retournement permettant le gain de temps le plus approprié.
2. Existence d'itinéraires de déviation : Deux cas peuvent se présenter : voiture bloquée en charge sur l'itinéraire normal et départ à effectuer en un point précis de la ligne. Lorsqu'une voiture est bloquée sur l'itinéraire normal, l'existence d'un itinéraire de déviation donne la possibilité au régulateur de commander la déviation de la (des) voiture(s) suivante(s) en charge. Lorsqu'il y a une faible perturbation et que l'on a besoin d'amener une voiture en un point précis de la ligne afin qu'elle effectue un départ dans l'autre sens (sens de la charge), l'existence d'un itinéraire de déviation permet au régulateur de commander un HLP sans voyageur par un itinéraire différent de l'itinéraire normal.

3. Existence d'antennes : Lorsqu'il y a des antennes, le souci du régulateur est d'assurer la desserte de toutes les antennes. En ce qui concerne les manœuvres de régulation suite à une perturbation, le régulateur :
  - évite de couper la même antenne deux fois de suite,
  - aura la possibilité de jouer sur les missions en fonction de leurs longueurs plutôt que d'effectuer des demi-tours ; ces changements de mission pourront entraîner une refection partielle ou complète du TM.
4. Existence de troncs communs : L'existence d'un tronc commun offre au régulateur des possibilités supplémentaires en matière de régulation, mais seulement dans le cas où toutes les lignes aboutissent au même terminus. En effet, sur un tronc commun, la fréquence de passage est assez importante en général. Si une voiture est en retard et si le régulateur s'est assuré au préalable que cette voiture est suivie de près par une autre, alors le régulateur aura la possibilité de commander un demi-tour avec transbordement de voyageurs. Par contre, ce type de manœuvre n'est pas possible pour des lignes possédant un tronc commun et se dirigeant dans des directions différentes.
5. Longueur de la ligne : Suivant la longueur de la ligne, le régulateur adoptera des attitudes différentes lorsqu'il sera en présence d'une perturbation. D'une part, la longueur de la ligne détermine des temps de parcours plus ou moins importants. Sur une ligne longue, le régulateur est donc amené à commander des demi-tours assez rapidement. Par contre, sur une ligne courte, il laissera souvent courir le retard pour aller éventuellement jusqu'à perdre une révolution, car le gain de temps d'un éventuel demi-tour est relativement faible par rapport au temps de révolution. D'autre part, les voitures ne sont jamais très éloignées du point de relève et du terminus commandant sur une ligne courte. Dans le cas d'une ligne longue, le régulateur est amené à anticiper davantage sa prise de décision notamment pour préparer les relèves de personnel et assurer les derniers départs.

✓ **Structure d'exploitation** : la façon dont est organisée l'exploitation de la ligne a bien évidemment des conséquences importantes sur le travail du régulateur. En particulier, les éléments suivants jouent un rôle considérable :

1. Caractéristiques du graphillage : Nous avons cité trois caractéristiques dans le paragraphe I.2.1.1 à savoir la longueur des intervalles, la position des voitures rentrantes et l'existence de voitures spécialisées sur une mission
2. caractéristiques de l'habillage : Nous avons cité dans le paragraphe 1.2.1.2 deux facteurs d'habillage influencent le travail du régulateur à savoir le type d'habillage et la nature des services.

3. Nombre de dépôts de remisage : Le dépôt de remisage est le dépôt d'affectation des machinistes et des voitures. Il doit en principe rester inchangé. Cette contrainte est obligatoire pour les machinistes mais peut être contournée en certaines circonstances pour les voitures. Pour certaines lignes du réseau, il existe deux dépôts de remisage et donc deux points de relève. Le contrôleur peut procéder à toutes les manœuvres de régulation qu'il juge utiles mais il doit s'entourer de certaines précautions. Ainsi, lorsqu'il veut effectuer des sautages de police ou des demi-tours, il doit impérativement assurer les relèves et les fins de service à l'endroit prévu.
4. Situation du dépôt de remisage : Plus le dépôt de remisage est éloigné du point de relève ou du point d'insertion des voitures en ligne, plus le délai d'intervention de la part du dépôt est long, en particulier dans les cas de relève défaillante ou de voiture indisponible.
5. Situation du point de relève sur la ligne : elle joue un rôle dans des cas de régulation tel que les manœuvres au point de relève. En effet, en cas de relève en cours de route, par exemple, les sautages sont très difficiles à commander.
6. Facteurs liés au personnel : le travail de régulateur comporte une part importante de gestion du personnel machiniste.

#### **I.4.5 Dynamique de régulation**

On peut représenter les évolutions du système au cours du temps au moyen d'un schéma sous forme d'un graphe temporel (figure I.9) où les cercles représentent les états du réseau et les rectangles des événements de transition.

- $T_0$  est l'état initial du système, « isomorphe » aux objectifs de l'exploitation, c'est-à-dire optimisant la qualité de service.
- La ligne subit une ou plusieurs perturbations se traduisant par un éloignement du système de l'optimum.
- Si on ne fait rien, le système va dériver vers un état  $P_1$ .
- En  $T_1$ , l'exploitant interroge le système et prend connaissance de la dérive intervenue. Le système est alors dans l'état 1 plus au moins dégradé par rapport à l'état 0 selon que l'instant  $T_1$  est plus au moins éloigné du moment de déclenchement de la perturbation.
- L'exploitant intervient alors par une action de régulation, qui démarre en  $T_1$ , mais peut se prolonger dans le temps.
- Cette action vise à faire évoluer le système vers un état  $a_1$  isomorphe aux objectifs.
- Cependant, de nouvelles perturbations interviennent.
- Si on ne fait pas face à ces perturbations, le système va dériver vers un état  $P_2$

- En  $T_2$ , l'exploitant prend connaissance de la nouvelle dérive du système.
- Il initialise une action de régulation adaptée.
- Cette action vise à faire revenir le système à un état a2 isomorphe aux objectifs.
- Mais d'autres perturbations interviennent.
- ...Etc.

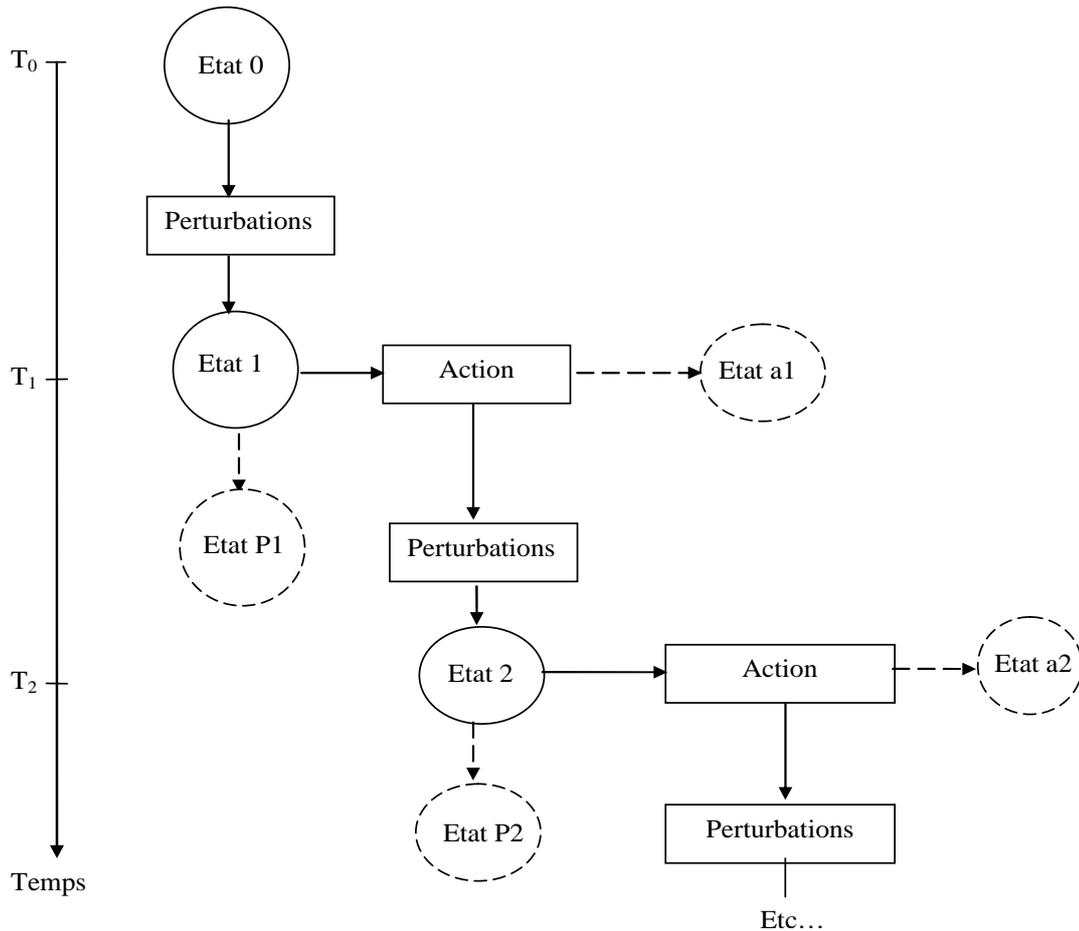


Figure I.9: Dynamique de la régulation.

### I.4.6 Reconfiguration

Ces dernières années, la complexité des réseaux de transport a eu un effet très important sur les perturbations. En effet, il y a eu l'apparition des incidents très compliqués ou il y a plusieurs zones concernées et surtout un blocage d'itinéraire pour une période de temps importante. Afin de pallier à ces incidents qui affectent sérieusement le trafic d'un réseau multimodal, d'éventuelles modifications des itinéraires des véhicules peuvent s'avérer nécessaires. Par exemple, dans le cas d'une panne de métro, certains bus sont souvent détournés de leurs parcours initiaux afin de desservir les arrêts du métro et assurer le service, surtout en absence de véhicules de réserve. Les

exploitants des réseaux de transport ont été obligés d'utiliser ce type de décision de régulation pour ces cas difficiles. Il s'agit de la reconfiguration. Cette manœuvre consiste à refaire la planification spatiale et temporaire de toute la zone perturbée en temps réel. Nous pouvons citer quelques cas d'incidents où il faut appliquer une reconfiguration :

- ✓ *Plusieurs perturbations simultanées* : un régulateur peut se trouver dans une situation où il y a plusieurs perturbations simultanées. Il doit donner les décisions adéquates pour chaque perturbation. Mais les zones perturbées peuvent se chevaucher et la complexité est d'autant plus élevée que la partie du réseau perturbée est importante. Les manœuvres simples que nous avons présentées ne peuvent pas servir dans cette situation. Pour diminuer le temps d'attente, le régulateur doit assurer une absorption des retards et de flux des passagers. Il doit proposer les itinéraires secondaires les plus courts et les plus rapides.
- ✓ *Des itinéraires bouchés* : l'encombrement des véhicules dans un réseau routier peut affecter la circulation dans un itinéraire et créer un bouchon. Le régulateur doit proposer d'autres itinéraires plus rapides pour servir le maximum des passagers et absorber les retards. Dans ces cas perturbés, le régulateur peut proposer à un ou plusieurs véhicules de ne pas passer par certaines stations.
- ✓ *Un flux de passagers très important* : lors d'une manifestation quelconque (un match de foot par exemple), le flux des passagers dans les stations autour de la zone concernée peut-être très important. Le nombre de voyageurs dépasse la capacité des stations et des véhicules. Le régulateur doit réagir pour plus de confort et de sécurité. En absence ou insuffisance de véhicules de réserve, il sera obligé de détourner certains véhicules de leurs parcours initiaux. Il doit donc proposer les parcours optimaux de point de vue temps et distance de parcours et surtout nombre des passagers servis.
- ✓ *Un retard très important* : certains incidents de trafic provoquent des retards très importants qui peuvent conduire à la formation de trains de bus. Afin de résoudre ces problèmes, le régulateur doit changer l'itinéraire de certains véhicules. Il commande ce type de manœuvre pendant une période au bout de laquelle le fonctionnement normal sera rétabli.

## I.5 Conclusion

La complexité des réseaux de transport multimodal rend la tâche des exploitants de plus en plus difficile, autant, en temps anticipé qu'en temps réel. En effet, ces exploitants commencent par une planification du réseau pour optimiser l'utilisation des moyens existants (véhicules, ressources humaines,...) ; l'objectif étant de bien servir les clients (passagers) avec plus de confort

et un minimum de temps d'attente. Ils continuent ensuite par le suivi en temps réel avec l'apparition des perturbations. Ils doivent alors effectuer une régulation rapide pour absorber les retards.

Dans ce chapitre nous avons présenté en premier lieu la planification en temps anticipé. Un réseau de transport a une configuration physique définissant les itinéraires et les stations et une configuration horaire qui se fait à travers deux étapes à savoir le graphicaage et l'habillage. Après avoir parlé de la multimodalité de ces réseaux de transport, nous avons présenté les perturbations qui peuvent affecter le trafic et qui sont surtout aléatoires et d'origines différentes. Dans la troisième partie nous avons présenté la régulation en temps réel des réseaux perturbés. C'est une adaptation de l'offre aux conditions réelles de l'exploitation effectuée par des opérateurs humains appelés les régulateurs.

Ces régulateurs doivent exécuter ainsi, en temps réel, des tâches difficiles appréhendées sans aide, en particulier en présence de plusieurs perturbations. Un Système d'Aide à la Décision, SAD, s'avère alors nécessaire pour les assister dans la régulation. Nous traitons dans le chapitre suivant les systèmes de ce type, dédiés au transport.

## **Chapitre II: Système d'aide à la décision pour les réseaux de transport multimodal**

## II.1 Introduction

Les réseaux transport urbain sont de plus en plus complexes. En effet, d'une part, le nombre de véhicules, de modes de transport et des stations est en croissance important. Et d'autre part, les exigences de la clientèle sont de plus en plus difficiles à satisfaire en termes d'innovation, et d'amélioration de la qualité de service.

Pour mieux gérer l'exploitation de ces réseaux de transport, l'apparition des Systèmes d'Aide à l'Exploitation (SAE) a beaucoup aidé les exploitants. Ces systèmes traitent des quantités très importantes d'informations. Mais, avec l'apparition des perturbations de plus en plus complexes et simultanées, les régulateurs n'arrivent pas à prendre en compte ce grand nombre d'informations pour la prise de décision. Et ils trouvent de grandes difficultés lors d'incidents nécessitant une reconfiguration spatiale. Ainsi il y a eu une évolution vers des systèmes informatiques d'aide à la régulation en plus des SAE. Dans le même contexte, nous proposons un système d'aide à la régulation et à la reconfiguration.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les systèmes d'aide à l'exploitation dans la première partie et les systèmes d'aide à la régulation dans la deuxième partie. Nous allons aussi proposer, dans cette partie, un état de l'art des travaux qui ont été menés dans le cadre de la modélisation des réseaux de transport ainsi que les approches existantes pour la régulation. La troisième partie est une présentation du système d'aide à la régulation et à la reconfiguration proposé.

## II.2 Système d'aide à l'exploitation

### II.2.1 Principe d'un SAE

La gestion des réseaux de transport devient de plus en plus difficile. Leur complexité ne cesse d'augmenter. Ceci explique l'importance des Systèmes d'Aide à l'Exploitation, SAE. Ils ont été conçus pour garantir au mieux le déroulement de la planification théorique de l'exploitation. Ces systèmes informatiques permettent aux intervenants dans un réseau de transport d'avoir une vision détaillée sur le réseau. Ils effectuent une surveillance en comparant les horaires réels et les horaires théoriques des tableaux de marche. Puis ils communiquent l'information aux régulateurs pour prendre une décision et l'appliquer comme l'illustre la figure II.1.

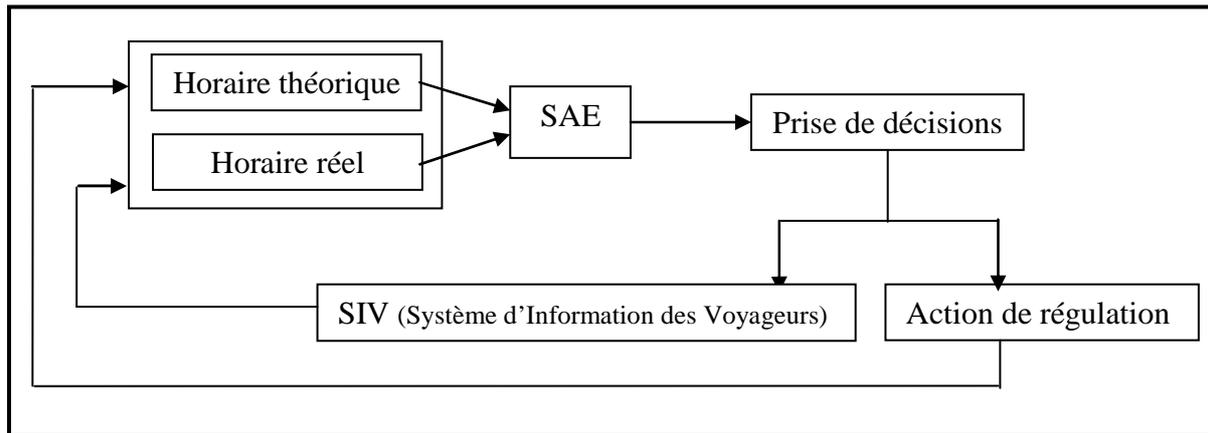


Figure II.1: boucle fermée de la régulation

Le SAE est l'interface entre les régulateurs, les conducteurs des véhicules et les passagers. Un SAE traite deux types d'informations :

- Des informations théoriques représentant les résultats du processus de planification (tableaux de marche et listes de service) présentés dans le premier chapitre enregistrés en temps différé par les graphiqueurs.
- Des informations « temps réel » représentant l'état du réseau (la localisation des véhicules, leurs niveaux d'occupation, leurs itinéraires, leurs horaires de passage réel, la communication avec le chauffeur, ...etc.)

Le SAE enregistre l'ensemble de toutes les informations concernant le réseau pour avoir une image complète de la situation théorique de l'exploitation. L'ordinateur définit les fichiers suivants :

- fichier du réseau décrivant le réseau existant.
- fichier des lignes contenant les données de base du tracé des lignes et des arrêts.
- Fichiers des horaires pour préparer l'horaire journalier.
- Fichier des correspondances avec toutes les données garantissant une liaison aux intersections.
- Fichier des véhicules avec toutes les données des véhicules utilisées.

## II.2.2 Rôle d'un SAE

Le SAE est en premier lieu un système d'aide à l'information des intervenants d'un réseau de transport (figure II.2). Ses fonctionnalités sont :

- La saisie de la localisation permanente des véhicules (système GPS).
- La saisie de l'occupation des véhicules.

- L'échange d'informations entre le poste central et les véhicules.
- L'information des passagers sur l'exploitation en cours.
- L'influence sur les feux de signalisation routière,
- Les évaluations statistiques.

Ces fonctionnalités du SAE garantissent une meilleure surveillance du déroulement de l'exploitation pour une régulation plus efficace. Ainsi, le rôle principal d'un SAE est de permettre la comparaison des informations théoriques avec les informations réelles [Balbo, 00]. Ce qui permet la mise à jour différé et la modification en temps réel des tableaux de marche TM :

- Mise à jour différée : Le TM initial produit par le processus de planification assuré par les graphiqueurs repose sur l'optimisation de l'offre de transport. Le SAE effectue une mise à jour de ce TM en temps différé ; le réseau de transport est soumis à des variations des conditions de circulation et de la structure de la demande.
- Modification en temps réel : Le SAE permet au régulateur de modifier en temps réel le TM théorique en cas de perturbation.

Le SAE compare les horaires théoriques aux horaires réels de passages des véhicules et en cas d'écart importants, il déclenche les différents types d'alarmes que nous avons présentés dans le chapitre I.

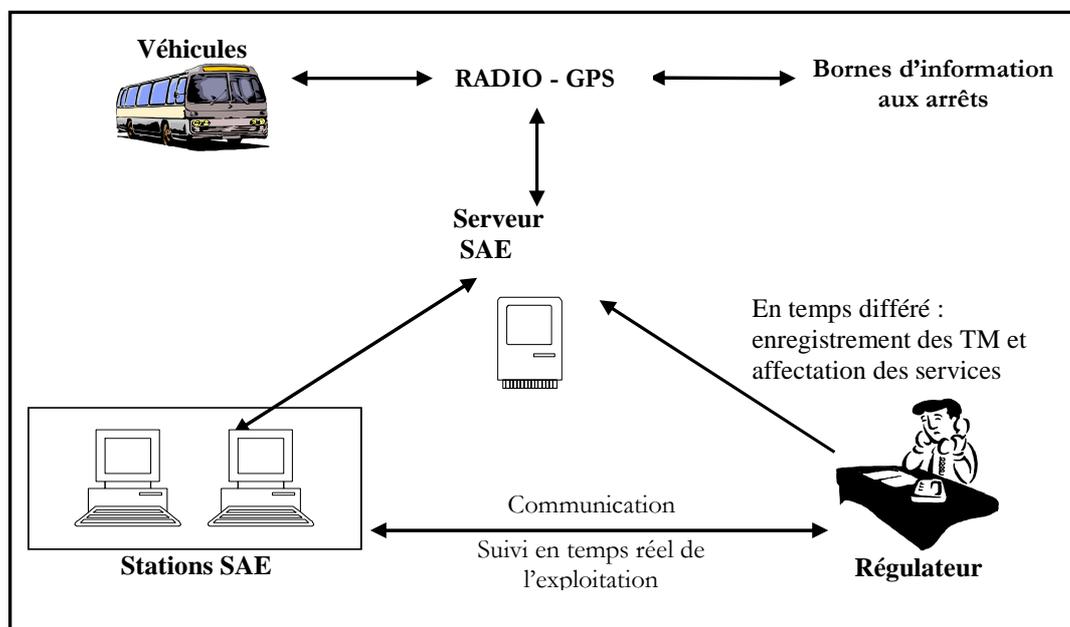


Figure II.2: Fonctionnement d'un SAE.

La gestion de l'exploitation des réseaux de transport urbain a connu plusieurs phases de développement [khorovitch & al., 91]. Dans la première phase, des agents de surveillance étaient

placés à certains arrêts stratégique du réseau afin d'observer les passages réels des bus et dans le cas de perturbations importantes, ils informaient la centrale par appels téléphonique. L'utilisation de la radiophonie a permis, dans une seconde phase, au chauffeur de communiquer directement avec le poste central. Dans la troisième phase, la complexité des réseaux a exigé le développement de système informatique puissant d'aide à l'exploitation (SAE). L'étape actuelle, qui représente la quatrième phase, consiste à ajouter un système d'aide à la décision pour aider les régulateurs et un système d'aide à l'information des voyageurs.

## **II.3 Système d'aide à la régulation**

### **II.3.1 Systèmes d'aide à la décision**

Un Système d'Aide à la Décision (SAD) est un outil permettant d'assister le décideur dans sa prise de décision. En effet, ces systèmes forment une catégorie particulière de systèmes informatiques qui supportent les activités de prise de décision dans différents domaines. Un SAD bien conçu est un système interactif à base de logiciels qui aide les décideurs à compiler de l'information utile à partir de données brutes, de documents, de connaissances personnelles et (ou) de modèles opérationnels pour les fins d'identification et de résolution de problèmes et de prise de décisions. En principe, un système d'aide à la décision simplifie et renforce un processus décisionnel. En plus du fait qu'il est un système de traitement de l'information (STI) [Lévine & al., 89], un SAD est un résolveur de problèmes [Claude, 01].

Un processus de décision tel qu'il est présenté dans [Claude, 01] et illustré par la figure II.3, se compose de quatre phases ou étapes [Besma, 03]. La première est une étape de modélisation qui vient après la détection du problème et qui permet de concevoir un modèle pour la résolution. Il se charge de : la localisation des intervenants et des entités concernés par la résolution, la définition de l'horizon de décisions, des paramètres et des contraintes et la formation des critères. Puis on trouve une étape de résolution ou une phase de choix d'approche algorithmique. Et à partir des solutions proposées, l'interprétation permet d'établir les décisions qui seront appliquées à travers une dernière étape d'implémentation où il y aura aussi le suivi, la correction et la validation de ces décisions [Borne & al, 03].

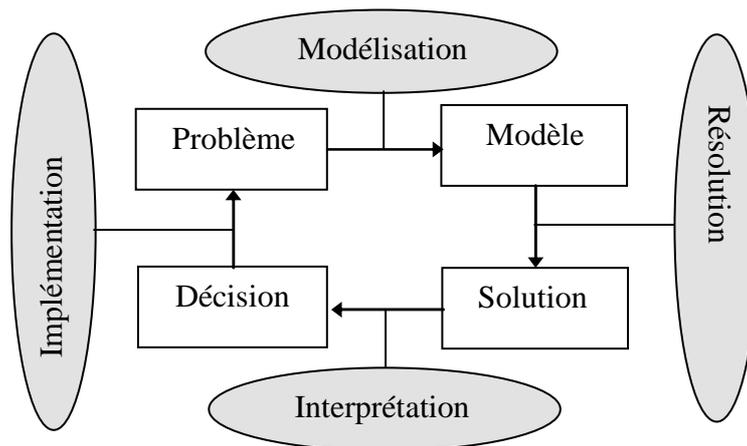


Figure II.3: Processus de décision.

Un SAD se compose de trois modules (figure II.4) :

- Un module de dialogue qui joue le rôle d'interface entre l'utilisateur et le reste du système. Il permet au décideur d'accéder aux deux autres modules, à savoir les données et les fonctions de calcul.
- Un module de données qui assure la fonction de mémoire. Il stocke les données permanentes décrivant les états du réseau. Il gère aussi l'enregistrement et l'effacement des données volatiles selon les souhaits de l'utilisateur. Ces données correspondent aux résultats obtenus au cours du traitement.
- Un module « modèle » qui est l'ensemble des approches et fonctions de calcul pour la gestion des données mis à disposition de l'utilisateur. C'est dans ce module qu'on trouve les outils de la résolution des problèmes qui caractérise le SAD des autre STI.

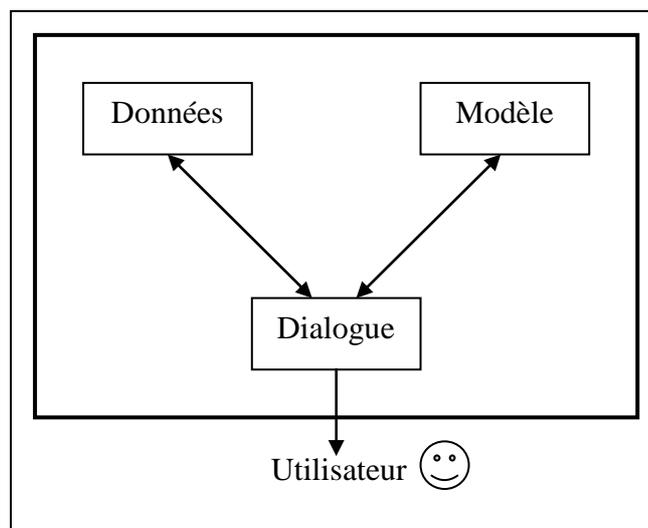


Figure II.4: Principe des SAD.

### II.3.2 Exemple d'application des SAD

La complexité de certains domaines et l'importance des décisions à prendre dans d'autres ont fait que les SAD ont été mis en place au niveau de plusieurs activités. On les trouve dans l'industrie pour la gestion de production [Fox, 81] et la surveillance des sites industriels à haut risque [Boukachour & al., 00]. On les trouve aussi dans l'optimisation des tests électroniques [Pattipati & Deckert, 91] et la fabrication automatique de wafer [Pilli, 88].

Dans le domaine du transport, on peut citer le système d'allocation de wagon à la SNCF, qui permet d'assister les répartiteurs (experts au sein du central de répartition) [Lévine & al., 89] dans leur tâche de répartition de wagon de marchandise. Les recherches actuelles concernant le domaine du transport urbain visent à concevoir des systèmes d'aide à la régulation.

### II.3.3 Système d'aide à la régulation

Des perturbations aléatoires affectant les réseaux rendent la gestion difficile sans l'intégration d'un système informatique d'aide à la décision au SAE. Ce système a le rôle d'assister les régulateurs à trouver les décisions adéquates pour rétablir la situation théorique dans le cas d'une exploitation perturbée. Il s'agit alors d'un Système d'Aide à la Régulation, SAR. Il intervient entre le SAE qui détecte les perturbations et le régulateur qui décide l'action de régulation. La figure II.5 présente les étapes du processus de contrôle en temps réel du trafic d'un réseau de transport [Demmou, 98] [Besma, 03].

Le SAE permet de donner une vision globale du déroulement de l'exploitation et à partir de l'état réel du réseau il détecte les perturbations. La surveillance en temps réel du réseau permet de détecter au plus tôt les incidents. Les identifier permet de déterminer les différents paramètres (cause de l'incident, les zones concernés par la régulation, l'effet sur les correspondances et sur les autres lignes...) nécessaires à la détermination des actions régulatrices.

Le SAR commence par une analyse rapide de l'incident identifié. Il s'agit d'un premier diagnostic pouvant donner une estimation de l'impact de la perturbation. Puis le SAR propose au régulateur des actions ainsi que leurs effets sur l'état du réseau. Ce dernier (le régulateur) choisit une action et le SAR effectue l'implémentation.

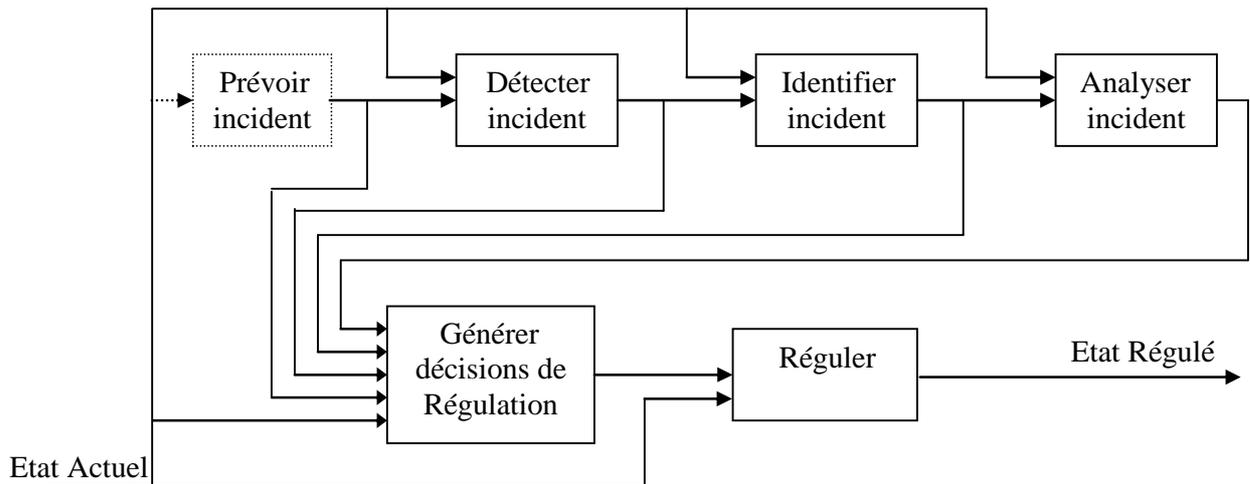


Figure II.5: Processus de contrôle en temps réel du trafic d'un réseau de transport urbain.

### II.3.4 Modélisation des réseaux de transport

L'exploitation et la régulation des réseaux de transport multimodal sont des tâches complexes qui nécessitent l'élaboration de modèles appropriés. Plusieurs approches de représentation des réseaux de transport ont été comparées dans la thèse de Besma [Besma, 03] :

- **Modélisation des courses** : Cette approche s'appuie sur la notion de course. Chaque course est illustrée par un nœud de début et un nœud de fin lié par au moins un arc qui représente les contraintes de précédence qui peuvent lier les courses [Huissman & al., 01] [Desrocher & al., 99].
- **Modélisation par les Réseaux De Pétri (RDP)** : Les RDP ont été utilisés pour la modélisation du flux des voyageurs par [Castelain & al., 02] qui a présenté un modèle de réseau de pétri stochastique pour un réseau de bus dont les jetons modélisent les voyageurs. La modélisation par les RDP stochastiques a été aussi utilisée pour les correspondances [Abbas-Turki & al., 02]. Dans le modèle de [Nait-Sidi & al., 02], les transitions représentent les arrêts de bus et les places représentent les déplacements inter- arrêts. Les temps d'attente sont calculés selon un modèle mathématique.
- **Modélisation des débits** : Cette modélisation du trafic routier inclut les voitures particulières. Elle considère les flux sur les chemins. [Wynter & al., 03] modélise les débits des itinéraires suivant les coûts des chemins (péage, billets) et la durée des parcours. Un réseau est illustré par un graphe. Sur chaque arc on marque le flot et le temps de ce parcours et l'épaisseur représente l'importance du débit.

- **Modélisation des itinéraires** : cette méthode représente des itinéraires d'un réseau de transport par un graphe dont les arcs représentent les déplacements et les nœuds les arrêts avec l'utilisation d'une couleur particulière pour les nœuds de correspondance [Ngamchai & Lovell, 00].

[Besma, 03] a comparé ces modélisations à travers cinq principaux paramètres, qu'il faut considérer dans la construction d'un modèle pour la régulation des réseaux de transport multimodal. Ces paramètres sont : la multimodalité, la surveillance, la demande, l'horaire et l'itinéraire. Elle a conclu qu'aucun modèle ne semble parfaitement adapté à ce problème. [Besma, 03] a donc proposé une hybridation entre un système multi-agent et une modélisation des itinéraires par les graphes avec une configuration spatiale décrite par les arrêts et une configuration horaire décrite par les véhicules. Nous allons revenir en détail sur cette modélisation dans la section suivante.

### II.3.5 Approches existantes pour l'aide à la régulation

Plusieurs approches ont été élaborées pour la régulation en temps réel des réseaux de transport. Ces travaux menés récemment s'intéressent au développement d'algorithmes de régulation des trafics et de gestion de l'exploitation de transport urbain. Nous présentons ci-dessous les principales approches.

#### II.3.5.1 Approche floue

La logique floue est une technique utilisée en intelligence artificielle. Elle a été formalisée par Lotfi Zadeh en 1965 et utilisée dans des domaines aussi variés que l'automatisme (freins ABS), la robotique (reconnaissance de formes), la gestion de la circulation routière (feux rouges), le contrôle aérien... Elle s'appuie sur la théorie mathématique des sous-ensembles flous. Cette théorie est une extension de la théorie des ensembles classiques. C'est une théorie formelle et mathématique dans le sens où Zadeh, en partant du concept de fonction d'appartenance pour modéliser la définition d'un sous-ensemble d'un univers donné, a élaboré un modèle complet de propriétés et de définitions formelles.

La logique floue a été appliquée dans divers travaux de développement des systèmes d'aide à la régulation. Ils ont été menés surtout dans le cadre des thèses de doctorat à l'université des sciences et technologies de Lille.

[Bailly, 96] présente un outil de régulation des lignes de métro basé sur la logique floue. Puis Souhli a proposé une modélisation de la régulation du trafic de réseaux de transport urbain

[Soulhi, 00]. Chihaiab a proposé une approche floue pour la régulation en interstation [Chihaiab, 02]. Ce travail s'appuie sur un algorithme de propagation de contraintes.

### **II.3.5.2 Approche multi-agent**

Un système multi-agent (SMA) est un ensemble d'agents situés dans un certain environnement et interagissant selon une certaine organisation. Un agent est un système informatique encapsulé qui est situé dans un environnement, et qui est capable d'effectuer des actions autonomes et flexibles afin d'atteindre les objectifs pour lesquels il a été conçu.

Objets de recherche en intelligence artificielle de longue date, les systèmes multi-agents forment un modèle intéressant de sociétés, et ont à ce titre des champs d'application larges, allant jusqu'aux sciences humaines.

Cette approche a été utilisée pour la régulation des réseaux de transport urbain [Balbo, 00] et [Laichour, 02] ont proposé des approches agent pour l'aide à la régulation d'un réseau d'autobus. [Laichour, 02] a conçu son approche pour la régulation au niveau des nœuds des correspondances; ce critère de correspondance n'est pas traité dans le système de [Balbo, 00].

[Besma, 03] a utilisé un système multi-agent pour la surveillance, le diagnostic et la régulation dans une hybridation avec les algorithmes évolutionnistes. La première approche (SMA) est appliquée en cas de situations familières.

Les réseaux de transport urbain forment des systèmes distribués et ouverts, leur gestion par des systèmes multi-agent semble être adaptée surtout pour la surveillance. Mais cette tâche est bien établie par les SAE. Il est donc plus intéressant pour les SAR de gagner en temps d'exécution et appliquer des approches efficaces pour le calcul des décisions de régulation.

### **II.3.5.3 Approche évolutionnistes**

Les Algorithmes Evolutionnistes (AE) sont des métaheuristiques basées sur des métaphores biologiques inspirées des mécanismes d'évolution darwinienne et de la génétique moderne. Ce sont des algorithmes itératifs qui procèdent par différentes étapes en vue de résoudre un problème d'optimisation.

[Deb, 98] a proposé une approche de planification pour le problème des correspondances entre les lignes. Cette approche s'appuie sur les algorithmes génétiques et a comme but la minimisation de temps d'attente des passagers.

[Aloulou, 99] a présenté une approche de régulation d'une ligne de bus par algorithme génétique pour optimiser la ponctualité et la régularité dont les solutions sont des décisions liées à la modification des horaires de passage des véhicules.

Pour le même objectif consistant à résorber des retards causés par une perturbation en temps réel [Besma, 03] a présenté dans sa thèse un système d'aide à la régulation qui repose sur une approche agent, que nous avons présenté précédemment, et une approche évolutionniste pour la régulation temporelle ou spatiotemporelle en cas de situations non familières. Elle optimise les critères de ponctualité, régularité et correspondance.

#### II.3.5.4 Autres approches

Nous avons trouvé dans la littérature une première approche conçue pour la régulation des rames de métro. Il s'agit de l'approche cinématique [Soulhi, 00]. Son principe consiste à identifier à tout instant et pour chaque rame les différents paramètres cinématiques qui la caractérisent (sa position, sa vitesse, son accélération...). L'objectif de la régulation est de minimiser l'écart entre les valeurs mesurées et celles déterminées en mode de fonctionnement non perturbé. Il s'agit alors de minimiser :

- L'écart entre les positions réelles et théoriques
- L'écart entre les vitesses réelles et théoriques
- Les irrégularités des intervalles de passages successifs des véhicules.

L'inconvénient de cette approche réside dans le fait que les grandeurs caractérisant l'interface rame-usagers à quai sont difficilement maîtrisables et le coût du système d'identification et d'acquisition en temps réel des diverses informations est élevé [Chihaiib, 02].

Il y a aussi l'approche de séquentialisation temporelle qui s'appuie sur des modèles mathématique caractérisant le transfert d'un véhicule ou d'une rame entre deux points d'arrêts successifs. La difficulté de cette approche réside dans l'obtention d'un estimateur fiable pour les paramètres ainsi que le traitement des perturbations se fait au niveau des arrêts alors qu'il est plus efficace de réagir au moment de la détection [Chihaiib, 02].

[LI & al., 91] ont proposé un modèle de programmation linéaire stochastique pour la régulation d'une ligne de bus en tenant compte des flux des passagers. Ils procèdent par la modification des courses affectés aux véhicules grâce à un archive des scénarios. Mais ils ne traitent pas la correspondance.

Dans son travail, Mr. Ould Sidi traite essentiellement les deux problèmes de construction et d'évaluation des décisions [Ould Sidi & al., 05]. Il a proposé une méthode d'optimisation

utilisant la théorie de la logique floue et les algorithmes évolutionnistes pour optimiser les solutions de régulation et une méthode d'évaluation des décisions basée sur l'application de l'intégrale de Choquet comme opérateur d'agrégation pour évaluer les décisions [Ould Sidi & al., 05].

[Bouomrane & al., 05] a proposé un système d'aide à la décision pour la régulation d'un réseau de transport bimodal intégrant trois modules. Le premier comprend l'implémentation d'algorithmes de régulation en terminus ou en lignes tels que le départ programmé (DP) qui est utilisé dès qu'un véhicule arrive au terminus avec un retard excédant le temps de battement ou le Départ Programmé par Anticipation (DPA) qui à l'inverse permet d'agir sur les véhicules en amont et en aval du véhicule perturbé. Ces algorithmes ont fait l'objet d'une évaluation dans [Besma, 03], et sont basés sur des modèles mathématiques. Le deuxième module exploite une base de connaissance construite sur la base d'une expertise réalisée en étudiant la liste des actions de régulation et de leurs conditions de réalisation. Le troisième module est basé sur le «Raisonnement à Partir de Cas » [Bouomrane & al., 06] pour les perturbations familières.

En plus des inconvénients cités précédemment, toutes les approches de régulation qui ont été proposées ne traitent pas les perturbations complexes et simultanés et surtout les cas de reconfiguration spatiale. La seule approche qui a évoqué une régulation spatiale est celle de [Besma, 03] qui propose des décisions spatiales se limitant au passage ou non par une station. Alors que dans des cas de perturbations complexes, le régulateur doit définir en temps réel des nouveaux itinéraires optimaux pour les véhicules de la zone perturbée.

La plupart des systèmes d'aide à la régulation que nous avons cités ne traitent pas non plus le cas des réseaux de transport multimodal. De plus, certaines approches ne considèrent que les critères de ponctualité et de régularité et d'autres sont spécifiques à la correspondance.

## **II.4 Système d'Aide à la Régulation et la Reconfiguration (SARR)**

### **II.4.1 Rôle du système**

Le rôle d'un régulateur est l'adaptation en temps réel des tableaux de marches théoriques aux conditions réels d'exploitation. Pour assister cet opérateur humain dans sa tâche de régulation, nous proposons un système d'aide à la décision qui a pour rôle :

- La régulation : Après une première analyse rapide de la perturbation le système propose l'une des manœuvres de régulation connues. Nous pouvons considérer

cette première action d'aide à la régulation comme une phase de diagnostic mais aussi une première proposition de décisions de régulation familières.

- La reconfiguration spatiale : Parmi les décisions proposées par le système d'aide à la régulation dans le premier module, il y a la reconfiguration. Il s'agit de définir en temps réel l'ensemble des stations et des itinéraires pour chaque véhicule perturbé. Cette action sera proposée et traitée dans le cas des perturbations simultanées et/ou complexes.
- La planification horaire : A partir d'un tableau de marche perturbé (TMP), notre système propose un tableau de marche régulé (TMR) pour résorber les retards causés par les incidents.

Notre SARR se situe dans le processus de contrôle du réseau de transport en formant un triangle d'échange avec le régulateur et le SAE (figure II.6).

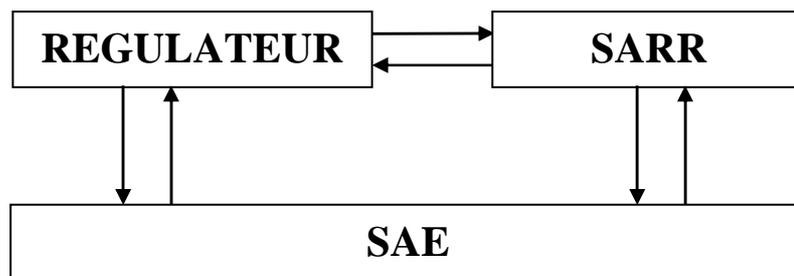


Figure II.6: Position du SARR dans le processus global de contrôle du réseau.

Le régulateur est le décideur. Il est assisté par le SAE pour la surveillance et le SARR pour les décisions de régulation.

- **La communication Régulateur-SAE** représente, dans un sens Régulateur-SAE, la saisie des TMT, leur mise à jour en temps réel, l'application des actions de régulation, et, dans l'autre sens, la détection des perturbations et l'envoi des informations de déroulement de l'exploitation.
- **La liaison Régulateur-SARR** représente dans un sens, la mise à jour de quelques données relatives aux perturbations (fournies par exemple par les conducteurs des véhicules) et la demande ou la validation de mesures de régulation, et la proposition de solutions dans l'autre sens.
- **SARR-SAE** illustre l'application des mesures de régulation et de reconfiguration adaptées et validées par le régulateur dans un le sens SARR-SAE et la mise à jour des données

relatives aux perturbations (les paramètres caractérisant une perturbation ainsi que les graphes des zones perturbées pour la reconfiguration) dans l'autre sens.

## II.4.2 Architecture du système

Notre SARR comporte trois modules pour les trois principaux objectifs cités dans le paragraphe précédent. La figure II.7 présente l'architecture de ce système proposé.

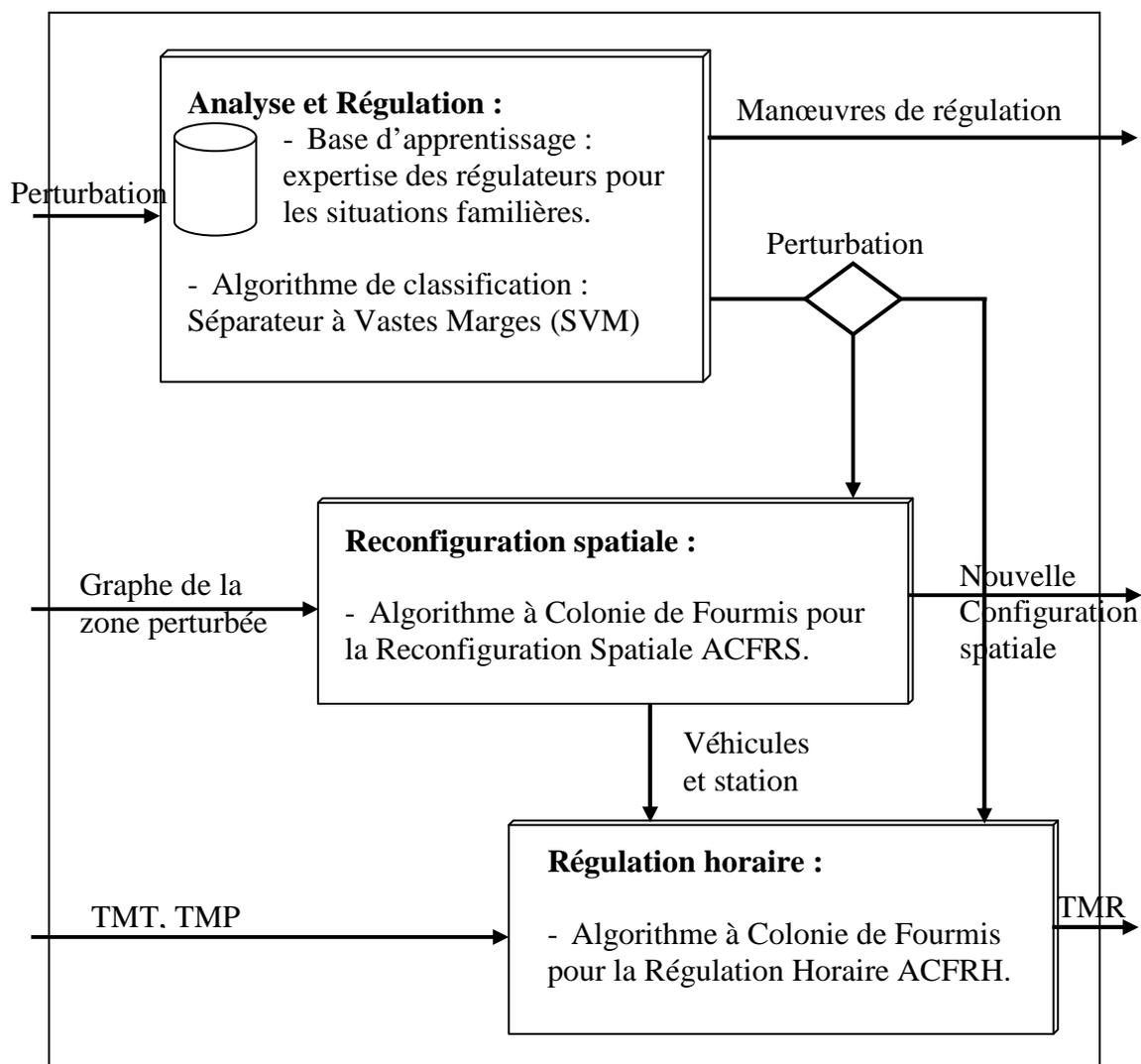


Figure II.7: Architecture du SARR.

Chaque module communique avec le régulateur et avec le SAE en entrée et en sortie. Le SAE déclenche une alerte de perturbation comme entrée du SARR, en fournissant les différents paramètres caractérisant ces incidents et il reçoit les décisions de régulation pour l'appliquer.

Le régulateur de son côté complète l'ensemble des paramètres manquants en entrée du SARR et définit ses préférences pondérant l'importance de chaque critère de régulation. Il reçoit en sortie du SARR les solutions proposées par chaque module pour choix et application.

### II.4.2.1 Module d'analyse et régulation

Nous avons conçu un premier module pour l'analyse des perturbations et la détermination des actions de régulations associées. C'est une première aide à la régulation dans laquelle ce module applique en temps réels des actions dans des cas familiers. Il distingue, d'une part, les perturbations familières et propose l'une des manœuvres de régulation appropriées et d'autre part, les situations non familières ou difficiles qui seront traitées par les autres modules.

Ce module utilise une classification à base d'apprentissage statistique. Il s'agit de l'outil de classification SVM (Séparateur à Vaste Marge ou Support Vectors Machines en anglais). En effet, notre système disposera d'une base d'apprentissage contenant un ensemble d'exemples des perturbations et les décisions attribués par des experts. A partir de cette base d'expertise, le module permet d'attribuer une manœuvre de régulation à toute perturbation que le SAE présente en entrée. Cette entrée est sous forme d'un vecteur de données contenant les différents paramètres caractérisant une perturbation (lieu, temps, source, effet,...). La sortie est une hiérarchisation des décisions adéquates. Nous allons revenir en détail au chapitre suivant sur cette approche.

Ce module nous permet de distinguer les incidents qui nécessitent une reconfiguration spatiale.

### II.4.2.2 Module de reconfiguration spatiale

Dans le cas des perturbations simultanées et/ou complexes, nous devons proposer comme solution de nouveaux itinéraires et de nouvelles stations pour les véhicules de la zone perturbée. Cette nouvelle configuration spatiale doit permettre d'absorber le flux des passagers et par la suite diminuer le temps d'attente. Nous avons donc conçu un deuxième module dans notre SARR qui s'occupe de la reconfiguration spatiale d'une partie ou de la totalité du réseau, dans les cas jugés difficiles par le premier module.

Ce module est basé sur une approche de recherche d'itinéraire dans un graphe de transport multimodal. Nous utilisons une métaheuristique spécialement développé à cet effet. Il s'agit de l'Algorithme à Colonie de Fourmis pour la Reconfiguration Spatiale, ACFRS. Cette approche nouvelle est présentée au chapitre 4.

Le graphe de la zone perturbée avec l'ensemble des véhicules concernés par la reconfiguration constitue l'entrée de ce module. Nous représentons l'ensemble des stations considérées par  $S^H$  et celui des véhicules par  $V^H$ . Ainsi, l'horizon de la régulation est constitué par :

$$\mathcal{H} = \{\mathcal{S}^{\mathcal{H}} \cup \mathcal{V}^{\mathcal{H}}\};$$

avec  $\mathcal{S}^{\mathcal{H}} \subset \mathcal{S}$  et  $\mathcal{V}^{\mathcal{H}} \subset \mathcal{V}$ .

Un arrêt est généralement identifié<sup>1</sup> par la ligne à laquelle il appartient. Nous notons donc la  $k^{\text{ème}}$  station de la ligne  $r$  par  $S_k^r$ . De même,  $V_i^l$  représente le  $i^{\text{ème}}$  véhicule de la ligne  $l$ .

Les horaires de passage affectés à chaque véhicule concernent son arrivée et son départ des différents arrêts par lesquels il passe. Nous notons  $ta_{ij}^{lm}$  l'horaire d'arrivée du véhicule  $V_i^l$  à l'arrêt  $S_j^m$  et  $td_{ij}^{lm}$  son horaire de départ de cette station.

La sortie de ce module est la nouvelle configuration spatiale constituée par les stations et les itinéraires (arcs) affectés à chaque véhicule de la zone perturbée. Les nouveaux tableaux de marches sont élaborés par le module suivant, celui chargé de la régulation horaire.

### II.4.2.3 Module de régulation horaire

Par définition, une perturbation est un décalage entre la planification théorique et les horaires réels. Pour résorber ce retard et assurer certains critères tel que la régularité de passage des véhicules, nous devons agir rapidement sur les horaires des véhicules de l'horizon de régulation et proposer de nouveaux tableaux de marche que nous appelons tableaux de marche régulés (TMR).

La régulation horaire constitue un problème d'analyse multicritère difficile avec la dimension importante de l'espace de recherche (nombre de stations et de véhicules). Plusieurs critères jugés importants dans la régulation des réseaux de transport multimodal sont pris en compte

Ce module utilise l'Algorithme à Colonie de Fourmis pour la Régulation Horaire (ACFRH). Le chapitre 4 donne une description détaillée de cette métaheuristique.

L'entrée de ce module est l'ensemble des tableaux de marche théoriques et perturbés ainsi que les préférences du régulateur en ce qui concerne les critères à optimiser. En effet, le régulateur doit exprimer au système l'importance de chaque critère sous la forme de pondérations. Des Tableaux de Marche Régulés TMR seront proposés, en sortie, par ce module.

### II.4.3 Fonctionnement du système

---

<sup>1</sup> Pour les arrêts appartenant à plus d'une ligne, nous gardons la même notation tout en sachant que c'est une seule station. Toutefois, elle est représentée par un seul sommet dans le graphe.

Après avoir décrit l'architecture du SARR que nous proposons, nous présentons le processus de régulation et de reconfiguration dans la figure II.7. À partir d'une alerte de perturbation déclenchée par le SAE, le régulateur construit un vecteur perturbation constitué par les paramètres fournis par le SAE et les critères pondérés par les régulateurs.

Le SARR applique un premier algorithme de classification SVM pour ce vecteur perturbation pour proposer une hiérarchisation des manœuvres de régulation connues et souvent utilisées par le régulateur, afin de réagir rapidement. Si la solution validée par ce dernier est la reconfiguration spatiale, le SARR lance l'algorithme ACFRS puis l'algorithme ACFRH. Si non, il passe directement à l'algorithme ACFRH dans les cas où la première manœuvre est insuffisante à absorber la perturbation.

La figure II.8 montre les interactions entre les trois modules. Il s'agit du diagramme de séquence du SARR. Dès le premier module nous commençons à assister le régulateur mais ce dernier peut demander de passer à une action plus complexe comme la reconfiguration spatiale dans les cas les plus compliqués qui va être suivie d'une régulation horaire. Le régulateur peut aussi rencontrer des incidents ne nécessitant pas de reconfiguration spatiale, et que les manœuvres simples proposés par le premier module peuvent absorber. Dans ce cas, le SARR passe au troisième module de régulation horaire pour proposer un nouveau tableau de marche régulé. Les trois modules, comme nous l'avons présenté précédemment, ont des interactions avec le régulateur d'une part et le SAE d'autre part.

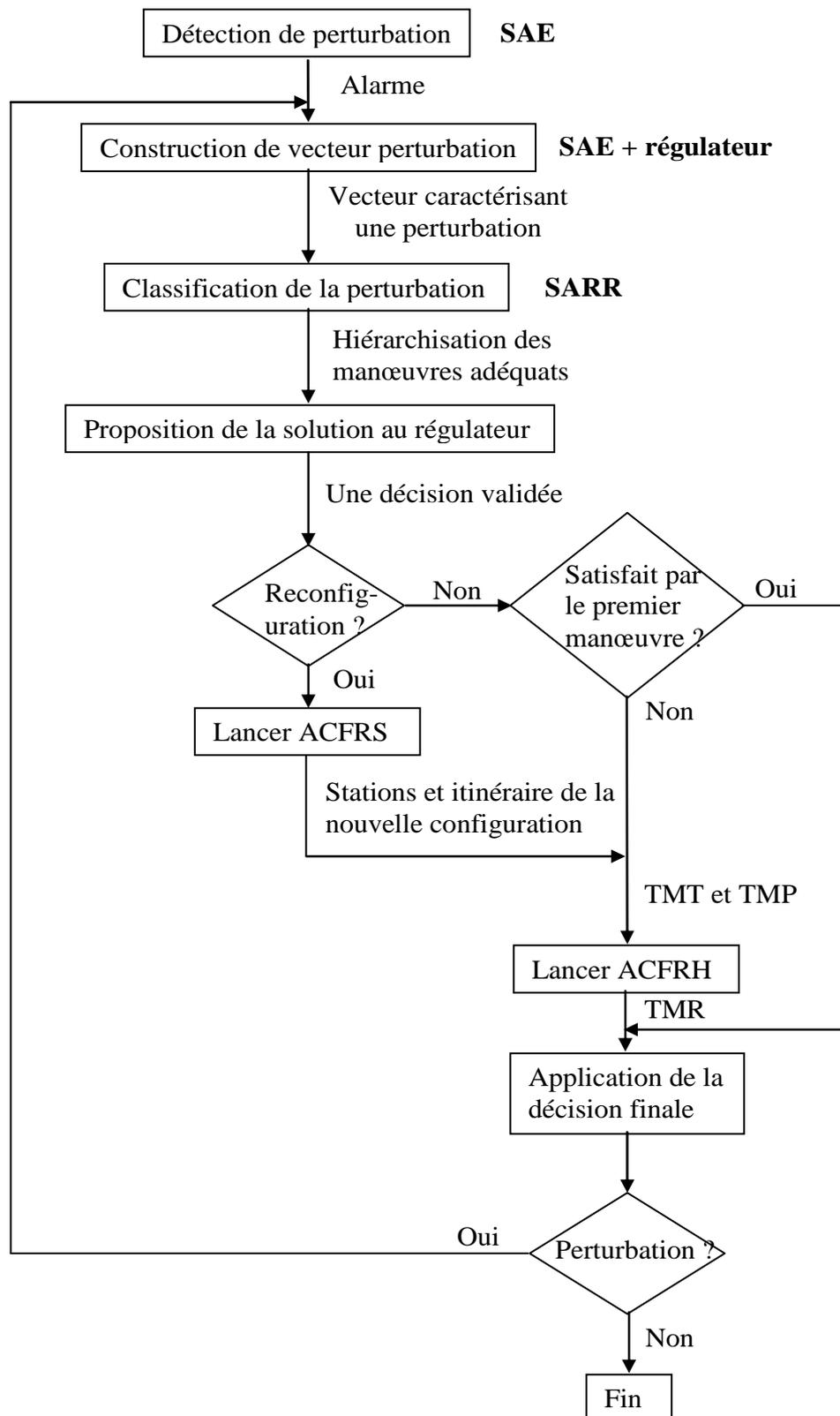


Figure II.8: Processus de régulation.

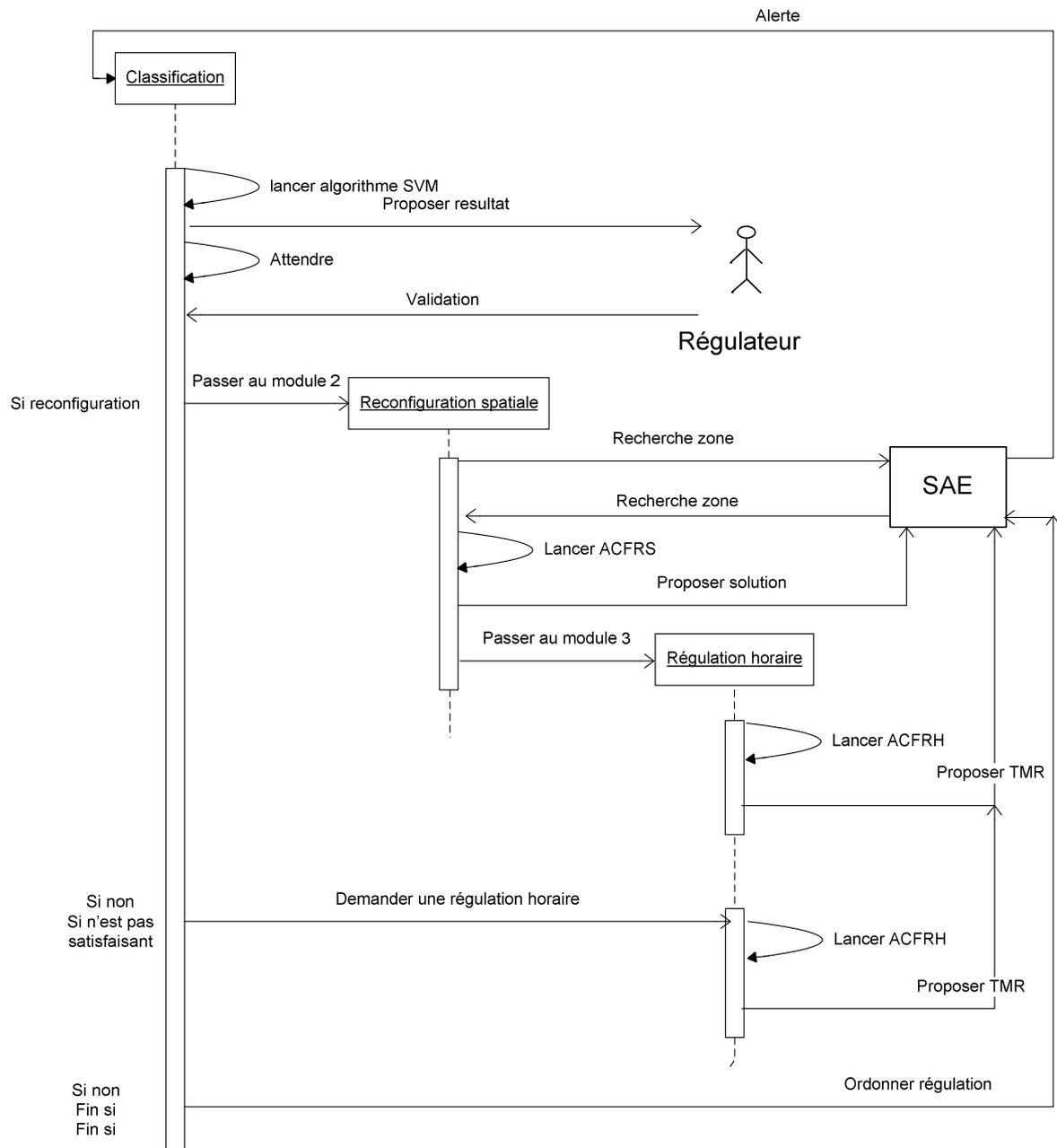


Figure II.9: Diagramme de séquence du SARR.

#### II.4.4 Caractéristiques du Système

Le SARR que nous proposons est caractérisé par certains critères demandés dans ce cas d'aide à la décision dans les réseaux de transport.

- L'aspect temps réel : Trouver rapidement une action efficace limitant les effets de la perturbation reste une tâche difficile pour le régulateur. Notre SARR propose rapidement, après une première analyse, une action de décision simple et connue. Il peut utiliser les deux autres algorithmes de reconfiguration spatiale, si c'est nécessaire,

et de régulation horaire. Ces deux algorithmes du type anytime peuvent fournir une solution à tout instant.

- L'expertise : Le premier module du SARR utilise une méthode de classification basée sur l'expertise du régulateur humain. En effet, la base d'apprentissage utilisée est un ensemble de vecteurs perturbations dont les décisions de régulation sont données par un régulateur.
- L'interaction avec le régulateur et le SAE : Le SARR assiste le régulateur. Il prend en compte ses préférences dans la recherche d'une décision ; le SAE étant chargé de fournir les caractéristiques de chaque incident.
- La multimodalité : Les manœuvres de régulation diffèrent d'un mode de transport à l'autre. Ce qui constitue une difficulté supplémentaire à la régulation d'un système multimodale. Le SARR tient compte de la multimodalité dans les trois modules. Dans le premier module, le mode des véhicules perturbés est un paramètre du vecteur. Dans le deuxième module, le graphe est multimodal avec la possibilité de créer des nœuds de correspondance entre modes dans les solutions proposées. Le module de la régulation horaire tient compte aussi de la correspondance comme critère à optimiser et qui peut être entre deux modes différents.
- Le suivi des décisions : Le SARR continue à surveiller le réseau après une action de décision. Il continue à recevoir des vecteurs perturbations tant qu'il y a un décalage important entre les horaires théoriques et réels. Ce qui permet le suivi des décisions et la mesure de leurs effets sur le réseau.

## II.5 Conclusion

Les évolutions des systèmes de traitement de l'information et de la communication ont fortement contribué à l'exploitation des réseaux de transport grâce, dans un premier temps, au SAE (Systèmes d'Aide à l'Exploitation), puis aux SAR (Systèmes d'Aide à la Régulation).

Nous avons ainsi décrit dans la deuxième partie de ce chapitre les SAR. Plusieurs approches ont été utilisées dans ces systèmes dont nous avons présenté les principales contributions.

La complexité des perturbations affectant les réseaux a nécessité la conception de SAR permettant aussi la reconfiguration spatiale en temps réel. Ce système, appelé SARR (Système d'Aide à la Régulation et la Reconfiguration) est composé d'un module d'optimisation basée sur l'Algorithme à Colonie de Fourmis, ACFRS, pour le calcul d'itinéraire. De même pour

l'algorithme ACFRH qui assure une régulation horaire à travers un autre module dans lequel nous proposons au régulateur un tableau de marche régulé. Le premier module du SARR est un sous système de pilotage. Il permet de classer les perturbations selon les manœuvres de régulation connue et par la suite déterminer une première solution rapide mais aussi distinguer les cas de la reconfiguration spatiale des autres. Nous détaillons dans le chapitre suivant l'algorithme de classification SVM constituant ce module.

## **Chapitre III: SVM pour la régulation des réseaux de transport multimodal**

## III.1 Introduction

Le premier module du SARR est chargé de proposer rapidement, après un diagnostic, une ou plusieurs décisions parmi les manœuvres connues et utilisées par les exploitants des réseaux de transport. Ce module est basé sur le SVM, procédure de classification utilisée pour trouver les frontières délimitant des classes dans un espace multidimensionnel. SVM est l'acronyme de Support Vector Machines en anglais, méthode et terme inventés par Vapnik [Vapnik, 82] principalement. Nous traduisons ici ce terme par Séparateurs à Vaste Marge.

A partir d'un vecteur de données dont les éléments sont des paramètres de la perturbation, le SARR propose une hiérarchisation des décisions de régulation adéquates pour cet incident. Nous utilisons une technique MSVM (Multiclass Support Vector Machines), puisque notre étude comportant plusieurs classes.

Dans une première partie, nous présentons la démarche d'apprentissage statistique du SVM en distinguant le cas linéaire du cas non-linéaire. Et nous expliquons ensuite les techniques MSVM comme une extension du SVM (binaire) aux classes multiples. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous exposons notre travail de régulation utilisant un algorithme MSVM de classification non linéaire.

## III.2 Séparateurs à Vaste Marge (SVM)

### III.2.1 Principe général

Le SVM (Support Vector Machines) ou Séparateurs à Vaste Marge est un algorithme de séparation de régions avec des hyperplans optimaux dans un espace des données multidimensionnelles. C'est un outil mathématique très performant issue de la théorie d'apprentissage statistique proposée dès 1979 par V.N Vapnik [Vapnik, 82] et connaît un essor considérable depuis seulement quelques années. Sa principale motivation est la recherche des limites probabilistes qui permettent de minimiser les erreurs et «risques empiriques» tout en maximisant les marges de séparation [Vapnik, 99] [Vapnik, 98] [Mangasarian & Bradley, 00]. Ce qui permet notamment de garantir la convergence de certains systèmes d'apprentissage. Les applications concernent essentiellement la reconnaissance d'objet et l'analyse statistique. L'outil SVM dans le cadre de la classification des données constitue un algorithme de séparation de régions avec des hyperplans optimaux dans un espace des données multidimensionnelles [Zibulevsky, 98].

### III.2.2 Apprentissage statistique

L'objectif de cette théorie est de déterminer les conditions sous lesquelles il est possible d'apprendre des événements à partir des données empiriques. L'apprentissage se conçoit comme un problème de sélection de modèle, consistant à déterminer, dans une famille de fonctions données, de cardinalité ordinairement infinie, une fonction permettant d'obtenir les meilleures performances possibles sur un problème donné. Le problème en question peut relever de l'analyse discriminante, de l'approximation de fonctions (régression), ou de l'estimation de densité. Le principe mis en œuvre par Vapnik [Vapnik, 95] consiste à minimiser le risque structurel ou réel (erreur en généralisation) dans le cadre des Machines à vecteurs de support (SVM). Ainsi, le problème de l'apprentissage statistique peut être posé de la manière suivante : étant donné un échantillon des réalisations  $(X_p, y_p)$ , avec  $X_i \in \mathbb{R}^D$  et  $y_i = \pm 1$  donnant la classe de  $X_i$ , issus d'une distribution de probabilité inconnue  $P(X_p, y_p)$ , on cherche à trouver une application  $X \rightarrow y = f(X)$  pour obtenir une classification dichotomique (binaire) de  $X$  en minimisant le risque structurel  $R$  défini de la manière suivante:

$$R = \int \frac{1}{2} |y - f(x)| dP(x, y) \quad (1)$$

Puisque la probabilité  $P$  est inconnue,  $R$  l'est aussi. Mais il est absolument naturel que la séparatrice qui se comporte le mieux vis-à-vis des données d'apprentissage soit aussi celle qui permettra de classer au mieux les observations à venir, mais encore inconnues. L'algorithme d'apprentissage vise à minimiser la mesure de coût sur les exemples d'apprentissage. On appelle cette mesure un risque empirique car elle est mesurée empiriquement sur les données de l'échantillon d'apprentissage. Ce risque est la somme des coûts mesurés pour chaque exemple d'apprentissage et prend donc la forme :

$$R_{emp} = \frac{1}{2N} \sum_1^N |y_i - f(x_i)| \quad (2)$$

avec  $N$  est la taille de l'échantillon d'apprentissage

Pour résoudre le problème, on choisit à priori un ensemble de fonctions  $\psi$  paramétrées par  $w$  et on cherche à minimiser le risque en fonction de  $w$ . Le choix d'un ensemble  $\psi = \{Fw\}$  de fonctions adaptées est une étape cruciale, puisqu'un ensemble trop contraint peut ne pas parvenir à séparer les données initiales, et au contraire un ensemble trop libre peut aboutir à l'incapacité de généraliser. La Figure.III.1 montre l'importance du choix de l'ensemble  $\psi$  dans lequel est choisie la fonction de décision  $Fw$ . En effet, dans la figure III.1 (a) l'ensemble  $\psi$  est trop contrainte et l'hyperplan ne peut séparer les données. Dans la figure III.1 (b) l'ensemble  $\psi$  paraît adapté et le

classifieur permet de généraliser le partitionnement. Alors que dans III.1 (c) l'ensemble  $\psi$  est trop libre et le classifieur ne peut généraliser

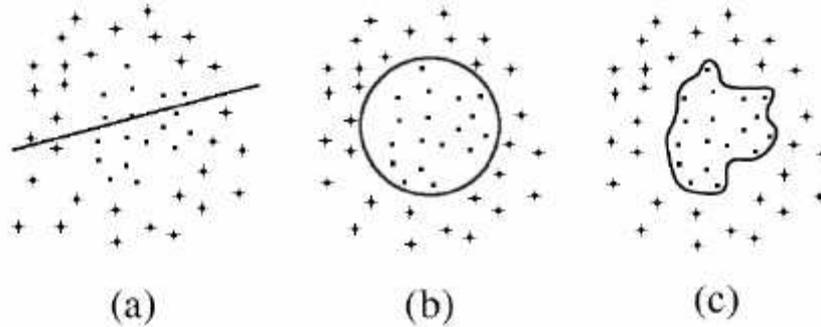


Figure III.1: Importance du choix de l'ensemble  $\psi$

Vapnik a démontré que le risque structurel peut être borné de la manière suivante :

$$R \leq R_{emp} + \sqrt{\frac{h(\log(2n/h) + 1) - \log(\eta/4)}{N}} \quad (3)$$

avec  $1-h$  représentant la densité de probabilité sur les données.  $h$  est la VC-dimension (La dimension de Vapnik-Chervonenkis) et caractérise la «richesse» d'une famille de fonctions  $F_w$  [Vapnik, 98]. Elle correspond au nombre maximum de points pouvant être correctement séparés par une famille fonction  $F_w$  de paramètre ajustable  $w$ . On voit donc que la borne sur le risque grandit si la taille  $N$  de l'échantillon diminue, et si la dimension VC-dimension  $h$  grandit ( $\psi$  riche).

***Théorème de convergence d'un classifieur [Vapnik, 98] :***

*Une condition nécessaire et suffisante pour qu'une famille de classifieurs converge uniformément est que sa VC-dimension  $h$  soit finie.*

Pour plus de détails sur la dimension de Vapnik-Chervonenkis, le lecteur peut consulter [Schölkopf & Smola, 01] [Herbrich, 02] [Bartlett, 03]. Nous abordons à présent les Séparateurs à Vaste Marge dans ses trois versions : SVM linéaire ; SVM non linéaire et MSVM.

### III.2.3 SVM linéaire

Cette technique convient à la séparation des domaines dont les frontières peuvent être représentées par des hyperplans co-planaires (équations linéaires) [Zhou & al., 02]. Dans un premier temps il s'agit de séparer les données en deux régions disjointes : on parle de classification dichotomique. Les fonctions de séparation sont définies par des équations

d'hyperplans  $w \cdot x + b = 0$ . Dans le cas des données linéairement séparables, il existe un hyperplan optimal tel que :

$$y = \begin{cases} 1 \rightarrow w^t \cdot x + b \geq \delta \\ -1 \rightarrow w^t \cdot x + b \leq -\delta \end{cases} \quad (4)$$

On peut combiner les deux équations précédentes en une seule à travers l'écriture suivante :

$$y_i \cdot (w^t \cdot x_i + b) \geq \delta; \forall i \quad (5)$$

La fonction décision est :  $F(x, w, b) = w^t \cdot x + b \quad (6)$

La sortie du classifieur est :  $y = \text{sign}[F(x, w, b)] \quad (7)$

L'algorithme de SVM cherche simplement à trouver l'hyperplan qui maximise la distance minimale possible entre les  $x_i$  et l'hyperplan (voir Figure III.2). Cette distance est appelée «marge» entre l'hyperplan et les exemples. Comme il cherche à maximiser cette marge, [Cornuéjols, 02] on parle de méthode des séparateurs à vaste marge. Puisque la distance d'un point à l'hyperplan est:

$d(x) = \frac{|w \cdot x + b|}{\|w\|}$ , la distance aux points les plus proches qu'on appelle SV (Support Vectors), est

$\frac{1}{\|w\|}$ , puisque  $F(\text{SV})=1$ , et la distance entre deux SV situés des deux côtés du séparateur est  $\frac{2}{\|w\|}$ .

Maximiser la marge revient donc à minimiser  $\|w\|$  ou encore de manière équivalente le terme

$\frac{1}{2} \|w\|^2$  sous contraintes. Le problème est alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } \frac{1}{2} \|w\|^2 \\ \text{sous la contrainte} \\ y_i \cdot (w^t \cdot x_i + b) \geq 1; \forall i \end{array} \right. \quad (8)$$

Une résolution du problème par une formulation Lagrangienne est proposée par Burges [Burges, 98] :

$$\left\{ LD \equiv \sum_{i=1}^N \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j x_i x_j \right\} \quad (9)$$

Le problème est ainsi ramené à travers sa formulation duale à maximiser la fonction LD sous les contraintes  $\frac{\partial LD}{\partial w} = 0$  ;  $\frac{\partial LD}{\partial b} = 0$  et  $\alpha_i \geq 0$  (les  $\alpha_i$  sont appelés multiplicateurs de Lagrange). La plupart de ces multiplicateurs  $\alpha_i$  sont nuls et les  $x_i$  associés à des  $\alpha_i$  non nuls, sont les SV (vecteurs de support) (figure III.2).

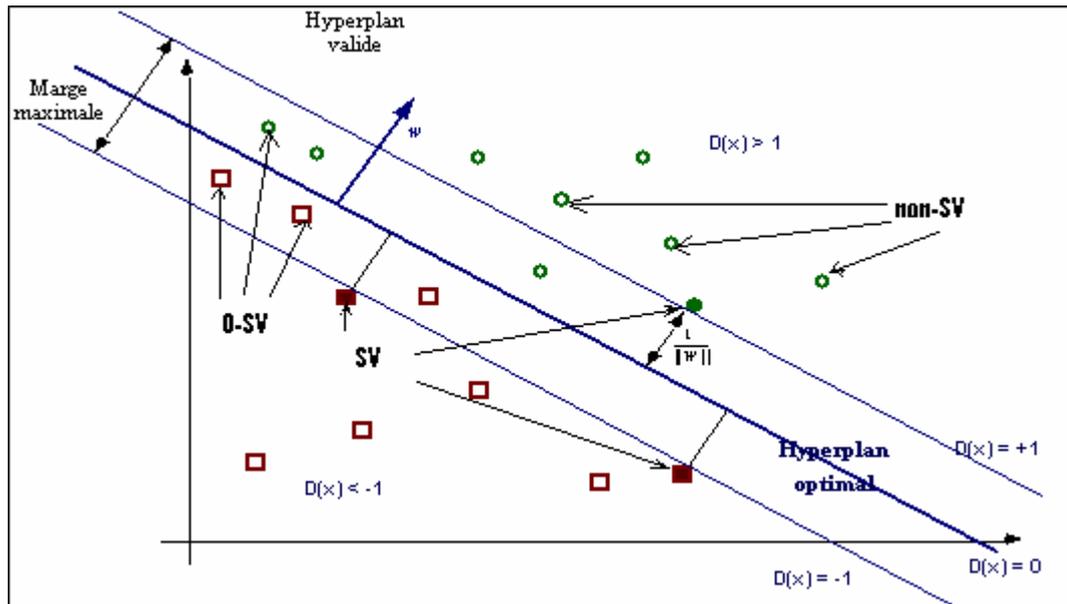


Figure III.2: Optimisation de la marge.

L'annulation des dérivées partielles donne :

$$w^t = \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i x_i \text{ et } \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0 \quad (10)$$

Une fois le paramètre  $w$  trouvé, on détermine la constante  $b$  en résolvant l'équation de la fonction de décision avec des vecteurs dont la classe est connue à priori. La fonction est donc de la forme :

$$F(x, w, b) = w^t \cdot x + b = \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i x_i \cdot x + b \quad (11)$$

Dans le cas de données bien séparables, lors de l'apprentissage les vecteurs supports définissent les marges entre les classes. Pendant la classification en ligne, des points peuvent se retrouver entre ces vecteurs supports. On introduit alors une extension de la formulation SVM précédente pour manipuler des données non-séparables. Cette extension est réalisée en créant une fonction objective avec une marge d'erreur  $\xi \geq 0$  pour chaque point. Les équations deviennent alors :

$$w \cdot x_i + b \geq 1 - \xi \quad \text{pour} \quad y_i = +1 \quad (12)$$

$$w \cdot x_i + b \leq -1 + \xi \quad \text{pour} \quad y_i = -1 \quad (13)$$

On se retrouve ensuite devant le même problème que dans le cas linéaire de régions séparables avec des paramètres et contraintes supplémentaires. Il s'agit encore de maximiser le même dual lagrangien LD sous les contraintes :

$$0 \leq \alpha_i \leq C \quad \text{et} \quad \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0 \quad (14)$$

D'autre part, lorsque les domaines à séparer sont délimités par des frontières curvilignes (équations non-linéaires), les algorithmes de résolution linéaire ne conviennent plus, il faut donc faire appel à des techniques non-linéaires.

### III.2.4 SVM non linéaire

Dans la formulation précédente, les observations  $x_i$  interviennent uniquement via des produits scalaires  $x_i \cdot x_j$ . L'idée pour obtenir des fonctions non-linéaires consiste à remplacer le produit scalaire par une fonction  $K(x_i, x_j)$  appelée fonction Kernel (ou fonction noyau). Cela revient à faire une transformation de l'espace vectoriel initial vers un espace euclidien (qui peut être de dimension infinie) au moyen d'une fonction  $\Omega$  dite de configuration de l'espace [Schölkopf & Smola, 01] [Dodd & al., 03].

$$\begin{aligned} \Omega: R^d &\rightarrow H \\ (x_i, x_j) &\mapsto \Omega(x_i) \cdot \Omega(x_j) = K(x_i, x_j) \end{aligned} \quad (15)$$

Le nouvel espace  $H$  est appelé espace de Hilbert [Herbrich & al., 99] [Herbrich, 02]. Il n'est alors même pas nécessaire de connaître explicitement  $\Omega$ , puisque seule la fonction Kernel  $K$  intervient dans les calculs. Et nous aurons la formulation suivante :

Maximiser

$$\left\{ LD \equiv \sum_{i=1}^N \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j \Omega(x_i) \cdot \Omega(x_j) \right\} \quad (16)$$

Sous les contraintes:

$$0 \leq \alpha_i \leq C \quad \text{et} \quad \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0 \quad (17)$$

En introduisant cette nouvelle fonction Kernel  $K(x_i, x_j)$  dans l'expression du SVM linéaire (équation 11), on obtient la fonction non-linéaire de décision suivante :

$$F(x, w, b) = \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i k(x_i, x) + b \quad (18)$$

Dans plusieurs cas de classification, les données appartiennent à un nombre  $K > 2$  de classes et la classification dichotomique ne suffit plus. Nous allons maintenant présenter des extensions du SVM pour des classes multiples.

### III.2.5 Multi classes SVM (MSVM)

Au cours des dernières années, des techniques ont été développées pour étendre la méthode SVM à des situations de classes multiples. Chacune de ces techniques a pour but d'effectuer une généralisation des aptitudes du SVM binaire à un domaine multi-classes [Salomon, 01]. Nous en présentons, dans ce qui suit, les SVM multi-classes les plus connus.

#### *a- One vs. One (All pairs) Classification*

Ce SVM multi-classes proposé par Friedmann [Friedmann, 96] connaît beaucoup de succès et devient le plus utilisé parmi les méthodes SVM multi-classes. Le principe de la méthode One vs. One est simple. Il consiste à créer une classification binaire de chaque combinaison de classes possibles d'où son nom All pairs (traduit par toutes les paires). Cette technique est aussi appelée schéma de vote parce que pour chaque partition binaire SVM, une voix ou un crédit est accordé à une des deux classes compétitives. De façon plus formelle, supposons un ensemble de classes :  $C = \{C_k\}_{k=1, \dots, K}$  et  $x$  une observation quelconque. La fonction associée au modèle SVM de  $\{C_k, C_j\}$  s'écrit :

$$SVM_{kj}(x) = \begin{cases} 1 & \leftrightarrow F_{kj}(x) = 1 \\ 0 & \leftrightarrow F_{kj}(x) = -1 \end{cases} \quad (19)$$

Il en résulte que le nombre de modèles de  $SVM_{kj}$  binaires est  $K(K-1) / 2$  et chaque observation est utilisée dans  $K-1$  modèles. Ainsi, l'observation  $x$  est classée par la fonction de décision suivante :

$$f_{1vs1}(x) = \arg \max_k \sum_{j=1, j \neq k}^K SVM_{kj}(x) \quad (20)$$

Ce M-SVM One vs. One permet d'effectuer un partitionnement de l'espace des données en plusieurs classes en délimitant les frontières à la suite d'un apprentissage en mode supervisé.

Cependant, un très grand nombre  $K$  de classes entraîne une explosion combinatoire (complexité exponentielle) notamment à cause du terme  $K(K-1)/2$  qui dénombre les modèles binaires SVM. Quelques résultats de cette technique SVM multi-classes sont présentés dans [Mayoras & Alpaydin, 99].

***b- One vs. Rest Classification*** [Hsu & Lin, 02]

Dans cette technique de classification,  $K$  modèles de SVM binaires sont construits. Chaque modèle a pour but de fixer les frontières de séparation d'une classe  $C_k$  du reste de la population. Le modèle SVM binaire affecte le label "+1" à la classe  $C_k$  et le label complémentaire "-1" à toutes les autres classes restantes. A la présentation d'une observation quelconque  $x$  on évalue pour chaque modèle de SVM binaire, la fonction de décision suivante

$$f_{1vs.rest}(x) = \arg \max_k F_{k,k=1,\dots,K}(x) \quad (21)$$

Où  $F_k(x)$  est le modèle SVM binaire qui sépare la classe  $C_k$  du reste. La classe qui maximise la fonction de décision sera choisie pour classer l'observation  $x$ . Cette méthode est plus rapide que la précédente, notamment parce qu'elle n'utilise que  $K$  modèles SVM binaires. Néanmoins la diminution du nombre de modèles empêche d'élaborer une classification multi-classes avec des frontières de séparation complexes. Il est difficile donc d'élaborer un modèle SVM qui sépare correctement chaque classe seule de toutes les autres.

***c- SVM Binary tree (arbre binaire)*** [Platt & al., 00]

L'arbre binaire est une méthode de classification à structure hiérarchique qui correspond à une version de SVM à arbre de décision binaire. Chaque nœud de l'arbre binaire peut donner par séparation deux sous-ensembles de classes. De même chaque partie de nœud contient un autre SVM binaire qui le scinde en deux autres sous-ensembles. Cette procédure s'effectue de manière récurrente, le nombre de classes de chaque nœud diminue progressivement jusqu'à ce qu'il ne reste plus qu'une classe par nœud. Un apprentissage en mode supervisé permet de fixer les frontières spatiales correspondant aux limites de séparation des sous-ensembles des nœuds. Pour classer une observation  $x$ , il suffit donc de parcourir l'arbre hiérarchique du haut vers le bas et de situer l'observation comme étant un élément du sous-ensemble gauche ou droit au niveau de chaque nœud traversé jusqu'à trouver la classe élémentaire à laquelle elle appartient. Par rapport aux deux cas de SVM multi-classes étudiés précédemment, l'arbre binaire de décision SVM est une méthode plus rapide et de complexité moindre. En effet, au cours de la phase de classification il faut effectuer  $\ln(2^K)$  évaluations pour classer une observation  $x$  parmi  $K$  classes d'un espace multidimensionnel.

### III.3 SVM pour la régulation

#### III.3.1 Processus de régulation

Une perturbation, comme nous l'avons présenté dans le chapitre 1, est aléatoire. Le SARR doit récupérer le plus rapidement possible les différents paramètres caractérisant cet incident. Dans sa tâche de surveillance de l'exploitation en temps réel, le SAE se charge de ramener ces paramètres. En effet, en plus du lien direct entre le SARR et le SAE, le régulateur peut aussi participer à la construction de ce vecteur en entrée, à travers les moyens de communication existants chez les exploitants.

Parmi les éléments de ce vecteur perturbation, il y a les critères à optimiser au moment de la régulation. Ces critères sont représentés par leur importance exprimée par le régulateur sous la forme de pondérations. Il s'agit de ses préférences lors de la situation concernée par la régulation.

L'entrée de ce processus de régulation (figure III.3) est le vecteur qui vient d'être construit. L'objectif est la classification de ce vecteur selon des décisions de régulation connues et pratiquées dans les réseaux de transport multimodal et nous utilisons la technique SVM à cet effet. La sortie de ce processus de classification est une hiérarchisation des décisions permettant de résorber plus ou moins bien la perturbation.

La phase de classification appliquée en temps réel est précédée d'une phase d'apprentissage en temps anticipé pour la détermination des fonctions séparatrices. Le système contient donc une base d'apprentissage. Il s'agit d'un échantillon de vecteurs dont les décisions (classes) sont connues.

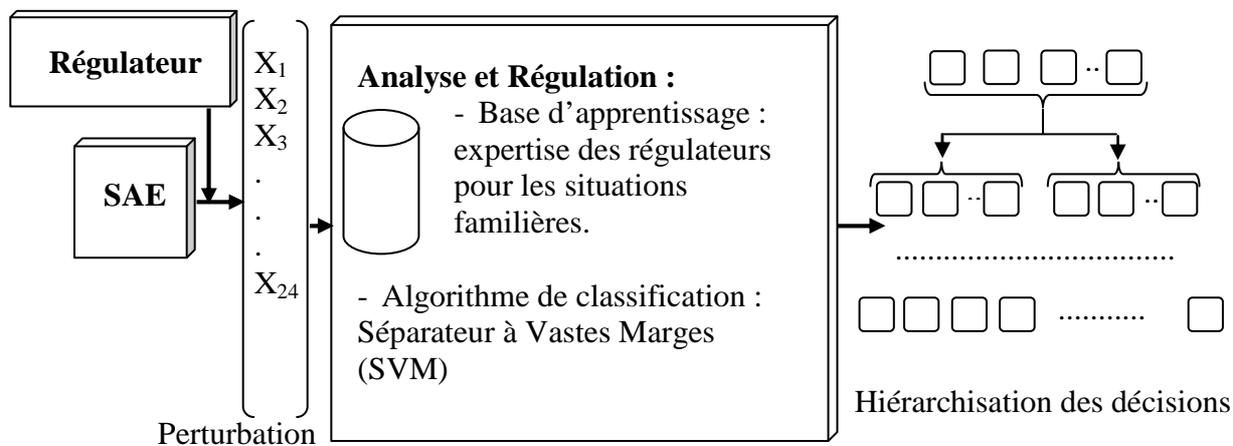


Figure III.3: Processus de classification.

Notre espace est de dimension 24 dont 20 paramètres caractérisant chaque perturbation et 4 critères de régulation. Nous présentons les éléments de ce vecteur dans la section suivante. En sortie nous avons 16 classes les plus utilisés par des exploitants des réseaux de transport différents.

### III.3.2 Vecteur de perturbation

L'entrée du processus de classification est un vecteur caractérisant une perturbation au moment de son apparition. Il contient les paramètres de la perturbation comme le lieu, le temps, le retard, la fréquence, ...etc. Ainsi que les 4 critères de régulation les plus utilisés : la régularité, la ponctualité, la correspondance et l'enlèvement de la charge.

#### Lieu de perturbation :

- ✓ Ligne : Certaines décisions applicables en ligne sont mise en œuvre en stations et d'autres en inter-station. La connaissance du lieu permet de limiter l'espace de décision.
- ✓ Point de surveillance : La station ou le point en inter-station où est détectée la perturbation a une influence sur le choix de la décision de régulation. Et on peut trouver par exemple des manœuvres de régulation en ligne et d'autres en terminus.
- ✓ Direction : La direction de ou des véhicules concernés peut être par exemple la direction de la charge ou le sens inverse et la décision de régulation n'est pas toujours la même pour les deux cas.

#### Position des véhicules :

La distance entre les véhicules dans la zone perturbée est importante pour les décisions de régulation. Par exemple, le sautage est intéressant lorsque le véhicule en retard et celui qui le suit sont proches. Il s'agit de la distance entre le véhicule perturbé et les véhicules :

- ✓ En amont
- ✓ En aval

#### Temps de perturbation :

Puisque les conditions de circulation et la demande dans un réseau de transport dépendent des horaires de la journée (heure de pointe ou heure normale), des jours de la semaine (week-end, début de semaine) et des périodes de l'année (fêtes, jour normal..) nous proposons cinq paramètres temporels de perturbation

- ✓ Date de la journée
- ✓ Période de la semaine
- ✓ Période de l'année
- ✓ Fréquence de passage des véhicules par les stations.

- ✓ Le prochain départ : C'est l'heure du prochain départ sur la même ligne. Il est surtout important lors d'une perturbation dans un terminus et si on veut changer le véhicule perturbé par celui du prochain départ.

**Retard :** C'est l'écart de temps détecté par rapport au Tableau de Marche Théorique.

**Source de perturbation :**

On peut choisir la solution suivant la source de chaque incident, mais parfois cette solution est unique et dépend directement de la source. On peut citer les quatre sources : Véhicule (panne), personnel (absence), circulation (accident), demande (match, fête...),

**Effet de la perturbation sur les correspondances :**

Assurer une correspondance est très important en régulation. Savoir, dès le début d'une perturbation si elle peut affecter une ou plusieurs correspondances devient primordial.

**Effet de la perturbation sur d'autres perturbations :**

La régulation d'une perturbation qui apparaît seule est différente de celle d'une perturbation qui apparaît en même temps que d'autres simultanées ou qui se recouvrent.

**Les véhicules affectés :**

On peut citer deux paramètres

- ✓ Le mode : L'objectif de ce travail est la régulation dans un réseau multimodal donc on peut avoir plusieurs modes de transport (bus, métro, tram...). Les manœuvres ou décisions de régulation sont définis suivant le mode, par exemple on ne peut pas appliquer le demi tour pour le métro. C'est avec ce paramètre que nous assurons l'aspect multimodal dans la première partie de classification dans notre travail.
- ✓ Le nombre de véhicules : Il est important d'indiquer, dans le même mode, le nombre de véhicules concernés ou bien touchés par la perturbation.

**La charge :**

C'est le nombre de passagers touchés par la perturbation et on peut le diviser en deux paramètres :

- ✓ La charge à l'intérieur du véhicule.
- ✓ La charge en attente.

**La possibilité de réserve :**

Dans des cas de perturbation nécessitant l'injection d'un véhicule ou bien un changement de personnel on doit connaître :

- ✓ Le nombre des véhicules en réserve.
- ✓ Le nombre de personnels disponibles en réserve.

**Les critères de régulation :**

Aux paramètres caractérisant une perturbation, s'ajoute les pondérations de l'importance de chaque critère de régulation proposées par le régulateur.

- ✓ Le critère de régularité : Il est envisagé lorsque l'arrivée des voyageurs est indépendante des passages des véhicules. Cette logique prévaut notamment dans les périodes de creux, ainsi qu'aux pointes pour les lignes où la charge est répartie sur un grand nombre de points d'arrêt. Du point de vue de la qualité du service offert, la régularité de passage permet de satisfaire deux objectifs :
  1. Minimiser l'attente des voyageurs aux arrêts
  2. Équilibrer les charges entre les véhicules et donc maximiser le confort des voyageurs à bord des bus.
- ✓ Le critère de ponctualité : Ce critère s'applique évidemment en premier lieu sur les lignes à horaire. On le trouve également sur l'ensemble du réseau dans le cas de départs à respecter impérativement : premier départ en début de journée et dernier départ en fin de journée.
- ✓ Le critère de correspondance : Dans le cas d'existence d'échanges entre deux lignes du même réseau ou entre deux modes de transport différents, on assure au mieux les correspondances en minimisant le temps de transfert des voyageurs en transit.
- ✓ Le critère d'enlèvement de la charge : Il est appliqué pendant les heures de pointe et aussi dans d'autres cas comme les sorties des écoles. L'objectif est d'enlever les voyageurs sans en laisser aux arrêts, en concentrant les moyens sur le (ou les) point(s) de montée le(s) plus important(s). Les procédures de régulation mise en œuvre dans le cadre de cette logique seront par conséquent très diversifiées en fonction de la configuration de la charge

### III.3.3 Classes de régulation

L'ensemble des manœuvres de régulation utilisées par les régulateurs forment une boîte à outil pour gérer les lignes de transport. Nous allons utiliser ces décisions en tant que des classes dans notre processus de classification SVM. Comme nous l'avons présenté dans le premier chapitre (paragraphe 1.4.4), ces décisions sont classées en trois groupes pour un total de 20 manœuvres. Nous avons diminué le nombre à 16 manœuvres. En effet, la suppression et la retombé sont proposées toujours ensemble. Nous avons considéré alors une seule manœuvre suppression et retombé. Nous aurons uniquement cinq manœuvres de régulation en terminus. Nous n'avons laissé que sept manœuvre de régulation en ligne. Sachant que nous avons ajouté une nouvelle manœuvre qui s'agit de la reconfiguration, nous avons considéré la déviation et le délestage deux cas de reconfiguration. Nous avons donc 16 classes à savoir :

$C_1$ : Modification des temps de parcours	$C_9$ : Sautage
$C_2$ : Attente à un point d'arrêt	$C_{10}$ : Distancement
$C_3$ : demi-tour	$C_{11}$ : Dérive
$C_4$ : Changement de mission par allongement	$C_{12}$ : Injection d'un véhicule en réserve
$C_5$ : Transbordement	$C_{13}$ : Suppression et retombé
$C_6$ : Dépassement sur ligne	$C_{14}$ : Insertion d'un départ
$C_7$ : Parcours en descente	$C_{15}$ : Parcours haut-le-pied
$C_8$ : Reconfiguration	$C_{16}$ : Film blanc

■ **La reconfiguration :**

L'une des décisions qui peut être recommandée dans ce premier module est la reconfiguration. Il ne s'agit pas d'une manœuvre connue ni facile pour le régulateur mais il est intéressant de distinguer les cas qui nécessitent une reconfiguration spatiale des autres incidents.

### III.3.4 Noyau gaussien

Nous avons choisi le noyau gaussien pour notre travail d'aide à la régulation dont la fonction est la suivante :

$$K(x_i, x) = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}\|x - x_i\|^2\right) \quad (22)$$

Les performances élevées de ce noyau gaussien dans le cadre de la classification sont prouvées par diverses études [Schölkopf & al., 1997]; [Tu, 2003] [Habib, 06]. Il dispose en effet, de quelques propriétés intéressantes qui motivent son choix dans la plupart des problèmes.

1) **Interprétation géométrique de l'espace de Hilbert.** Avec un noyau gaussien, la transformation  $\Omega$  construit l'espace de Hilbert en projetant toutes les données sur un quadrant de cercle de rayon 1. Cette interprétation géométrique est très intéressante car elle facilite le raisonnement pour la mise en œuvre des méthodes d'apprentissage [Desobry & al., 2005] et [Habib & al., 2005].

2) **Toutes les données images sont linéairement indépendantes dans l'espace de Hilbert :** La matrice de Gram du noyau gaussien est de rang plein [Micchelli, 1986]. C'est un théorème qui traduit le fait que tous les points images  $\Omega(x_i)$  sont linéairement indépendants

dans l'espace de Hilbert, s'il n'existe pas deux données  $x_i$  identiques dans  $R^d$ . Les données  $x_i \in R^d$  sont transformées dans un espace de Hilbert de dimension infinie sans être confondues.

3) **Universalité et Flexibilité** : Toute fonction continue peut être approximée (en norme infinie) par la combinaison des fonctions  $K(.,x)$ ,  $x \in R^d$  de l'espace de Hilbert. De même, avec suffisamment de données, il est possible de construire n'importe quelle fonction analytique. Par ailleurs, en fonction du choix du paramètre du noyau gaussien, on peut construire divers classifieurs :

- $\sigma \rightarrow \infty$ , tous les points se retrouvent dans un domaine de volume infiniment petit dans l'espace de Hilbert. Le noyau se comporte ainsi comme un classifieur linéaire.

- $\sigma \rightarrow 0$ , tous les points sont orthogonaux dans l'espace de Hilbert, chaque point est donc dissimilaire des autres. Le noyau se comporte comme un classifieur kpp-voisin avec  $k = 1$ .

- En variant  $\sigma$ , le noyau permet de tester plusieurs types de classifieurs par d'innombrables combinaisons intermédiaires.

### III.3.5 Apprentissage

Nous avons commencé par la préparation d'une base d'apprentissage. Nous avons cherché le maximum d'exemples de perturbation dans des réseaux différents avec des décisions de régulation différentes. Chaque échantillon de perturbations est représenté dans notre espace multidimensionnel (dimension 24) par un vecteur que nous projetons sur différent plan (voir figure III.4). La distribution des données montre la complexité de séparation entre les classes. Une approche non linéaire est obligatoire dans notre cas de classification pour la régulation. Nous avons choisi le noyau gaussien de la formule 22.

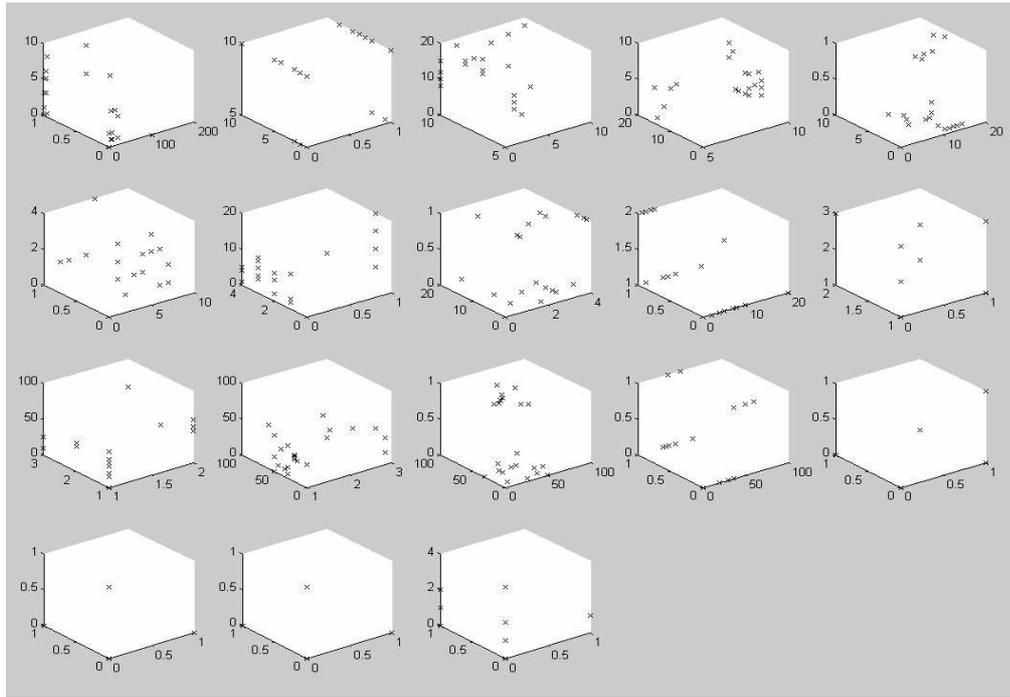


Figure III.4: Distribution des données.

En remplaçant le produit scalaire de la formule (16) par la fonction noyau nous aurons la formulation lagrangien suivante :

Maximiser

$$\left\{ LD \equiv \sum_{i=1}^N \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x_i, x_j) \right\} \quad (23)$$

Sous les contraintes:

$$0 \leq \alpha_i \leq C \quad \text{et} \quad \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0 \quad (24)$$

Nous obtenons un problème d'optimisation à critère quadratique et contraintes linéaires. Il peut être résolu numériquement [Kaufmann, 99]; [Musicant, 00]. Le choix de la méthode de résolution dépend du problème à traiter. Pour les applications en ligne, la technique SMO (*Sequential Minimal Optimisation*) est très adaptée pour sa rapidité d'exécution [Platt, 99]. Les codes de quelques algorithmes d'optimisation se trouvent sur le site [www.kernel-machines.org](http://www.kernel-machines.org) notamment LOQO et MINOS (voir Annexe 1).

Après la résolution du problème d'optimisation précédent (23), on obtient toutes les valeurs des  $\alpha_i$  dont un grand nombre sont nulles. En remplaçant ces paramètres par leurs valeurs dans

l'équation (18), la fonction d'apprentissage s'exprime simplement avec les vecteurs supports  $x_{sv}$  qui sont les données correspondant aux valeurs des  $\alpha_i$  non nulles :

$$F(x) = \sum_i \alpha_i y_i k(x_{svi}, x) + b \quad (25)$$

Par ailleurs, en utilisant l'équation de l'hyperplan, il est possible de déterminer la valeur de l'offset  $b$ . En effet, on a :  $F(x_{sv+}) = \sum_i \alpha_i y_i k(x_{svi}, x_{sv+}) + b = 1$  avec  $x_{sv+}$  est un vecteur de support de classe positif. Ainsi, l'offset  $b$  s'exprime par :

$$b = 1 - \sum_i \alpha_i y_i k(x_{svi}, x_{sv+}) \quad (26)$$

Pour un vecteur de support de classe négatif  $f(x_{sv-}) = -1$  et par la suite nous pouvons calculer  $b$  de la même façon avec tout vecteur de support. C'est une façon aussi de vérifier les calculs. En effet, pour une bonne résolution, la valeur de  $b$  est la même pour tout vecteur de support.

Désormais, nous avons toutes les valeurs des paramètres de la fonction séparatrice. Nous pouvons classer tout vecteur  $x$  à partir du signe de  $f(x)$  ( $f(x) > 0$   $x$  de classe 1 et  $f(x) < 0$   $x$  de classe 2).

Comme nous l'avons déjà dit, le nombre de classes des décisions est 16. Donc, nous avons appliqué l'une des techniques M-SVM. Il s'agit de l'arbre binaire. Nous avons eu besoin de 15 fonctions séparatrices. Nous allons présenter la hiérarchisation de ces classes ainsi que le choix de cette technique dans la section suivante.

### III.3.6 Classification

Après avoir terminé l'apprentissage et déterminé les 15 fonctions séparatrices, nous pouvons classer tout vecteur  $x$ . Pour pouvoir attribuer ce vecteur à une classe, nous devons choisir l'une des techniques M-SVM. Notre objectif étant de proposer un système informatique d'aide à la régulation, nous avons choisi d'assister le régulateur en lui proposant une hiérarchisation des décisions que de trouver une seule décision directe et qui peut être insuffisante. Mais il est encore plus intéressant de faire les deux, c'est-à-dire proposer au régulateur un ensemble de décisions tout en précisant les plus adéquates suivant une logique donnée. L'arbre binaire est une méthode de classification à structure hiérarchique qui correspond à la version de SVM à arbre de décision binaire. Ce qui correspond très bien à notre objectif. En

fait, nous pouvons proposer au régulateur l'arbre complet et à chaque nœud il y a un ensemble de classes (décisions de régulation) qui va être divisé en deux dans le prochain niveau. Et ceci jusqu'au dernier nœud ou il y a qu'une seule classe.

Nous suivons l'arbre hiérarchique de la figure III.5. Il suffit alors pour une perturbation  $x$  de calculer au moment de son apparition  $f_i(x)$  pour passer au deuxième niveau. En effet, si  $f_1(x)$  est positif, alors  $x$  appartient au premier ensemble de 8 classes (C1, C2, ..., C8). Si non ( $f_1(x)$  est négatif), les 8 autres décisions seront proposées au régulateur. Nous continuons de la même façon à parcourir le reste de l'arbre et à proposer les décisions adéquates en calculant à chaque fois le signe de la fonction correspondante.

Le régulateur peut proposer aussi plus d'une décision pour la même perturbation. Pour cette raison, le choix des décisions dans chaque classe et à chaque niveau doit être bien étudié de telle façon que les décisions de la même classe soient applicable en même temps (la modification de temps de parcours et l'attente à un point d'arrêts (C1 et C2) ou bien le parcours haut le pied et le film blanc (C15 et C16)). La correspondance entre les nœuds et les actions de régulation est basée sur l'expertise du régulateur.

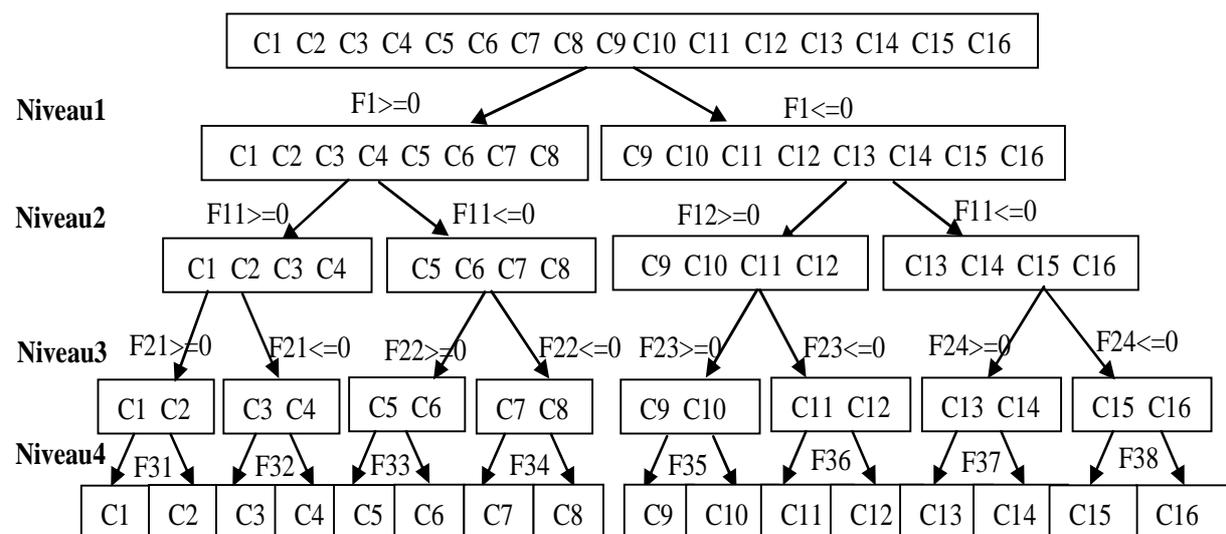


Figure III.5: Arbre binaire de la classification des décisions.

Suivant les valeurs des  $f(x)$ , les données  $x$  se distinguent en trois catégories selon leurs positions par rapport à l'hyperplan (figure III.2).

Ensemble 1 : l'ensemble des données classées sans erreurs non-SV (non support vector). C'est-à-dire les vecteurs internes au contour dont  $f(x) > 1$  pour la classe positive et  $f(x) < -1$  pour la classe négative.

Ensemble 2 : l'ensemble des données de la marge SV (support vector). C'est-à-dire les vecteurs sur le contour dont  $f(x)=1$  pour la classe positive et  $f(x)=-1$  pour la classe négative.

Ensemble 3: l'ensemble des données classées avec erreurs O-SV (out layer support vector). C'est-à-dire les vecteurs externes au contour dont  $0 < f(x) < 1$  pour la classe positive et  $-1 < f(x) < 0$  pour la classe négative.

### III.4 Conclusion

La régulation de l'exploitation en temps réel des réseaux de transport multimodal est de plus en plus complexe. Une assistance informatique performante est nécessaire. Mais il devient primordial voire obligatoire d'avoir un système rapide, pour contenir la propagation d'un incident. Le système proposé utilisant la classification SVM permet de répondre rapidement à chaque apparition de perturbation.

L'entrée de notre module de classification est un vecteur de données comportant les paramètres caractérisant une perturbation et les critères de régulation. Il décrit une vision globale du réseau à partir de laquelle le SARR peut avoir une idée sur l'impact de chaque perturbation sur les différentes zones ainsi que l'effet sur d'autres perturbations simultanées.

La technique MSVM a permis de proposer une hiérarchisation des décisions au régulateur. Ce qui correspond bien à notre objectif d'aide à la régulation.

Les décisions de régulation proposées sont des manœuvres simples et rapides utilisées dans les situations familières. Lorsque les perturbations sont complexes et nombreuses le système propose d'autres manœuvres comme la reconfiguration spatiale, nécessitant plus de calcul. Ce travail fera l'objet du quatrième chapitre.

## **Chapitre IV: Algorithme à colonie de fourmis pour la reconfiguration et la régulation**

## IV.1 Introduction

La complexité des réseaux de transport ne cesse d'augmenter ; les nombres de véhicule, de stations et de passagers sont de plus en plus importants, et la circulation est de plus en plus difficile. A cette complexité, s'ajoute le caractère multimodal des réseaux de transport. Ainsi la tâche du régulateur humain devient de plus en plus dure et parfois impossible dans des cas complexes à réaliser. Nous avons commencé par proposer une approche d'aide à la régulation consistant à choisir la manœuvre la plus adéquate pour les perturbations familières [Zidi & al., 05] [Zidi & al\_a, 06]. Dans ces réseaux multimodaux, l'apparition de perturbations simultanées rend la régulation difficile et les manœuvres simples ne s'appliquent plus. Une congestion de circulation, par exemple, causée par une manifestation avec un retard estimé très important, peut provoquer une perturbation sur toute la ligne ou même sur plusieurs lignes du réseau des trains de bus d'un côté et plusieurs stations non servis de l'autre côté, pendant une durée de temps importante. Ceci peut aussi provoquer un flux de passagers dépassant la capacité des véhicules disponibles. La résorption de ces incidents nécessite une reconfiguration spatiale en temps réel. Le régulateur peut alors proposer des itinéraires de secours optimaux dans les zones perturbées. Après chaque régulation spatiale, il faut élaborer une planification optimale des horaires de passages des véhicules. Cette planification est aussi utilisée dans les cas de perturbations sans reconfiguration.

Après avoir présenté une étude bibliographique sur les algorithmes à colonie de fourmis (ACF), nous proposons dans ce chapitre deux approches ACF pour la reconfiguration spatiale et la régulation horaire en temps réel. Dans la deuxième partie, nous présentons le premier algorithme dont les solutions concernent des décisions spatiales affectant les itinéraires des véhicules. Il s'agit d'optimiser en temps réel certains critères heuristiques ainsi que le flux des passagers dans les zones affectées par des perturbations compliquées. Dans la troisième partie nous présentons le deuxième algorithme. C'est une approche à colonie de fourmi améliorée par une recherche locale dynamique. Il s'intéresse à l'affectation des horaires et prend en compte la régularité, la ponctualité et la correspondance.

## IV.2 Algorithme à Colonie de Fourmis ACF

### IV.2.1 Principe de l'ACF

### IV.2.1.1 Inspiration biologique

Les études réalisées par les éthologues ont montré que certains comportements collectifs des insectes sociaux étaient auto-organisés [Deneubourg & al., 83], [Deneubourg & al., 89], [Goss & al., 90]. L'auto-organisation caractérise des processus au cours desquels des structures émergent au niveau collectif, à partir d'une multitude d'interactions simples entre insectes, sans être codées explicitement au niveau individuel. En marchant du nid à la source de nourriture et vice-versa (ce qui dans un premier temps se fait essentiellement de façon aléatoire), les fourmis déposent au passage sur le sol une substance volatile odorante appelée phéromone. Cette substance permet de créer une piste chimique que les fourmis suivent. En effet, les fourmis peuvent détecter les phéromones grâce à des capteurs sur leurs antennes.

Les éthologues ont montré aussi que les fourmis étaient capables de sélectionner le plus court chemin pour aller du nid à une source de nourriture grâce au dépôt et au suivi de pistes de phéromone.

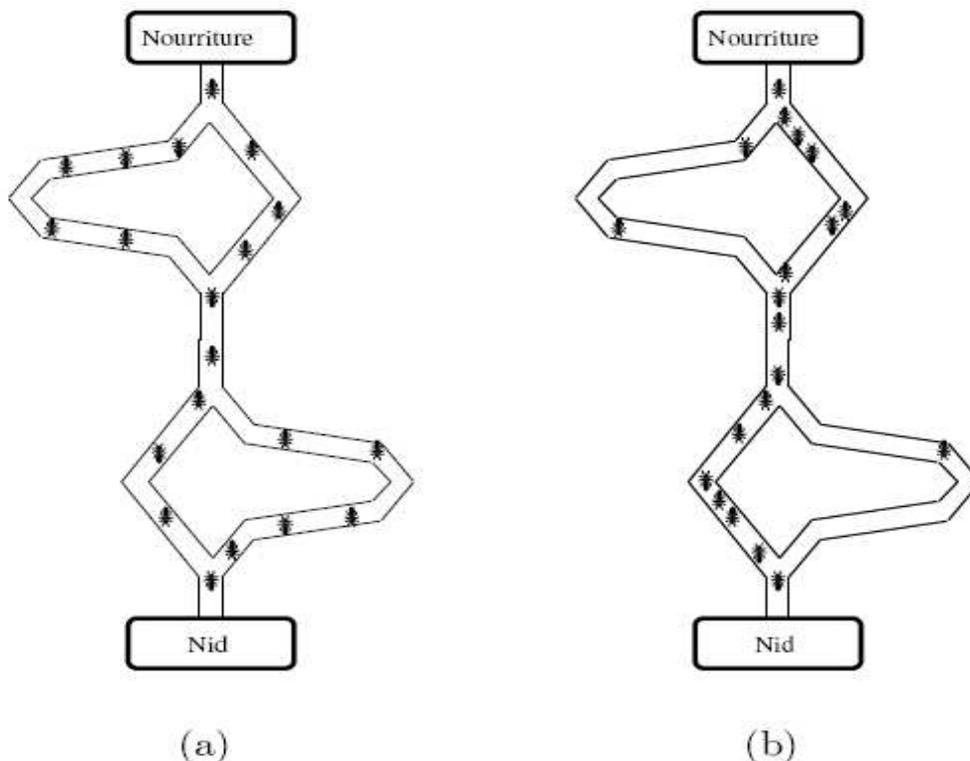


Figure IV.1: Expérience du double pont binaire.

Comme l'illustre l'expérience du double pont binaire [Dorigo, 99] de la figure IV.1, lorsqu'une colonie de fourmis doit emprunter un pont à deux branches de longueurs différentes pour exploiter une source de nourriture, elle sélectionne la branche courte si la différence entre

les longueurs des branches est suffisamment importante. Les fourmis déposent les phéromones en allant vers la source de nourriture et au retour vers le nid. Au départ, le choix du chemin est aléatoire mais la branche courte devient vite la plus marquée car les fourmis qui l'empruntent arrivent plus vite au nid et auront statistiquement plus de chance de l'emprunter lorsqu'elles retourneront vers la source de nourriture.

Une autre expérience qui peut expliquer l'intelligence de ces insectes concerne la coupure d'une piste de phéromone [Dréo, 04] : on suppose que les fourmis sont en train de suivre une piste de phéromones sur laquelle est déposé à un moment donné un obstacle barrant la route (figure IV.2 (a)). Les fourmis qui arrivent devant l'obstacle doivent choisir d'aller à gauche ou à droite (figure IV.2 (b)). Puisqu' aucune phéromone n'est déposée le long de l'obstacle, il y a autant de fourmis qui partent à gauche qu'à droite. Néanmoins, le chemin de droite est plus court que celui de gauche, pour cela les fourmis qui l'empruntent, vont retrouver plus vite la piste de phéromone de départ. Pour chaque fourmi allant du nid à la nourriture, nous associons également une fourmi qui va de la nourriture au nid (en fait elles ont été séparées par l'apparition brutale de l'obstacle). Les phéromones de ces fourmis vont se superposer à droite. Comme elles vont rejoindre le chemin initial, le chemin de droite sera deux fois plus imprégnée de phéromone que la piste de gauche, où les fourmis n'ont pas encore pu rejoindre la piste initiale (ce chemin étant plus long). Les fourmis qui arrivent à l'obstacle à partir de ce moment, préféreront suivre la piste de droite. Le nombre de fourmis qui passent par la droite va augmenter, ce qui augmentera encore la concentration de phéromones. De plus, l'évaporation des phéromones sera plus forte sur la piste de gauche du fait que sa longueur est plus grande. La piste de gauche sera donc rapidement abandonnée, parce qu'elle est beaucoup moins imprégnée : les fourmis passeront toutes très vite par la piste la plus courte.

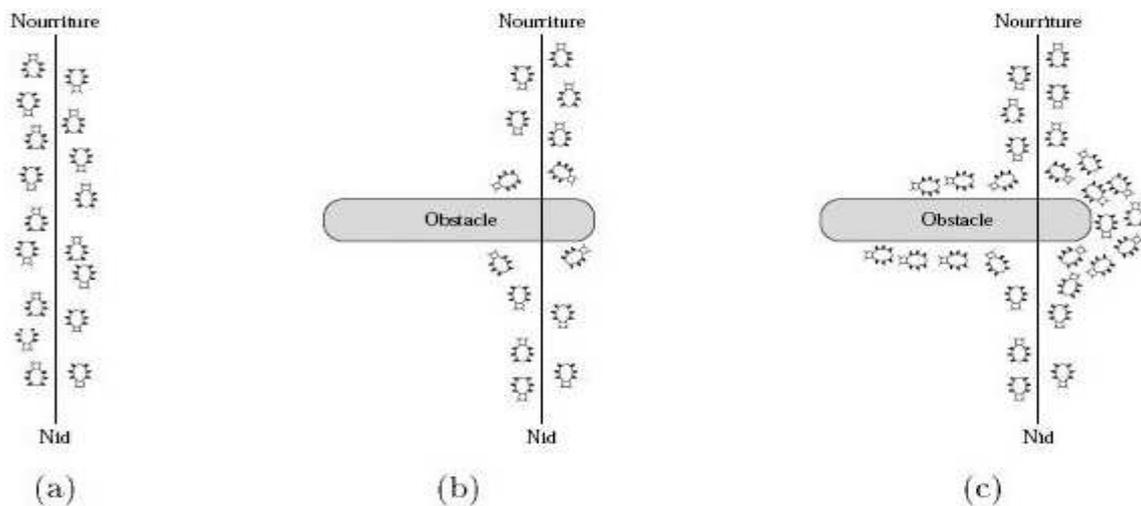


Figure IV.2: Effet de la coupure d'une piste de phéromone.

#### IV.2.1.2 Algorithme informatique

Pour utiliser cette idée biologique en informatique, il est nécessaire de décrire les paramètres par des variables représentant, par exemple, la quantité de phéromone puis traduire la même logique en Algorithme à Colonie de Fourmis (ACF). Dans une itération de cet algorithme (figure IV.3), chaque agent (fourmi) construit une solution d'après des décisions basées sur les quantités de phéromone. Ces traces sont mises à jour en examinant les critères heuristiques des solutions obtenues. Elles sont renforcées pour les décisions ayant donné de meilleures solutions et diminuées pour les autres. On répète cette itération générale jusqu'à la réalisation d'un critère d'arrêt comme un nombre maximum d'itérations ou un écart donné par rapport à une borne inférieure [Lacomme, 03]. Ce mécanisme permet d'améliorer progressivement les solutions au cours des itérations.

Au début, la quantité de phéromone est initialisée arbitrairement. Elle est mise à jour au début de chaque itération selon une formule qui comprend un terme représentant l'évaporation et un autre le renforcement (équation 1). Dans la nature, la quantité de phéromone subit une évaporation, et pour traduire ce phénomène, nous pondérons la quantité de phéromone à l'instant  $t$  avec taux  $\rho$  représentant sa persistance. Le terme de renforcement exprime la quantité de phéromone ajoutée par les fourmis à chaque itération.

$$\tau(t+1) = \rho\tau(t) + \Delta\tau \quad (1)$$

```
Tant que (la condition d'arrêt n'est pas atteinte)  
  Pour chaque fourmi  
    Tant que (la solution n'est pas complète)  
      Choisir l'état suivant en fonction de la  
      mémoire et la quantité de phéromone  
      Ajout de l'arc à la liste tabou (mémoire)  
      Mise à jour locale de phéromone sur l'arc  
      choisi  
    Fin tant que  
  Fin pour  
  Évaluation des solutions  
  Mise à jour globale des phéromones  
Fin tant que  
Afficher la meilleure solution
```

Figure IV.3: Algorithme ACF.

## IV.2.2 Caractéristiques de l'ACF

Les algorithmes à colonie de fourmis peuvent être appliqués à n'importe quel problème d'optimisation. Il suffit de présenter l'espace de recherche sous une forme exploitable par les fourmis artificielles. Par analogie avec la nature, une solution proposée par une fourmi est un ensemble des décisions présentées sous la forme d'arcs empruntés par cette fourmi et dont elle augmente les quantités de phéromone.

Cette approche est comparable à l'algorithme génétique. En effet, dans un ACF les solutions s'améliorent d'une itération à une autre jusqu'à la convergence. Au cours de ces itérations, les traces de phéromones diminuent sur les mauvaises solutions et augmentent sur les bonnes pour améliorer la qualité du résultat.

Le choix se fait d'une manière probabiliste. Le principal avantage par rapport aux autres techniques d'optimisation est la combinaison de l'exploration de l'espace de recherche en utilisant une transition aléatoire et l'exploitation des meilleures solutions en utilisant une transition plus intelligente avec une probabilité qui dépend de caractéristiques heuristiques.

Les fourmis artificielles sont des agents simples dont les points communs avec les fourmis réelles sont :

- ✓ Une communication indirecte avec leur environnement.
- ✓ Une perception limitée de cet environnement.
- ✓ Des décisions aléatoires (recherche stochastique).
- ✓ Un déplacement dans un espace à la recherche du plus court chemin

Elles se différencient par le fait que ces fourmis artificielles :

- ✓ Possèdent certaines capacités supplémentaires comme l'utilisation de probabilités pour rechercher un bon compromis entre exploration et exploitation.
- ✓ Disposent d'une mémoire pour la construction d'une solution.
- ✓ Se déplacent dans un espace discret.

## IV.2.3 ACF pour l'optimisation

### IV.2.3.1 Problème du voyageur de commerce

Le problème du voyageur de commerce PVC ("Travelling Salesman Problem", TSP) a fait l'objet de la première implémentation d'un algorithme à colonies de fourmis : le Ant System" (AS) [Dorigo & al., 91] [Dorigo & al., 96] [Dorigo & al., 97]. Il s'agit de minimiser un effort en terme de distance à parcourir. Les fourmis peuvent rencontrer ce type de problème dans le cas où elles se déplacent entre une source de nourriture et leur nid. Les premiers travaux ont été menés au début des années 1990 par Alberto Colorni, Marco Dorigo et Vittorio Maniezzo ([Colorni & al., 91] [Colorni & al., 1992] [Dorigo, 92]).

Le problème du voyageur de commerce consiste à trouver le trajet le plus court (désigné par tournée "ou plus loin par tour") reliant  $n$  villes données, chaque ville ne devant être visitée qu'une seule fois. Le problème est plus généralement défini comme un graphe complètement connecté  $(N, A)$ , où les villes sont les noeuds  $N$  et les trajets entre ces villes les arêtes  $A$ .

Nous avons trouvé dans la bibliographie plusieurs versions de l'algorithme à colonie de fourmis qui ont été appliquées au PVC

#### ➤ **ANT SYSTEM (AS)**

Dans l'algorithme AS [Dorigo & al., 96], à chaque itération, chaque fourmi parcourt le graphe et construit un trajet complet. À chaque fois, elle choisit à partir d'une ville  $i$  la prochaine ville  $j$  à visiter à l'aide d'une probabilité  $P_{ij}(t)$  (équation (2)) basée sur un compromis entre l'intensité de la trace de phéromone  $\tau_{ij}(t)$  avec une puissance  $\alpha$  et la visibilité  $\eta_{ij} = (1/d_{ij})$  qui prend en considération la distance entre les villes,  $d_{ij}$ , avec une puissance  $\beta$ . Les coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres qui permettent de contrôler l'importance relative des deux éléments.

Pour éviter qu'une fourmi ne revienne sur ses pas, elle conserve la liste des villes qu'elle a déjà visitées. L'objectif de cette approche est d'obliger cette fourmi à former une solution admissible. Cette liste nommée liste tabou est remise à zéro à chaque fois que la fourmi termine une tournée complète. La liste tabou constitue la mémoire de la fourmi.

$$P_{ij}^f = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_k [\tau_{ik}(t)]^\alpha [\eta_{ik}]^\beta} & \text{si } j \notin \text{tabou de } f \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2)$$

Pour la mise à jour de la quantité de phéromone, chaque fourmi ajoute une quantité sur les arcs qu'elle a empruntés. Ce qui permet de renforcer les traces sur les chemins choisis et donc la convergence de la plupart des fourmis, attirées par la phéromone, vers une solution.

L'algorithme ne serait pas complet sans le processus d'évaporation de la phéromone. En effet, pour éviter d'être piégé dans des optimums locaux et par analogie aux fourmis naturelles, il est nécessaire de permettre au système d'oublier les mauvaises solutions. La règle de mise à jour des pistes est donc :

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t) \quad (3)$$

Où  $\rho$  appartient à  $[0, 1]$ . C'est le coefficient de persistance qui définira la vitesse d'évaporation des phéromones sur les arcs entre l'instant  $t$  et l'instant  $t+1$ , et où  $\Delta \tau_{ij}(t)$  représente la quantité de phéromone déposée par les fourmis dans ce même intervalle de temps sur l'arc  $(i, j)$ .

$$\Delta \tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k(t) \quad (4)$$

Avec  $\Delta \tau_{ij}^k(t)$  la quantité de phéromone déposée par la fourmi  $k$  sur l'arc  $(i, j)$  dans ce même intervalle de temps et  $m$  le nombre de fourmis.

Historiquement, il y a eu trois versions de AS [Coloni et al, 91], qui se différencient par la manière de mises à jour des pistes de phéromones.

✓ ***Ant-quantity et Ant-density*** : [Dorigo et al, 92]

Dans les deux premiers modèles, Ant-quantity et Ant-density, le dépôt de phéromones était entrelacé avec la progression des fourmis et ne se déroulait pas à la fin de chaque cycle. Il s'agit en fait du fonctionnement des fourmis réelles : à chaque pas, la fourmi dépose un peu de phéromone. Ces deux premiers algorithmes se différencient par la quantité de phéromone déposée à chaque pas.

$$\text{Pour l'algorithme Ant-density } \Delta_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q & \text{si la fourmi } k \text{ va de } i \text{ à } j \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{Pour l'algorithme Ant-quantity } \Delta_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{d_{ij}} & \text{si la fourmi } k \text{ va de } i \text{ à } j \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (6)$$

Ces algorithmes ont été abandonnés, car leurs performances étaient en dessous de celles de Ant-cycle.

✓ **Ant-cycle** [Dorigo & al., 96]

Dans cette version, la mise à jour de la quantité de phéromone se fait après un cycle d'itération. Après avoir parcouru tous les sommets (les villes), chaque fourmi dépose sur l'ensemble de son parcours, une quantité selon l'équation suivante :

$$\Delta_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k(t)} & \text{si la fourmi } a \text{ emprunté l'arc } ij \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (7)$$

$Q$  est une constante dans les trois équations 5, 6 et 7 et  $L_k(t)$  la longueur du tour effectué par la fourmi  $k$  à l'instant  $t$ . Cette quantité de phéromone ajoutée dépend de la qualité de la solution trouvée, car plus  $L_k(t)$  est faible plus l'arc sera renforcé en phéromones. Cette mise à jour, basée sur la compétitivité du tour qui est en train d'être construit, explique les performances de Ant-cycle par rapport aux autres algorithmes (Ant-density et Ant-quantity). En effet, nous verrons, après quelques itérations, émerger clairement les meilleures solutions.

➤ **ANT\_Q**

Dans cet algorithme, les auteurs de [Dorigo, 95] [Dorigo, 96] ont essayé de fusionner des propriétés de AS et de  $Q$ -learning. L'idée était de mettre à jour les traces de phéromone avec une prédiction de la valeur de l'état suivant. En réalité, en plus d'une modification globale des phéromones après chaque cycle, les fourmis modifient pas à pas les phéromones sur l'arc qu'elles choisissent. C'est une mise à jour locale qui se fait en ligne (au cours des déplacements des fourmis) selon la formule suivante :

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \gamma \cdot \underset{l \in N_j^k}{\text{MAX}} \tau_{jl}(t) \quad (8)$$

Avec  $N_j^k$  l'ensemble des nœuds suivant le nœud  $j$  dans le chemin de la fourmi  $k$ .

Alors que pour la mise à jour globale, nous utilisons la même formule que dans AS (équation 3) mais où le renforcement différé est calculé de deux manières :

✓ **Meilleur globalement :**

$$\Delta_{ij}(t) = \frac{Q}{L_{gb}} \quad (9)$$

où  $Q$  est un paramètre constant et  $L_{gb}$  la longueur du meilleur tour depuis le début jusqu'à l'instant  $t$ . Cette méthode ne renforce que les arcs appartenant à ce meilleur tour trouvé.

✓ **Meilleure itération :**

$$\Delta_{ij}(t) = \frac{Q}{L_{it}} \quad (10)$$

où  $L_{it}$  est la longueur du meilleur tour à l'itération courante  $t$ .

Quand une fourmi est en  $i$ , elle choisit la ville  $j$  suivant une variable aléatoire  $q$  uniformément distribuée sur  $[0, 1]$ . En effet,  $j$  sera la meilleure ville au sens du critère utilisé pour  $q \leq q_0$ . Et pour  $q > q_0$ ,  $j$  sera choisie avec une probabilité de transition dépendant du critère.  $Q$  et  $q_0$  sont des paramètres fixes de l'algorithme. Ant-Q est alors un algorithme basé sur l'apprentissage par renforcement.

➤ **AS<sub>rank</sub>** [Lacomme & al., 03] [Bullnheimer, 97]

Dans cette version, les fourmis sont rangées par ordre décroissant des longueurs des chemins parcourus. La mise à jour de la quantité de phéromone tient compte du rang des  $\sigma$  meilleures fourmis. La formule de mise à jour est alors la suivante :

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \frac{\sigma}{L^+} + \sum_{k=1}^{\sigma-1} \Delta\tau_{ij}^k \quad (11)$$

$$\text{avec } \Delta\tau_{ij}^k = \frac{\sigma - k}{L_k} \quad (12)$$

où  $L^+$  est la longueur du meilleur chemin trouvé par les fourmis jusqu'à la dernière itération et  $L_k$  la longueur du chemin trouvé par la fourmi  $k$ .

➤ **MIN-MAX ANT SYSTEM (MMAS)** [Stuzle & Hoos, 97] [Alaya & al., 05]

Dans cet algorithme (Max-Min Ant System), la mise à jour est globale et seuls les arcs de la meilleure solution sont renforcés. La différence majeure par rapport aux autres algorithmes est l'utilisation des valeurs  $\tau_{\min}$  et  $\tau_{\max}$  pour l'intensité des traces avec valeur initiale  $\tau_{\max}$ . En

fait, les quantités de phéromone bornées permettent d'éviter que certains chemins soient trop favorisés. Mais après un certain nombre d'itérations, nous pouvons trouver un ou deux chemins où les traces de phéromone sont très proches de  $\tau_{\max}$  et sur les autres chemins égales à  $\tau_{\min}$  ce qui ne permet pas d'échapper des optimums locaux. Pour plus d'exploration, les auteurs de [Stuzle & Hoos, 98] ont proposé le Mécanisme d'effacement de trace (trail smoothing mechanism) qui consiste à ajouter à chaque arc une quantité proportionnelle à la différence entre  $\tau_{\max}$  et la quantité existante au même instant.

$$\Delta\tau_{ij} = \alpha \cdot (\tau_{\max} - \tau_{ij}(t)) \quad (13)$$

Donc, un arc avec une quantité de phéromone importante, sera moins renforcé que les autres, la différence de sa quantité de phéromone par rapport à  $\tau_{\max}$  étant faible ; tandis qu'un arc ayant une petite quantité de phéromone se verra renforcée, la différence par rapport à  $\tau_{\max}$  étant plus importante.

#### ➤ ANT COLONY SYSTEM (ACS)

Pour améliorer les performances de AS (Ant System) les auteurs de [Dorigo & al., 96] ont proposé le Ant Colony System (ACS) surtout pour les problèmes de grandes tailles [Dorigo & al., 97] [Gamberdella, 01]. Les modifications par rapport à AS sont :

1. ACS utilise une méthode de transition dépendant d'un paramètre  $q_0$  fixant le rapport exploration/exploitation. Une fourmi  $k$  à la ville  $i$  utilise la formule suivante pour choisir la ville  $j$  :

$$j = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{l \in J_i^k} \left[ \tau_{il}(t) \cdot (\eta_{il})^\beta \right] & \text{si } q \leq q_0 \\ J & \text{si } q > q_0 \end{cases} \quad (14)$$

où  $\beta$  est un paramètre pour moduler les quantités de phéromone par rapport à la visibilité ( $\eta_{il}$ ).

$J_i^k$  est la liste des villes restantes à visiter. Quand la fourmi  $k$  est à la ville  $i$ ,  $q$  est une variable aléatoire uniformément distribuée sur  $[0, 1]$  et  $J$  est une ville de  $J_i^k$  sélectionnée aléatoirement selon la probabilité suivante:

$$P_{iJ}^k = \frac{(\tau_{iJ}(t)) \cdot (\eta_{iJ})^\beta}{\sum_{l \in J_i^k} (\tau_{il}(t)) \cdot (\eta_{il})^\beta} \quad (15)$$

Il y a donc deux types de transitions possibles suivant  $q_0$  : La première ( $q \leq q_0$ ) permet une exploitation. Alors que, pour la deuxième ( $q > q_0$ ), l'algorithme tend vers une exploration et le choix se fait de la même façon que dans l'algorithme AS.

2. La mise à jour de la quantité de phéromone s'effectue à deux niveaux : une mise à jour locale et une mise à jour globale. La mise à jour locale se fait en ligne. Chaque fourmi, en se déplaçant entre deux villes, ajoute une quantité de phéromone sur l'arc qu'elle vient d'emprunter selon la formule suivante :

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \rho \cdot \tau_0 \quad (16)$$

où  $\tau_0$  est la valeur initiale de l'intensité des phéromones.

La mise à jour globale s'effectue pour les arrêtes  $(i, j)$  qui appartiennent au meilleur tour de longueur  $L^+$ , à la fin de chaque cycle, sous la formule suivante :

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \rho \cdot \Delta\tau_{ij}(t) \quad (17)$$

Où  $\Delta\tau_{ij} = \frac{1}{L^+}$ . En fait, seule la meilleure piste est mise à jour. Ce qui permet de distinguer au cours des itérations les meilleures solutions par rapport aux autres et par la suite favoriser l'exploitation.

3. Des listes de villes candidates sont utilisées pour accélérer le processus de construction d'un chemin. Ces listes stockent pour chaque ville les  $n$  plus proches voisines. Une fourmi ne se déplacera pas vers une ville en dehors de la liste que si toutes les villes de cette liste ont été visitées.

Pour améliorer les solutions générées par les fourmis, les auteurs de [Dorigo et al, 97] ont proposé une variante de cette approche ACS. Il s'agit de l'utilisation d'heuristiques de recherche locale (3-opt et 2-opt) dans un algorithme ACS. Après un nombre d'itérations de ACS, une recherche locale est appliquée sur l'ensemble des solutions choisies en vue de leur amélioration.

Finalement, en comparant les performances de ces variantes de l'algorithme ACF de base, les résultats des MMAS et ACS ont montré une amélioration par rapport à ANT-Q et le ASrank est plus performant que AS. Pour ce dernier (AS), la version Ant-cycle est meilleure que les deux autres (Ant-density et Ant-quantity).

### IV.2.3.2 ACF pour d'autres problèmes d'optimisation

Depuis leurs apparitions au début des années 90, les algorithmes à colonie de fourmis ont été appliqués pour résoudre plusieurs problèmes combinatoires N-P difficiles.

Pour les problèmes liés au transport, nous trouvons le problème du voyageur de commerce que nous venons de présenter. Mais cette approche a aussi été utilisée pour le problème de tournée de véhicules [Bullnheimer & al, 97, 98]. C'est un problème NP-difficile modélisant par exemple la collecte de déchets ménagers. [Lacomme, 03] propose un algorithme à colonies de fourmis pour le CARP (Capacitated Arc Routing Problem) qui inclut une recherche locale accélérant fortement le schéma de base des méthodes à fourmis. Les auteurs de [Paul & Wren, 97] ont proposé une application d'AS pour la planification des horaires des conducteurs de bus.

D'autres travaux ont utilisé les algorithmes à colonie de fourmis pour le problème de l'assignement quadratique (QAP) [Gamberdella & al., 97, 99] qui consiste à trouver une permutation  $\sigma$  minimisant la quantité :

$$C(\sigma) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} b_{\sigma(i)\sigma(j)} \quad (18)$$

avec  $A = (a_{ij})$  et  $B = (b_{ij})$  deux matrices  $n \times n$ .

La complexité des problèmes industriels ne permet pas l'utilisation de méthodes exactes. Les temps de calculs ne sont pas compatibles et ces méthodes ne permettent pas l'intégration de contraintes spécifiques. Les métaheuristiques constituent alors une stratégie de résolution de plus en plus privilégiée. Dans ce contexte, Gagné [Gagné, 01] présente une approche à colonies de fourmis pour résoudre un problème réel d'ordonnancement industriel multi-objectif de commandes dans un centre de coulée horizontale d'une aluminerie. Ces objectifs sont la minimisation de la perte de capacité du centre de coulée, la minimisation du retard total de l'ensemble du carnet de commandes et la minimisation de la perte de capacité de transport.

Les algorithmes à colonie de fourmis ont été aussi utilisés pour des problèmes de télécommunication comme l'équilibrage de charge et le routage dans un réseau [Ruud & al., 96] [Sim & Sun, 02].

D'autres problèmes d'optimisation ont été résolus par cette approche: le coloriage des graphes [Costa & Hertz, 97] et la classification non supervisée [Monmarche, 2000].

## IV.3 ACF pour la reconfiguration

### IV.3.1 Reconfiguration spatiale

L'action de régulation n'agit que sur les horaires de passage des véhicules. Lors de certaines perturbations complexes et difficiles à gérer et/ou simultanées, le régulateur ne peut pas proposer de décision de régulation mais il doit refaire une planification totale ou partielle du réseau en temps réel. C'est la reconfiguration des réseaux multimodaux où il doit redéfinir d'une part, les tracés suivis par les moyens de transports; d'autre part les points d'interaction, ou pôles d'échanges, entre les différents réseaux spécifiques. Les pôles d'échanges (correspondances) sont un maillon essentiel dans la chaîne de déplacements. Ce sont des points de passage obligés d'un ou plusieurs moyens de transport.

Un réseau de transport peut être représenté par un graphe dont les nœuds sont les stations et les arcs sont les itinéraires suivis par les véhicules ainsi que les itinéraires de secours. Dans une perturbation de circulation, un ou plusieurs itinéraires de ce graphe peuvent être bloqués ce qui peut provoquer, d'un côté, un train de véhicules et de l'autre, un ou plusieurs arrêts non desservis pendant une longue période. On peut aussi imaginer une variation importante du nombre de passagers dans une zone à cause d'une manifestation. Dans ces cas, le régulateur doit proposer un nouvel itinéraire pour chaque véhicule de la zone perturbée. Il s'agit d'un ensemble d'arrêts (Nœud) et d'arcs de ce graphe permettant d'absorber le flux de passagers et de desservir rapidement le plus grand nombre possible d'arrêts.

Le graphe suivant représente une partie d'un réseau composée de 3 lignes et de 14 stations. Nous supposons une congestion de circulation entre les arrêts 13 et 9; l'itinéraire entre les deux stations de la ligne 3 est bloqué et il y a un temps de retard estimé important. Une deuxième perturbation s'est produite simultanément au niveau de la station 2. Il s'agit d'un flux de passagers très important à cause de la sortie des supporters d'un stade.

Pour le premier incident, le régulateur doit trouver un chemin, pour les véhicules de la ligne 3, passant de l'arrêt de correspondance 4 à l'arrêt de correspondance 9 et un chemin dans le sens inverse. Il a la possibilité par exemple de proposer le chemin 11, 12, 4, 3, 9 en empruntant l'itinéraire de secours entre l'arrêt 3 et l'arrêt 9. Le régulateur peut aussi recommander au véhicule le chemin 11, 12, 4, 3, 8, 9 avec un passage sans arrêt au niveau des nœuds 8 et 3 des lignes 1 et 2.

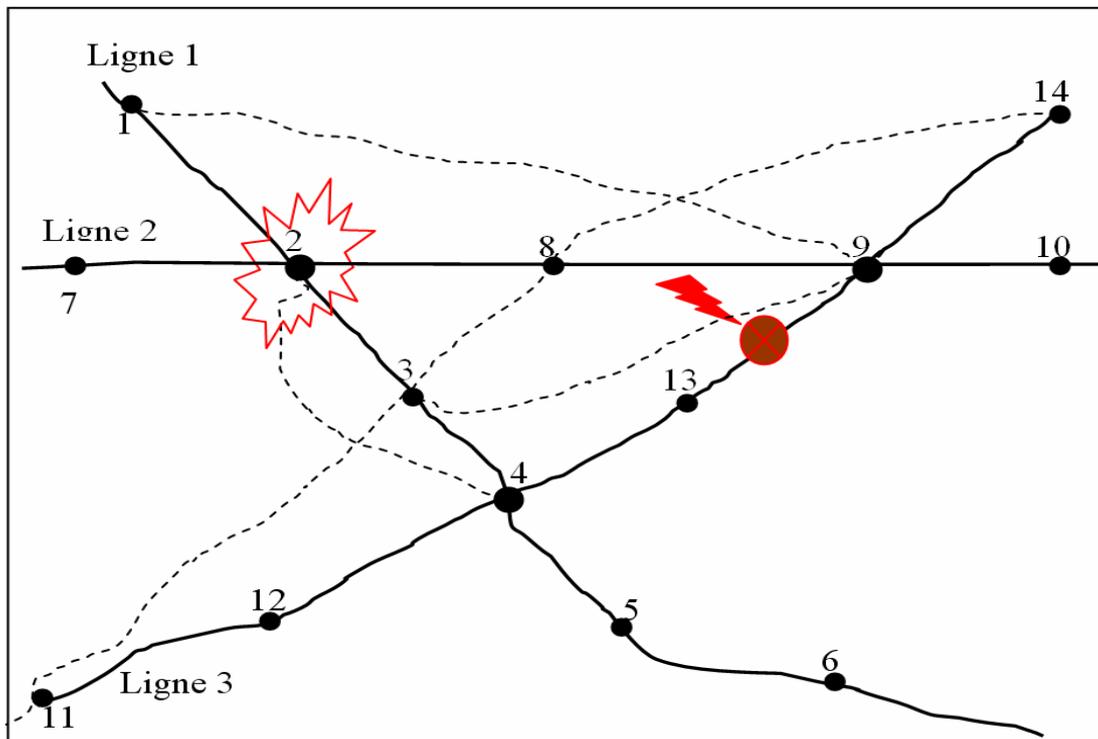


Figure IV.4: Exemple de reconfiguration.

Pour la deuxième perturbation, le régulateur doit trouver une solution pour servir rapidement les passagers à l'arrêt de correspondance 2 des lignes 1 et 2. Il peut proposer la liaison de raccordement entre les arrêts 2 et 4 pour la ligne 1 si la charge n'est pas trop importante au niveau de l'arrêt 3 qui sera sauté par les véhicules pendant la période de régulation. Cette liaison de raccordement (ou itinéraire de secours) doit être plus courte avec un temps de parcours inférieur à celui de l'itinéraire habituel, pour absorber rapidement le flux de passagers allant vers l'arrêt 1 de la ligne 1.

Avec la complexité de ces graphes de réseaux de transport multimodal et l'apparition des perturbations simultanées ainsi que l'aspect temps réel, le régulateur n'arrive pas à déterminer rapidement les solutions graphiques adéquates. D'où l'importance d'un système informatique d'aide à la reconfiguration dont le rôle est de trouver les chemins optimaux dans un graphe de réseau de transport perturbé.

### IV.3.2 Fonction coût

Le respect de la capacité des véhicules et la vitesse de déplacement conditionnent la qualité du service rendu aux usagers des transports. L'objectif de la reconfiguration spatiale d'une zone perturbée est de déterminer en temps réel les chemins optimaux en temps de parcours, distance de parcours et nombre de passagers servis.

- ✓ Distance de parcours ( $D$ ):

Ce critère heuristique est important à minimiser pour les compagnies de transport. En effet, c'est un facteur direct de plusieurs coûts : consommation du gasoil, amortissement des véhicules,...etc.

- ✓ Temps de parcours ( $T$ ):

Les itinéraires les plus courts ne sont pas toujours les plus rapides. En fait, le temps de parcours d'un itinéraire de transport dépend des conditions de circulation et de la période de la journée. Pendant les heures de pointe, on trouve souvent des congestions sur plusieurs routes. Il est important de minimiser ce critère pour respecter les horaires et retrouver rapidement les conditions d'exploitation normale.

- ✓ Charge :

L'un des objectifs les plus importants de la régulation des réseaux de transport est l'absorption des flux des passagers d'une zone perturbée. En effet, pour chaque compagnie de transport, le plus important est de servir le maximum de clients. Il est aussi intéressant de minimiser le temps d'attente des passagers en tant que critère de confort surtout dans le cas de réseaux perturbés. Il suffit de servir rapidement les passagers en attente. Nous définissons le nombre de passagers  $C_i$  à servir sur un itinéraire de transport désigné par  $i$  comme suit :

Soit  $A_i$  la station d'arrivée de cet itinéraire (arc)  $i$ , le nombre de passagers à servir sur cet arc pour un véhicule est alors l'ensemble des voyageurs qui vont monter ou descendre à la station  $A_i$ . Nous devons prendre en considération la capacité du véhicule, et lui ajoutons donc le nombre de personnes qui vont descendre à  $A_i$  représentant le nombre de places libérées à la station. Mais, si le nombre de voyageurs est inférieur à cette capacité, le véhicule ne prendra que ce nombre.

Soit :

$Cap_i$  : La capacité du véhicule concerné par la reconfiguration sur l'arc  $i$ .

$Cd_i$  : Le nombre de passagers qui vont descendre à la station d'arrivée  $A_i$  de l'arc  $i$ .

$Cm_i$  : Le nombre de passagers en attente dans la station d'arrivée  $A_i$  de l'arc  $i$ .

Le nombre de passagers qui vont emprunter le véhicule concerné est donc égal à :

$$\text{Min} ((\text{Cap}_i + \text{Cd}_i), \text{Cm}_i).$$

Nous devons ajouter à ce nombre le nombre de passagers qui vont descendre à la station  $A_i$ . Ce sont des clients qu'il faut servir aussi. Donc le nombre de passagers à servir sur l'arc  $i$  est :

$$C_i = \text{Min} ((\text{Cap}_i + \text{Cd}_i), \text{Cm}_i) + \text{Cd}_i \quad (19)$$

**Exemple :**

Supposons un véhicule dont le nombre de places vides ( $\text{Cap}_1$ ) est égal à 20 entre la station 1 et la station 2 d'une ligne de transport. Le nombre de passagers qui vont descendre à l'arrêt 2 ( $\text{Cd}_1$ ) est égal à 5, le véhicule peut prendre 25 personnes. Mais s'il y a que 10 personnes en attente à l'arrêt 2 ( $\text{Cm}_1$ ), il va prendre ces 10 passagers. Le nombre de passagers servis sur l'arc 1 (l'arc (1,2)) est égal à  $C_1 = 10 + 5 = 15$ .

La fonction coût est relative aux critères heuristiques que nous devons optimiser, notamment, le temps ( $T_i$ ) et la distance de parcours ( $D_i$ ) à minimiser et la charge (nombre de passagers servis) ( $C_i$ ) à maximiser. Dans les processus de planification de réseaux de transport, deux critères sont particulièrement utilisés. Le premier critère est le temps de parcours par la charge (le nombre de passagers), le second est la distance de parcours par la charge. Relativement au nombre de passagers qui vont être servis, le régulateur peut juger la rentabilité du passage par un itinéraire. Un chemin de 10 minutes pour servir 20 personnes par exemple est meilleur qu'un autre chemin de 5 minutes pour servir 5 personnes. Nous allons donc minimiser le temps et la distance de parcours par personne.

Les ACF semblent être bien adaptés à l'optimisation multicritère. En effet, au niveau des probabilités de transition (formules 2, 15), nous pouvons utiliser plusieurs critères des pondérations différentes. Dans notre cas, nous avons transformé le problème multicritère en monocritère par agrégation des deux critères à minimiser en une seule fonction objectif. Pour chaque critère, nous associons un poids afin d'indiquer son importance qui varie suivant les perturbations. Ces poids seront déterminés par le régulateur qui peut indiquer ses préférences pour chaque incident. La fonction objectif est alors un coût de l'arc  $i$  concerné par la reconfiguration:

$$\text{Cout}_i = a \times \left( \frac{T_i}{C_i} \right) + b \times \left( \frac{D_i}{C_i} \right) = \frac{(a \times T_i + b \times D_i)}{(C_i)} \quad (20)$$

avec  $a$  et  $b$  les poids des critères.

### IV.3.3 Algorithme à Colonie de Fourmis pour la Reconfiguration Spatiale (ACFRS)

En gardant la logique décrite au paragraphe (IV.1.2), nous appliquons un algorithme à colonie de fourmis au problème de la reconfiguration spatiale en temps réel des réseaux de transport [Zidi & al\_b, 06]. Il s'agit de l'algorithme ACFRS.

Un graphe de transport concerné par la reconfiguration sera présenté par un tableau dont chaque colonne est un vecteur des données d'un arc, donnant la station de départ, la station d'arrivée, le coût et la quantité de phéromone sur cet arc.

#### Notation :

**N** : Le nombre de fourmis.

$\tau_i(t)$  : La dernière quantité de phéromone déposée sur l'arc  $i$  avant la mise à jour.

$\rho$  : Le taux de persistance des traces de phéromone ( $0 \leq \rho \leq 1$ ).

$\Omega_s$  : L'ensemble des arcs qui ont comme station de départ la station  $s$ .

$P_1$  : La probabilité de la transition aveugle.

$P_2$  : La probabilité de la transition intelligente.

**Tabou<sub>f</sub>** : la liste taboue de la fourmi  $f$ , elle contient l'ensemble des stations visitées par  $f$ .

**P** : La probabilité de choix de type de la transition (aveugle ou intelligente).

$Cout^f(t)$  : le coût total d'un chemin emprunté par la fourmi  $f$   $Cout^f(t) = \sum_i Cout_i$ .

L'algorithme ACFRS commence par une étape d'initialisation des traces de phéromone sur les arcs du graphe. Cette quantité initiale est la même pour tous les arcs et elle est différente de zéro. Puis les fourmis commencent une par une à construire leurs solutions. À partir du dépôt, chaque fourmi (agent) se déplace d'une station à une autre en choisissant un arc de transition jusqu'à l'arrivée à la station finale déterminée par le régulateur dans la zone de reconfiguration. La fourmi utilise une sorte de mémoire où elle met la liste des arcs qu'elle a emprunté. Il s'agit d'une liste taboue pour qu'elle ne passe pas deux fois par un même arc. Une autre fourmi recommence la même procédure de recherche jusqu'à ce que toutes les fourmis terminent leurs chemins. Le choix d'un arc se fait d'une manière probabiliste que nous allons expliquer dans le paragraphe 4. Une fourmi peut échouer dans sa recherche et elle emprunte un itinéraire qui ne mène pas à la station d'arrivée finale. Nous mettons cette fourmi directement à l'arrivée sans considérer la solution qu'elle a construit.

Lorsque toutes les fourmis ont terminé, nous évaluons les solutions trouvées et nous mettons à jour les traces de phéromone selon la méthode décrite dans le paragraphe 5.

Nous répétons ces itérations jusqu'à la convergence ou un nombre maximal ( $I_{1max}$ ) d'itérations est atteint. On dit que l'algorithme converge si la meilleure solution trouvée ne change pas pendant un nombre ( $I_{max}$ ) d'itérations, fixé comme paramètre de l'algorithme.

Après ce premier test d'arrêt, nous trions les solutions et nous choisissons la meilleure (coût minimum) comme première solution. Puis nous recommençons une deuxième phase de recherche en essayant d'éviter cette première solution. Après, nous explorons de nouveau, avec la même procédure, l'espace de recherche jusqu'à ce que l'optimum change ou un nombre maximal ( $I_{2max}$ ) d'itérations soit atteint. Enfin, nous comparons les deux solutions et nous proposons la meilleure. Nous expliquerons l'idée de recherche de la deuxième solution dans le paragraphe 6. Les différentes étapes de l'algorithme ACFRS sont illustrées par la figure IV.5.

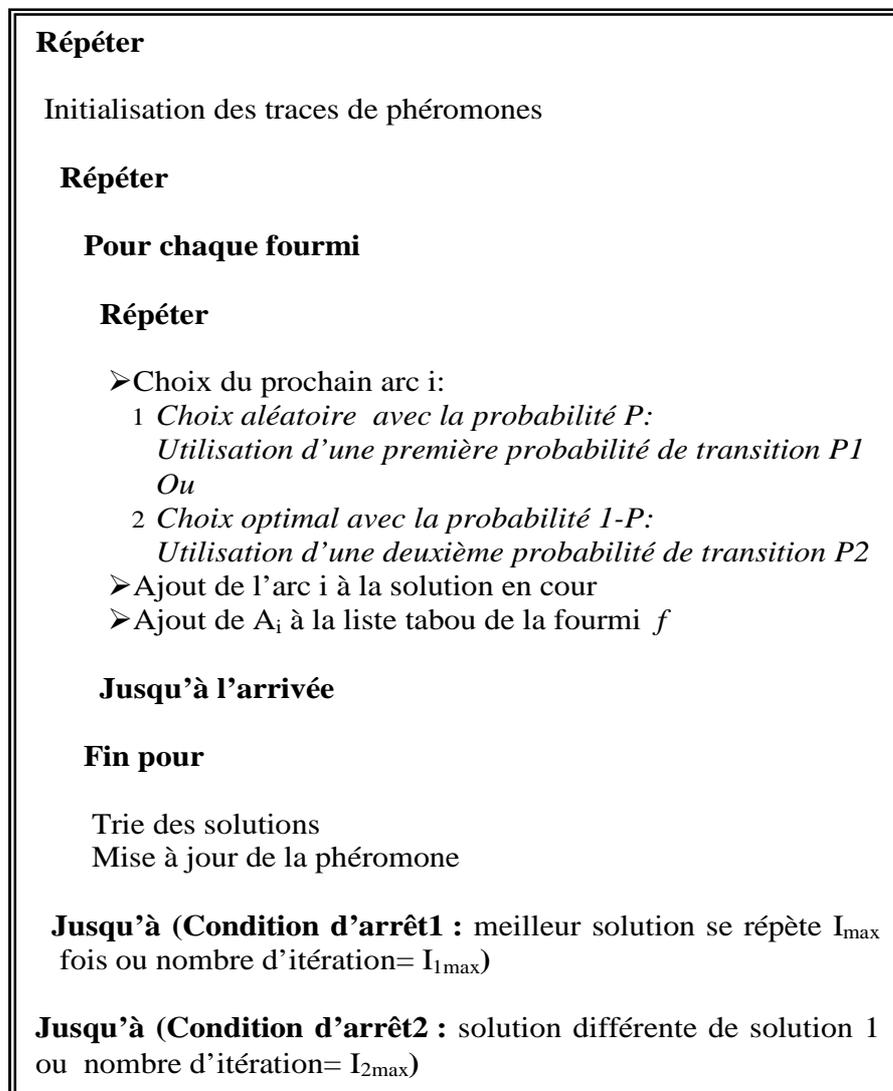


Figure IV.5: Structure de l'algorithme ACFRS.

#### IV.3.4 Génération d'une nouvelle solution

Une fourmi  $f$ , dans une station  $s$ , emprunte d'une manière probabiliste son prochain arc de transition parmi les arcs de  $\Omega_s$  et qui n'appartiennent pas à la liste taboue de  $f$ . Elle choisit, avec une probabilité  $P$ , une première transition aléatoire et avec la probabilité  $(1-P)$  elle choisit une seconde méthode plus intelligente. La probabilité  $P$  est un paramètre de l'algorithme fixant le rapport Exploitation / Exploration. Dans la première méthode, la transition est aveugle et tous les arcs ont la même probabilité d'être choisis. Ce déplacement aléatoire des fourmis permet une meilleure exploration de l'espace de recherche. En utilisant la probabilité de transition  $P_1$  (équation 21), les arcs de qualité moyenne et qui ont des fonctions objectives moins bonnes ont la chance d'être choisis et par la suite renforcés en phéromone.

$$P_1 = \begin{cases} \frac{1}{k} & \text{si } i \in \Omega_s \text{ et } i \notin \text{tabou } f \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (21)$$

La deuxième méthode de transition est plus intelligente puisque la probabilité  $P_2$  (équation 22) de choisir un arc dépend de la quantité de phéromone sur cet arc et de ses caractéristiques heuristiques : le temps et la distance de parcours à minimiser et la charge à maximiser.

$$P_2 = \begin{cases} \frac{[\tau_i(t)]^\alpha \left[\frac{1}{T_i}\right]^\beta \left[\frac{1}{D_i}\right]^\gamma [C_i]^\delta}{\sum_{j=1}^k [\tau_j(t)]^\alpha \left[\frac{1}{T_j}\right]^\beta \left[\frac{1}{D_j}\right]^\gamma [C_j]^\delta} & \text{si } i \in \Omega_s \text{ et } i \notin \text{tabou } f \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (22)$$

avec  $\alpha, \beta, \gamma$  et  $\delta$  les poids respectivement de : phéromone, temps de parcours, distance de parcours et charge. Ils sont des paramètres de l'algorithme.

### IV.3.5 Mise à jour de la quantité de phéromone

En se déplaçant, chaque fourmi laisse des traces de phéromone sur les arcs qu'elle a empruntés. Mais la phéromone est une substance chimique qui s'évapore. Par analogie avec la nature, nous devons prendre en considération cette évaporation. En effet, après avoir terminé le parcours de toutes les fourmis, nous mettons à jour les traces de phéromone selon la formule suivante qui comprend un terme pour l'évaporation et un autre pour le renforcement :

$$\tau_i(t+1) = \rho \cdot \tau_i(t) + \sum_{f=1}^n \Delta\tau_i^f(t) \quad (23)$$

Avec  $\rho$  le facteur de persistance. Son choix est important. En effet, si  $\rho$  est trop proche de 1, nous observons un effet de stagnation des phéromones sur les arcs, ce qui implique des inconvénients comme la persistance de mauvaises solutions. De même, choisir  $\rho = 0$  implique une évaporation trop rapide des phéromones, donc amène la fourmi à un choix dépendant uniquement des autres critères heuristiques.

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

$$\Delta\tau_i^f(t) = \begin{cases} \frac{1}{\text{Cost}^f(t)} & \text{si } i \in \text{tabou } f \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (24)$$

La quantité de phéromone ajoutée est inversement proportionnelle au coût du dernier chemin (solution) trouvée par la fourmi  $f$  ( $\text{Cost}^f(t)$ ) afin de renforcer les chemins les plus courts plus que les autres. Ce qui permet aussi une vision globale sur le graphe puisque la valeur ajoutée sur un arc donne une idée sur la longueur des arcs qui le suit pour un chemin possible.

### IV.3.6 Deuxième solution

Le problème d'optimum local est très abordé par les chercheurs dans les métaheuristiques. Nous trouvons souvent des idées d'exploration de l'espace de recherche. Dans le cas de l'algorithme à colonie de fourmis, le principe de recherche aveugle avec une probabilité donnée, en plus, nous trouvons l'idée de recherche locale qui consiste à une procédure d'amélioration de chaque solution trouvée par une fourmi. Avec la recherche locale, les auteurs de [Lacomme & al., 03] utilisent la notion de fourmis élitistes et des fourmis non-élitistes qui explorent l'espace de recherche. Dans l'algorithme *MMAS* la quantité de phéromone est bornée ce qui évite le renforcement d'un chemin qui peut être optimum local par rapport aux autres.

En plus de la recherche aveugle, nous proposons dans l'algorithme de reconfiguration le principe de la recherche d'une deuxième solution différente. En forçant la sortie de la première solution trouvée, dans une première convergence. Pour cela, nous mettons à zéro la quantité de phéromone et nous vidons les listes taboues des fourmis puis nous lançons les instructions de recherche de notre algorithme une deuxième fois en diminuant la quantité de phéromone sur le

premier chemin choisi, à chaque fois qu'une fourmi l'emprunte. Et nous mettons à jour les traces sur ses arcs selon la formule suivante :

$$\tau_i(t+1) = \varepsilon \tau_i(t) \quad (25)$$

avec  $\varepsilon$  un réel inférieur à 1 pour diminuer  $\tau$ . Ce qui nous permet de sortir du premier optimum et chercher un autre avec plus d'exploration de l'espace de recherche.

## IV.4 ACF pour la régulation horaire

### IV.4.1 La régulation horaire

Après avoir terminé le processus de planification en temps anticipé, nous aurons un tableau de marche théorique, TMT. Mais avec l'apparition des perturbations, les horaires de passages des véhicules dans ce TMT seront changés et nous aurons un tableau de marche perturbé (TMP). Le régulateur doit régler ces tableaux de marche perturbés pour optimiser l'exploitation dans le réseau de transport. Il y aura un premier cas où il doit effectuer uniquement une régulation horaire et un deuxième cas plus difficile qui commence par une reconfiguration spatiale.

Le premier cas concerne uniquement la réaffectation des horaires de passage des véhicules par les stations. Il s'agit alors d'appliquer des temps de retard au TMP pour retrouver les meilleurs horaires au sens des critères de régularité, ponctualité et correspondance.

Dans le cas des perturbations qui nécessitent une reconfiguration, nous appliquons un premier algorithme [Zidi & al\_c, 06] [Zidi & al\_d, 06] de reconfiguration spatiale, ACFRS, qui permet de déterminer le chemin (ensemble des stations et itinéraires) adéquat. Puis, nous construisons un tableau de marche théorique différent du premier puisqu'il y aura des changements spatiaux dans le réseau. Nous considérons ce tableau de marche, construit à partir des temps de parcours des différents itinéraires, un tableau de marche perturbé. Nous recommençons le même travail de régulation horaire que dans le cas précédant de régulation sans reconfiguration.

Les modifications des horaires concernent le temps d'arrêt aux stations et le temps de parcours inter-stations. Le régulateur doit décider du nombre de décisions à appliquer au réseau de transport en tenant du retard maximal. Pour un retard maximal à appliquer de 3 minutes, le régulateur peut proposer l'une des 4 décisions suivantes : 0, 1, 2 ou 3 minutes de retards à chaque station et/ou inter-stations.

Il est bien clair que notre problème est complexe avec un espace de recherche très grand et qui ne cesse d'augmenter d'une façon exponentielle en fonction du nombre de décisions ainsi que des nombres de véhicules et de stations. En effet, pour une petite zone perturbée de 5 stations et 4 véhicules, par exemple, si nous voulons effectuer une régulation horaire uniquement de 4 décisions (un retard maximal à appliquer de 3 minutes), nous aurons  $4(5 \text{ stations} \times 4 \text{ véhicules}) = 420$  solutions possibles. Avec cette complexité issue de la dimension de l'espace de recherche, nous allons ajouter les critères de régulation qu'il faut optimiser.

## IV.4.2 Critères de régulation horaire

Nous avons choisi d'utiliser les trois logiques de régulation qui sont basées sur les plus importants critères de qualité d'un réseau de transport. Il s'agit de la régularité, la correspondance et la ponctualité que nous essayons d'optimiser dans une fonction objectif agrégée. Ces trois critères expriment bien l'attente des voyageurs, la durée des correspondances (durée de transfert) et la durée des trajets. Ce sont les plus étudiés. Ils ont été utilisés dans d'autres travaux notamment dans [Besma, 03] [Borne & al., 03] ainsi que dans [Deb & al., 98].

Dans ce qui suit nous supposons que le flux de passagers et leurs destinations sont connus à travers une enquête sur les origines et les destinations des voyageurs.

### IV.4.2.1 Critère de régularité

Ce critère exprime le maintien de la régularité des intervalles de temps qui séparent les passages successifs des véhicules à une même station. Il est relatif à la minimisation de l'attente des voyageurs aux arrêts.

#### Calcul de l'attente à un arrêt

Le calcul de l'attente des voyageurs à une station  $S_j^m$  dépend :

- de l'intervalle séparant deux passages successifs de véhicules à cette station,
- du nombre de voyageurs dans la station.

Supposons qu'à une période donnée de la journée  $V_i^l$  soit le véhicule suivant  $V_i^l$  à la station  $S_j^m$ . L'intervalle de temps séparant leurs deux passages s'écrit sous la forme suivante :

$$\Delta t = ta_{ij}^{lm} - td_{ij}^{lm}. \quad (26)$$

Il représente en fait la différence entre l'horaire d'arrivée de  $V_i^l$  et l'horaire de départ de  $V_i^l$ .

Considérons la distribution des arrivées des voyageurs,  $\mu_{S_j^m}(t)$ , à l'arrêt  $S_j^m$ . Nous pouvons alors calculer, selon la figure IV.6, l'attente des passagers pendant  $\Delta t$  [Aloulou, 99][Rizzi, 88] [Besma, 03] :

$$\text{attente}(\Delta t, S_j^m) = \int_0^{\Delta t} \mu_{S_j^m}(t)(\Delta t - t)dt. \quad (27)$$

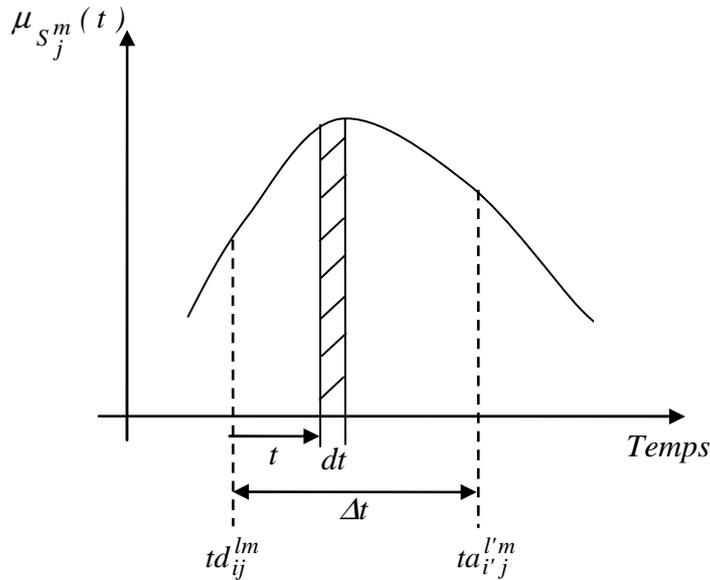


Figure IV.6: Distribution des arrivées de passagers à un arrêt.

La distribution des arrivées des passagers aux arrêts est souvent considérée comme un processus non stationnaire de Poisson [Besma, 03] [Li & al., 91]. Par ailleurs, si nous traitons des intervalles réduits (2 à 4 minutes) ou situés dans des périodes homogènes, nous pouvons considérer un flux constant de passagers,  $\mu_{S_j^m}$ . Par conséquent, le nombre de personnes

arrivant à  $S_j^m$  pendant  $\Delta t$  est de  $\mu_{S_j^m} \times \Delta t$  et l'attente moyenne devient alors le flux multiplié

par  $\frac{\Delta t^2}{2}$  :

$$\text{attente}(\Delta t, S_j^m) = \mu_{S_j^m} \times \frac{\Delta t^2}{2}. \quad (28)$$

Toutefois, dans le cas d'un intervalle plus large n'appartenant pas à une période homogène, il peut être divisé en plusieurs intervalles réduits afin de pouvoir simplifier le calcul de l'attente des voyageurs. En effet, en supposant que  $\Delta t$  est échantillonné en  $IN$  intervalles,

$\Delta t = \bigcup_{I=1..IN} \Delta t_I$ , le nombre de personnes arrivant à  $S_j^m$  dans l'intervalle  $\Delta t_I$  avec un taux

d'arrivée de  $\mu_I$  est de  $\mu_I \times \Delta t_I$ . Leur durée moyenne d'attente est alors :

$$attente(\Delta t_I, S_j^m) = \mu_I \times \Delta t_I \times \left( \frac{\Delta t_I}{2} + \sum_{I'=I+1}^{IN} \Delta t_{I'} \right). \quad (29)$$

De même, la durée moyenne d'attente des voyageurs qui sont arrivés pendant  $\Delta t_I$  est de  $\left( \frac{\Delta t_I}{2} + \sum_{I'=I+1}^{IN} \Delta t_{I'} \right)$ .

Nous pouvons ainsi recalculer l'attente moyenne pendant  $\Delta t$  à l'arrêt  $S_j^m$  :

$$attente(\Delta t, S_j^m) = \sum_{I=1}^{IN} \mu_I \times \Delta t_I \times \left( \frac{\Delta t_I}{2} + \sum_{I'=I+1}^{IN} \Delta t_{I'} \right). \quad (30)$$

### Calcul de l'attente totale

Afin de calculer la charge des véhicules, il est nécessaire d'estimer le nombre de montées et de descentes pour chaque véhicule à chaque station. Le calcul de l'attente des voyageurs à une station n'est plus fondé sur le flux total d'arrivée mais sur les flux selon les destinations des passagers. Ces flux peuvent être déterminés à partir des matrices Origine-Destination et définissent le taux d'arrivée des personnes à un arrêt donné et à destination d'une autre station.

A l'arrêt  $S_j^m$ , supposons que  $V_i^l$  parte à  $td_{ij}^{lm}$  et que l'arrêt  $S_k^r$  se trouve sur sa route.

Notons alors  $Veh^+(V_i^l, S_j^m, S_k^r)$  le premier véhicule qui succède à  $V_i^l$  à  $S_j^m$  et qui passe également par  $S_k^r$  après  $S_j^m$  (mais pas nécessairement immédiatement après).

**Propriété 1** : Si  $V_i^l = Veh^+(V_i^l, S_j^m, S_k^r)$  alors,

- (i)  $a_{ij}^{lm} = a_{ij}^{lm} = a_{ik}^{lr} = a_{ik}^{lr} = 1$
- (ii)  $ta_{ij}^{lm} > td_{ij}^{lm}$
- (iii)  $ta_{ik}^{lr} > td_{ij}^{lm}$  et  $ta_{ik}^{lr} > td_{ij}^{lm}$

$\forall V_i^{l''} \in V^A$  tel que  $V_i^{l''} \neq V_i^l$  et  $V_i^{l''}$  vérifie (i), (ii) et (iii),  $ta_{ij}^{l''m} > td_{ij}^{lm}$

avec  $a_{ij}^{lm}$  est la variable de passage associée au véhicule  $V_i^l$  et à l'arrêt  $S_j^m$ .

$$a_{ij}^{lm} = \begin{cases} 1 & \text{si } V_i^l \text{ passe par } S_j^m \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

Ainsi, dans la propriété 1, le premier point vérifie le passage de  $V_i^l$  et de  $V_i^{l'}$  par  $S_j^m$  et  $S_k^r$ . Le point (ii) illustre l'ordre de passage des deux véhicules à la station  $S_j^m$  pour que  $V_i^{l'}$  succède à  $V_i^l$ . Quant au point (iii), il montre que les véhicules doivent absolument passer par  $S_j^m$  avant  $S_k^r$ . Finalement, le dernier point stipule que  $V_i^{l'}$  est le premier successeur qui vérifie les trois autres points.

Posons  $\mu(\Delta t_I, S_j^m, S_k^r)$  le taux constant d'arrivée pendant  $\Delta t_I$  à la station  $S_j^m$  et à destination de  $S_k^r$ .

**Remarque** : Pour les passagers qui montent à  $S_j^m$  et qui vont effectuer une correspondance à une autre station située sur la route de  $V_i^l$ , nous considérons leur destination immédiate, le nœud de correspondance qui est associé à leur trajet.

En se basant sur l'expression (30) et en ayant  $V_i^{l'} = Veh^+(V_i^l, S_j^m, S_k^r)$ , nous pouvons maintenant formuler l'attente, à l'arrêt  $S_j^m$ , des voyageurs allant à  $S_k^r$  pendant l'intervalle  $\Delta t$  qui sépare le passage successif des deux véhicules,  $V_i^l$  et  $V_i^{l'}$ , sous la forme suivante :

$$\text{attente}(\Delta t, S_j^m, S_k^r) = \sum_{I=1}^{IN} \mu(\Delta t_I, S_j^m, S_k^r) \times \Delta t_I \times \left( \frac{\Delta t_I}{2} + \sum_{I'=I+1}^{IN} \Delta t_{I'} \right) \quad (31)$$

Nous pouvons à ce stade calculer aussi le nombre de personnes,  $N_{i'jk}^{l'mr}$ , qui montent à bord de  $V_i^{l'}$  à  $S_j^m$  et qui ont  $S_k^r$  pour destination. En effet, ce nombre est égal à celui des personnes qui attendent  $V_i^{l'}$  pendant l'intervalle  $\Delta t$ .

$$N_{i'jk}^{l'mr} = \sum_{I=1}^{IN} \mu(\Delta t_I, S_j^m, S_k^r) \times \Delta t_I. \quad (32)$$

Avant de calculer l'attente totale, nous supposons que pour chaque véhicule  $V_i^l$  passant par  $S_j^m$ , l'expression  $S_k^r > S_j^m$  représente les arrêts  $S_k^r \in S$  inclus dans sa route après  $S_j^m$ . La

durée de l'attente de tous les passagers à  $S_j^m$  est alors la somme des attentes pour tous les véhicules  $V_i^l$  qui y passent ( $a_{ij}^{lm} = 1$ ), comme décrit ci-dessous :

$$\text{attente}(S_j^m) = \sum_{V_i^l \in V^H} (a_{ij}^{lm} \times \sum_{S_k^r > S_j^m} \text{attente}(ta_{ij}^{lm} - td_{ij}^{lm}, S_j^m, S_k^r)). \quad (33)$$

avec  $\forall V_i^l \in V^H$ ,  $V_i^l = Veh^+(V_i^l, S_j^m, S_k^r)$ .

Finalement, puisque le critère de régularité est relatif à l'attente totale AT des passagers aux arrêts dans l'horizon de la régulation, cette dernière sera formulée alors dans (34a) et (34b) en sommant les temps d'attente aux différentes stations concernées.

$$AT = \sum_{S_j^m \in S^H} \text{attente}(S_j^m) \quad (34a)$$

$$AT = \sum_{S_j^m \in S^H} \sum_{V_i^l \in V^H} (a_{ij}^{lm} \times \sum_{S_k^r > S_j^m} \text{attente}(ta_{ij}^{lm} - td_{ij}^{lm}, S_j^m, S_k^r)) \quad (34b)$$

avec  $\forall V_i^l \in V^H$ ,  $V_i^l = Veh^+(V_i^l, S_j^m, S_k^r)$ .

#### IV.4.2.2 Critère de correspondance

Le critère de correspondance est associé à la durée des transferts entre les véhicules à un pôle d'échange. Il s'agit alors de calculer la durée des correspondances dans la zone perturbée.

Afin d'identifier l'occurrence des correspondances, nous définissons une variable  $y_{ii'j}^{ll'm}$  qui est égale à 1 si une correspondance est possible de  $V_i^l$  à  $V_{i'}^{l'}$  à la station  $S_j^m$  et 0 sinon.

Posons  $\omega_{ii'j}^{ll'm}$  le nombre de personnes en transfert de  $V_i^l$  à  $V_{i'}^{l'}$  à la station  $S_j^m$ , nous pouvons supposer que ce nombre est proportionnel à celui des passagers qui descendent de  $V_i^l$  à l'arrêt  $S_j^m$  avec un taux égal à  $\rho_{ii'j}^{ll'm}$ .

$$\omega_{ii'j}^{ll'm} = \rho_{ii'j}^{ll'm} \times Ndesc_{ij}^{lm} \quad (35)$$

Le calcul du nombre de personnes descendant de  $V_i^l$  à  $S_j^m$ ,  $Ndesc_{ij}^{lm}$ , est présenté dans la section suivante.

Ainsi, nous déduisons la durée totale des transferts,  $TT$ , qui est sous la forme d'une somme des durées des correspondances entre les différents véhicules aux arrêts concernés du réseau. La durée de transfert de  $V_i^l$  à  $V_{i'}^{l'}$  est égale à  $td_{i'j}^{l'm} - ta_{ij}^{lm}$ , d'où :

$$TT = \sum_{V_i^l \in V^H} \sum_{V_{i'}^{l'} \in V^H} \sum_{S_j^m \in S^H} y_{i'j}^{l'm} \times \omega_{i'j}^{l'm} \times (td_{i'j}^{l'm} - ta_{ij}^{lm}). \quad (36)$$

#### IV.4.2.3 Critère de ponctualité

Le critère de la ponctualité est associé au respect des horaires de passage et donc des durées de parcours. Il s'agit d'optimiser la durée totale des trajets à bord des différents véhicules selon les charges de ces derniers (nombre de personnes). Pour cela, nous calculons tout d'abord le nombre de personnes qui montent et qui descendent de chaque véhicule à chaque station.

##### Calcul du nombre de passagers montant

Pour  $V_i^l \in V^H$  (les véhicules de la zone perturbée) et  $S_j^m \in S^H$  (les stations de la zone perturbée), le nombre de personnes qui montent à bord de ce véhicule à cet arrêt est égal à la somme des nombres de personnes qui l'attendent et ceux qui ont pour destination une des stations qui se trouvent sur sa route après  $S_j^m$ . Il faut aussi considérer les personnes qui, éventuellement, sont descendues d'un autre véhicule  $V_{i'}^{l'}$  et qui effectuent une correspondance vers  $V_i^l$  au même arrêt. D'où :

$$N_{mont_{ij}}^{lm} = \sum_{S_k^r > S_j^m} N_{ijk}^{lmr} + \sum_{V_{i'}^{l'} \in V^H} y_{i'j}^{l'm} \times \omega_{i'j}^{l'm}. \quad (37)$$

avec :

$N_{ijk}^{lmr}$  : Le nombre de personnes montant à bord du véhicule allant de  $S_j^m$  à  $S_k^r$ , formulé dans (32).

$\omega_{i'j}^{l'm}$  : Le nombre de personnes en correspondance de  $V_{i'}^{l'}$  à  $V_i^l$  présenté dans (35).

##### Calcul du nombre de passagers descendant

De même, le nombre de personnes qui descendent de  $V_i^l$  à l'arrêt  $S_j^m$  est égal à la somme des nombres de personnes qui sont venues à pied et ceux qui sont montées à bord du véhicule et qui avaient pour destination  $S_j^m$ . Aussi, il faut compter les personnes qui ont effectué une correspondance de  $V_i^{l'}$  vers  $V_i^l$  à une station  $S_k^r$  avant  $S_j^m$  et dont quelques unes descendent à  $S_j^m$ . Le nombre de ces voyageurs est supposé proportionnel à  $\omega_{i'ik}^{l'lr}$  avec un taux  $\lambda_{i'ik}^{l'lr}$ .

La formule suivante montre alors le nombre total des passagers qui descendent de  $V_i^l$  à  $S_j^m$ :

$$N_{desc_{ij}}^{lm} = \sum_{S_k^r < S_j^m} (N_{ikj}^{lrm} + \sum_{V_i^{l'} \in V^H} y_{i'ik}^{l'lr} \times \lambda_{i'ik}^{l'lr} \times \omega_{i'ik}^{l'lr}). \quad (38)$$

### Calcul de la charge

Nous pouvons maintenant formuler la charge du véhicule  $V_i^l$  au départ de  $S_j^m$  en ajoutant à sa charge au départ de l'arrêt précédent,  $Arrêt\_Prec(V_i^l, S_j^m)$ , le nombre de personnes qui montent à  $S_j^m$  et en ôtant celui des passagers qui en descendent. En notant  $S_j^{m'} = Arrêt\_Prec(V_i^l, S_j^m)$ , le dernier arrêt desservi par  $V_i^l$  avant  $S_j^m$ , la charge de  $V_i^l$  au départ de  $S_j^m$  s'écrit sous la forme suivante :

$$C_{ij}^{lm} = C_{ij}^{lm'} - N_{desc_{ij}}^{lm} + N_{mont_{ij}}^{lm}. \quad (39)$$

### Calcul de la durée-passager totale de parcours sur $H$ (horizon de régulation)

Finalement, nous calculons le total des durées-passagers des trajets effectués à bord des véhicules de  $V^H$  en multipliant, pour chaque véhicule, les charges par les durées des tronçons inter-stations. En prenant l'expression suivante  $S_j^{m'} = Arrêt\_Prec(V_i^l, S_j^m)$  pour  $V_i^l \in V^H$  et  $S_j^m \in S^H$ , nous avons la durée totale des Routes (RT) suivante :

$$RT = \sum_{V_i^l \in V^H} \sum_{S_j^m \in S^H} a_{ij}^{lm} \times C_{ij'}^{lm'} \times (td_{ij}^{lm} - td_{ij'}^{lm'}) \quad (40)$$

### IV.4.3 Fonction objectif

Dans le but de bien planifier les horaires, nous allons utiliser une fonction relative aux critères de régulation qui doivent être optimisés ; la régularité, la correspondance et la ponctualité. Cette fonction doit évaluer l'amélioration résultante de la régulation par rapport à l'état perturbé. Il s'agit alors de maximiser simultanément, selon la nature et l'importance de la perturbation, trois fonctions liées aux critères en question :

- $Cr_1$  pour la régularité,  $Cr_1 = AT_0 - AT$  ;
- $Cr_2$  pour la correspondance,  $Cr_2 = TT_0 - TT$  ;
- $Cr_3$  pour la ponctualité,  $Cr_3 = RT_0 - RT$ .

Nous rappelons que dans l'état perturbé,  $AT_0$ ,  $TT_0$  et  $RT_0$  correspondent respectivement à l'attente totale, la durée totale des correspondances et la durée totale des trajets, alors que  $AT$ ,  $TT$  et  $RT$  correspondent aux mêmes valeurs mais dans l'état régulé du trafic. Les fonctions sont exprimées en passagers-temps puisque toutes les durées sont pondérées par le nombre de passagers.

L'optimisation qui constitue l'objet de l'algorithme à colonie de fourmis devient ainsi multicritère, ce qui induit une complexité additionnelle au problème. En effet, il est nécessaire de concilier les trois critères qui peuvent être contradictoires. Par exemple, en tenant compte du critère de régularité, l'algorithme tend à équilibrer les intervalles entre les passages des véhicules, ce qui nécessite des décisions de retardement. Ainsi, les parcours des véhicules seront rallongés, ce qui défavorise le critère de ponctualité.

Il est toutefois possible de transformer un problème en monocritère par agrégation des fonctions à optimiser en une seule fonction objective d'une façon linéaire. En effet, nous pouvons attribuer à chaque critère un poids afin de représenter son importance relative dans la recherche des solutions. Ainsi, supposant que  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  et  $\alpha_3$  sont les poids des critères de régularité, correspondance et ponctualité, nous pouvons maximiser :

$$f = \sum_{c=1}^{c=3} \alpha_c Cr_c \quad (41)$$

avec  $\sum_1^3 \alpha_c = 1$ .

Les poids des critères sont déterminés selon les préférences du régulateur ou la nature de la perturbation.

#### IV.4.4 Présentation des solutions

Nous avons représenté l'espace de recherche par un graphe de déplacement (figure IV.7), qui peut être interprété par les fourmis dans un algorithme ACF. En fait, nous devons présenter les décisions à prendre sous la forme d'arcs de transition. Au départ, nous avons l'ensemble des stations et des itinéraires de la zone perturbée. Pour le premier cas des perturbations sans reconfiguration, nous considérons la même configuration spatiale. Alors que pour le cas de la régulation avec reconfiguration nous considérons la configuration spatiale résultante du premier algorithme ACFRS. Nous ajoutons à ce graphe, pour chaque inter-station (itinéraire choisi entre deux stations successives), un ensemble d'arcs fictifs qui n'existe pas réellement mais que nous considérons, dans notre cas, comme des temps de retard à appliquer sur ce chemin pour optimiser certains critères.

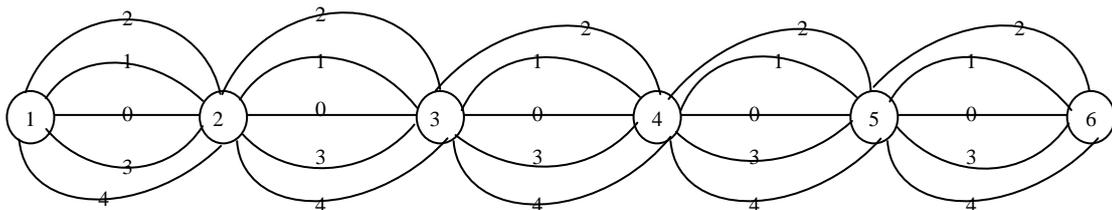


Figure IV.7 : Graphe des décisions de la régulation horaire.

Par exemple, nous disposons sur la figure IV.7, d'une ligne de transport de 6 stations, à laquelle nous ajoutons 5 arcs entre chaque couple de stations successives. Le premier arc présente l'arc réel avec 0 minute de retard et les autres présentent 1, 2, 3 ou 4 minutes de retard qui peuvent être considérées comme étant un retard d'arrêt dans l'une des deux stations ou un retard en inter-station.

#### IV.4.5 Algorithme ACFRH

En utilisant la méthode de génération de solutions que nous allons décrire dans le paragraphe IV.4.6, chaque fourmi se déplace d'une station à une autre, ajoute cet arc à son chemin, jusqu'à l'arrivée au terminus, puis recommence de la station de départ pour un nouveau véhicule jusqu'à la fin de tous les véhicules de la zone perturbée. Ayant choisit la décision (les temps de retard) à appliquer pour chaque véhicule, nous construisons le nouveau tableau de marche régulé et nous calculons les trois critères : la régularité, la ponctualité et la correspondance et par la suite la fonction objectif que nous allons comparer avec celles trouvées par les fourmis

précédentes et nous gardons la solution maximale. Lorsque toutes les fourmis terminent tous les services nous mettons à jour les traces de phéromone sur chaque arc. La structure de l'algorithme est présentée par la figure IV.8.

La condition d'arrêt (test d'arrêt) est vérifiée si la meilleure solution trouvée par les fourmis est inchangée depuis un nombre d'itération  $I1$  ou bien si un nombre d'itération maximal  $I2$  est atteint. C'est un test qui permet de vérifier la convergence vers un optimum.

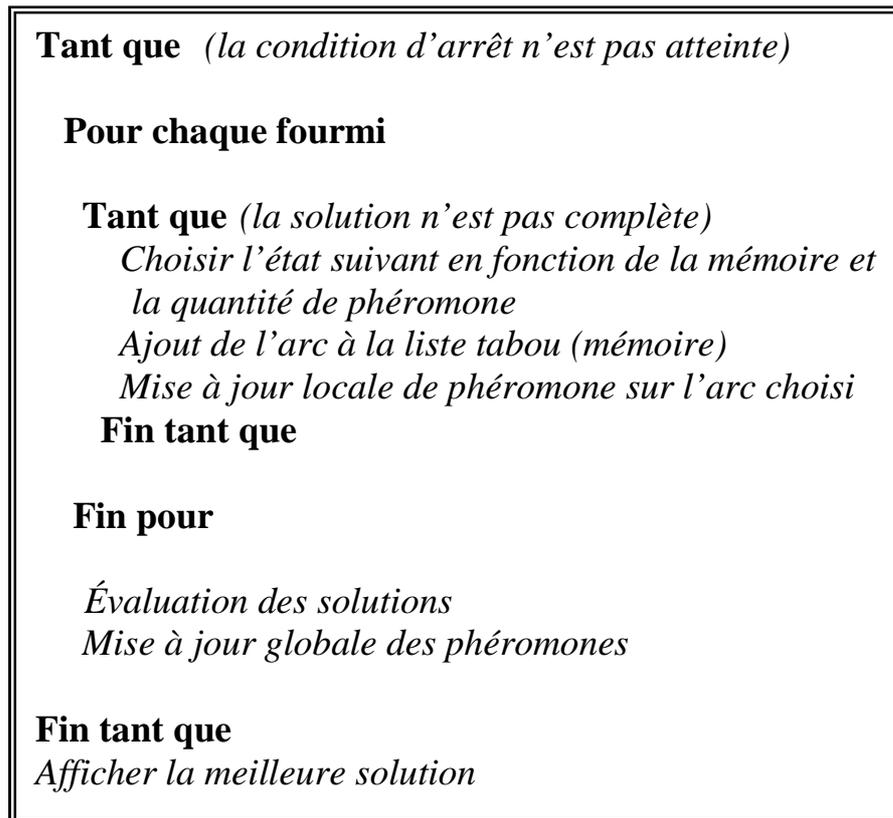


Figure IV.8: Algorithme à colonie de fourmis pour la régulation horaire ACFRH.

#### IV.4.6 Génération d'une nouvelle solution

A partir d'une station de départ, chaque fourmi choisit un arc de déplacement, d'une manière probabiliste, jusqu'à l'arrivée au terminus. Elle choisit un arc  $i$  soit d'une façon aveugle soit en tenant compte des traces de phéromone déposés sur l'arc.

Avec la probabilité  $P$ , une fourmi  $f$  utilise la première façon (aveugle) qui consiste à sélectionner un arc  $i$  avec la probabilité  $P_1$  décrite par la formule (42). Dans ce cas, elle donne la même chance d'être choisis aux  $k$  arcs de l'ensemble  $\Omega_s$ .

$$P_1 = \begin{cases} \frac{1}{k} & \text{si } i \in \Omega_s \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (42)$$

Avec la probabilité  $(1-P)$ , la fourmi choisit l'arc  $i$  d'une manière plus intelligente que la première, en tenant compte des traces de phéromone  $\tau_i(t)$ , selon la probabilité  $P_2$  de la formule (43).

$$P_2 = \begin{cases} \frac{[\tau_i(t)]^\alpha}{\sum_{j=1}^k [\tau_j(t)]^\alpha} & \text{si } i \in \Omega_s \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (43)$$

Pour explorer l'espace de recherche, nous utilisons une recherche aveugle ; ce qui nous permet d'être moins piégé dans les optimums locaux, alors que la recherche intelligente nous assure la convergence. Nous ne pouvons pas utiliser les critères à optimiser directement dans la formule de la probabilité  $P_2$  puisque ils seront calculés après avoir terminé un cycle d'itération complet. Ces critères sont bien pris en compte dans la mise à jour de la quantité de phéromone.

#### IV.4.7 Mise à jour de la quantité de phéromone

Par analogie avec la nature et de la même façon que pour l'algorithme ACFRS, chaque fourmi  $f$  dépose une quantité de phéromone sur chaque arc qu'elle a sélectionné. La mise à jour renforce les arcs choisis en tenant compte de l'évaporation. L'équation 44 comporte un terme de persistance  $\rho$  et un terme de renforcement  $\Delta\tau^f$  ; ce dernier représentant la quantité ajoutée par une fourmi  $f$ .

$$\tau_i(t+1) = \rho \tau_i(t) + \sum_f \Delta\tau^f \quad (44)$$

avec  $\Delta\tau^f = \alpha \cdot f^f$  où  $f^f$  est la fonction d'évaluation de la solution proposée par la fourmi  $f$  décrite dans le paragraphe IV.4.3 Ce qui permet de bien renforcer les chemins prometteurs par rapport aux autres.

#### IV.4.8 Recherche locale dynamique

Pour échapper aux optima locaux, les algorithmes heuristiques ont montré une efficacité importante. Mais pour les problèmes compliqués et de grands espaces de recherche, les difficultés persistent encore. Nous avons proposé dans le premier algorithme ACFRS l'idée de la recherche d'une deuxième solution. Dans cet algorithme, nous avons constaté, dans les premiers tests d'exécution, que les décisions différentes de zéro (les retards à appliquer) sont toujours localisées dans une partie de la zone spatio-temporelle perturbée. Nous avons pensé alors à la recherche locale, l'une des idées qui a été mise en œuvre avec les algorithmes à colonie de fourmis [Lacomme & al., 03] ainsi que d'autres heuristiques tels que les algorithmes génétiques [Lacomme & al., 01] et qui a donné des résultats considérables. Il s'agit d'une limitation de l'espace de recherche à une zone où se trouvent les premières solutions. Mais nous pouvons être piégés dans une zone d'optimums locaux et nous aurons une mauvaise qualité des solutions.

Dans notre algorithme de régulation horaire ACFRH [Zidi & al\_e, 06], nous avons utilisé une nouvelle idée de recherche locale dynamique [Zidi & al\_f, 06]. Il s'agit de restreindre l'espace de recherche à l'aide des fenêtres spatio-temporelles de dimension croissante en fonction des itérations. Nous commençons l'exploration dans une zone relativement petite de l'espace et nous cherchons des décisions qui peuvent être différentes de zéro sur cette zone. Nous n'appliquons que la décision zéro minute de retard sur le reste de l'espace de recherche. Après un certain nombre d'itérations, nous augmentons les dimensions spatio-temporelles de cette zone et nous explorons de nouveau l'espace de recherche pour des nouvelles solutions. Nous comparons les résultats et nous continuons à augmenter la zone de recherche locale jusqu'à avoir une dimension égale à l'espace complet.

Dans la structure de l'algorithme ACFRH de la figure IV.9, nous avons ajouté, par rapport à la première structure (figure VI.8), le processus de la recherche locale avec l'augmentation de la zone. En fait, nous essayons de chercher des décisions optimales comprises entre les stations  $s_1$  et  $s_2$  (limitation spatiale) et les temps  $t_1$  et  $t_2$  du tableau de marche (limitation temporelle). Nous affectons la décision zéro à l'extérieur de cette zone. Après  $n$  itérations, nous reculons d'une station pour  $s_1$  et nous ajoutons une station du côté de  $s_2$  pour augmenter la zone spatiale de la recherche locale et nous refaisons la même chose pour la fenêtre temporelle. Sans initialiser les traces de phéromone, les solutions de la première zone seront plus renforcées que les autres et par la suite elles auront plus de chance d'être choisies.

La recherche locale nous permet de gagner du temps d'exécution et d'exploitation de l'espace de recherche. Ce paramètre temps est très important pour la régulation en temps-réel, cependant l'idée de la dimension dynamique de la zone nous permet plus d'exploration que l'idée de la recherche locale classique.

```

Tant que (la condition d'arrêt n'est pas atteinte)
  Pour chaque fourmi
    Tant que (la solution n'est pas complète)
      Si ((s<s1|| s>s2) && (t<t1||t>t2)
        Retard =0;
      Fin si
      Si non
        Choisir l'état suivant en fonction de la mémoire et
        la quantité de phéromone
        Ajout de l'arc à la liste tabou (mémoire)
        Mise à jour locale de phéromone sur l'arc choisi
      Fin si non
    Fin tant que
  Fin pour
  Évaluation des solutions
  Mise à jour globale des phéromones
  Après un nombre d'itérations:
  S1--;
  T1--;
  S2++;
  T2++;
  Fin tant que
  Afficher la meilleure solution

```

Figure IV.9: ACFRH avec la recherche locale dynamique.

## IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons commencé par une étude bibliographique des algorithmes à colonie de fourmis, une approche heuristique récente qui a connu beaucoup d'évolution depuis son apparition au début des années 90. Ces algorithmes ont été utilisés dans diverses applications, notamment, le voyageur de commerce et la tournée de véhicules.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée au problème de reconfiguration spatiale dans le cas de perturbations simultanés et complexes. Dans ce cadre, nous avons proposé un premier algorithme à colonie de fourmis pour la reconfiguration spatiale (ACFRS). Cette approche heuristique de recherche d'itinéraire dans un réseau de transport multimodal utilise une fonction d'agrégation construite à partir du temps de parcours, de la distance de parcours et du nombre de passagers servis. Dans l'algorithme ACFRS, nous avons appliqué une nouvelle idée

pour échapper aux optimums locaux. Il s'agit de forcer la sortie des fourmis de la première solution trouvée en diminuant sa quantité de phéromone permettant ainsi plus d'exploration.

Dans la troisième partie de ce chapitre, nous avons présenté une deuxième approche qui s'intéresse au problème de réaffectation des horaires aux véhicules. Il s'agit de l'algorithme à colonie de fourmis pour la régulation horaire (ACFRH) avec l'optimisation de la fonction d'agrégation des trois critères : la régularité, la ponctualité et la correspondance.

L'espace de recherche est très grand et les optima locaux nombreux. Nous avons procédé à la recherche locale pour minimiser la complexité et gagner en temps de calcul. Mais pour assurer une meilleure exploration de l'espace de recherche, nous avons procédé à une recherche par des fenêtres spatio-temporelles de dimension croissante au cours des itérations. C'est ce que nous avons appelé la recherche locale dynamique. Cet algorithme ACFRH peut être appliqué à toutes les perturbations avec ou sans la reconfiguration spatiale.

## **Chapitre V: Applications et résultats**

## V.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous présentons les résultats des différentes applications du SARR. Nous réalisons des simulations pour les trois algorithmes que nous avons présentés dans les chapitres précédents. Nous commençons par le premier module de classification SVM. Nous présentons les deux phases à savoir l'apprentissage et le test avec des exemples réels de perturbations. Puis, nous exposons les résultats des deux approches à colonie de fourmis ACFRS (Algorithme à Colonie de Fourmis pour la Reconfiguration Spatiale) et ACFRH (Algorithme à Colonie de Fourmis pour la Régulation Horaire). Nous décrivons plusieurs scénarii de perturbations qui affectent le trafic au sein d'un réseau multimodal. Ces perturbations seront résolues par notre SARR et nous proposons les résultats sous forme des itinéraires et des stations pour la reconfiguration et des tableaux de marche dans le cas de régulation horaire.

Pour valider le système d'aide à la décision que nous avons conçu, nous présentons des comparaisons avec d'autres approches utilisées dans le même cadre de la régulation des réseaux de transport multimodal.

## V.2 Outil informatique utilisé

Pour développer les algorithmes, nous avons utilisé le langage de programmation orienté objet JAVA. Ce langage reprend en grande partie la syntaxe du langage C++, très utilisé par les informaticiens. Néanmoins, Java a été épuré des concepts les plus subtils et à la fois les plus déroutants du C++, tels que l'héritage multiple. Les concepteurs ont privilégié l'approche orientée objet, de sorte qu'en Java, tout est objet à l'exception des types primitifs (nombres entiers, nombres à virgule flottante, etc.).

Notre choix est basé sur les caractéristiques de ce langage. Les applications Java peuvent être exécutées sur tous les systèmes d'exploitation pour lesquels a été développée une plate-forme Java, dont le nom technique est JRE (Java Runtime Environment - Environnement d'exécution Java). Cette dernière est constituée d'une Machine Virtuelle Java JVM (Java Virtual Machine), le programme qui interprète le code Java et le convertit en code natif. Mais le JRE est surtout constitué d'une bibliothèque standard, à partir de laquelle doivent être développés tous les programmes en Java. C'est la garantie de portabilité qui a fait la réussite de Java dans les architectures client-serveur, en facilitant la migration entre serveurs, très difficile pour les gros systèmes.

La seconde caractéristique du langage, l'indépendance vis-à-vis de la plate-forme, signifie que les programmes écrits en Java peuvent fonctionner sur divers types de matériel informatique

sans réécriture, selon le slogan « *write once, run anywhere* » (écrire le programme une seule fois, et l'exécuter sur tout ordinateur). La portabilité du langage Java est obtenue, en compilant le code source d'un programme dans un pseudo-code intermédiaire, (appelé "*bytecode Java*", des instructions machine standardisées et destinées à un processeur virtuel). Le code est par la suite exécuté par une implémentation de cette machine virtuelle (JVM), un programme écrit en code natif sur le matériel cible qui traduit le pseudo-code Java en code utilisable pour le matériel concerné. De plus, des bibliothèques sont offertes pour fournir l'accès à des fonctionnalités propres à la machine cible, comme le graphisme ou le réseau, d'une manière unifiée. Le langage Java offre aussi le support des programmes avec plusieurs processus légers (*threads*).

## V.3 Module de classification

### V.3.1 Apprentissage

Nous avons pu préparer à partir des documents et des rapports fournis par les instituts de recherche dans le transport tel que l'INRETS et les entreprises comme RATP ou SEMURVAL, 201 vecteurs perturbation dont nous connaissons les décisions de régulation. Nous avons utilisé 1/3 de ces vecteurs (67) pour l'apprentissage et le reste (134 vecteurs) pour les tests. Les décisions de régulation ou les classes de ces vecteurs sont données par des experts de régulation dans les entreprises citées ci-dessus.

Comme nous l'avons présenté dans le chapitre 3, nous avons quatre niveaux hiérarchiques de classification. Dans la phase d'apprentissage nous devons calculer toutes les fonctions séparatrices des quatre niveaux (voir figure III.5). Nous avons deux paramètres à déterminer pour notre algorithme à savoir  $\sigma$  et  $C$ . le choix de ces paramètres est très important. Il permet de choisir un ensemble  $\psi = \{F_w\}$  de fonctions bien adaptées (voir chapitre 3 paragraphe 3.2.2). La constante  $C$  est une pondération qui nous permet d'autoriser quelques données (bruit) hors du contour pour une marge souple [Chen & al., 2005]. Elle est inversement proportionnelle à un paramètre,  $\nu \in [0,1]$  qui contrôle la fraction des données autorisées en dehors du contour. Dans le cas de données non séparables, il faut utiliser des méthodes empiriques pendant les tests pour faire le meilleur choix. Nous présentons dans le tableau suivant le nombre des vecteurs supports pour différentes valeurs de  $\sigma$  pour une valeur de  $C = 10000$ . Les meilleurs résultats de l'apprentissage ont été trouvés pour  $\sigma = 10$ .

Tableau V.1: nombre des vecteurs supports pour différents valeur de  $\sigma$ .

$\sigma$	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>15</b>	<b>20</b>
Nombre des SV dans le niveau 1	49/67	28	25	<b>25</b>	26	26	28
Nombre des SV dans le niveau 2	22/35	16	16	<b>16</b>	16	16	16
	22/32	18	18	<b>17</b>	17	17	17
Nombre des SV dans le niveau 3	11/16	6	6	<b>6</b>	6	6	6
	14/19	8	8	<b>7</b>	7	7	7
Nombre des SV dans le niveau 4	7/8	6	7	<b>7</b>	7	7	7

Pour cette phase, nous avons utilisé le langage AMPL Avec deux solveurs, à savoir LOQO et MINOS (voir annexe). Dans le premier niveau nous avons une fonction à déterminer pour une classification binaire dont chacun des deux classes contient 8 décisions de régulation. Nous avons les 67 vecteurs pour ce niveau. Nous devons donc calculer 67 coefficients de Lagrange ( $\alpha_i$ ). Nous avons trouvé les mêmes valeurs avec les deux solveurs (LOQO et MINOS) puis nous avons calculé b. Nous avons trouvé aussi la même valeur de b pour des calculs avec différents vecteurs de support. Dans le deuxième niveau, nous avons préparé les deux fonctions qui nous permettent la classification en quatre classes de quatre décisions chacune. De la même façon, nous avons calculé les coefficients de Lagrange et b, dans les deux autres niveaux pour quatre fonctions dans le premier (troisième niveau) et huit fonctions dans le dernier (quatrième niveau), afin d'arriver à 16 classes d'une décision de régulation chacune.

### V.3.2 Quelques exemples de perturbations

Dans cette partie nous allons présenter quelques exemples de perturbation avec la décision proposée par notre SARR à travers son premier module de régulation SVM.

Exemple1 : Un bus a eu un incident technique à 12h :30. Il a 10 minutes de retard dans un terminus d'une ligne de fréquence de 12 minutes. L'algorithme SVM propose alors le sautage par un véhicule disponible (rentrant) pour assurer l'enlèvement de la charge en attente du véhicule en panne.

Exemple 2 : un bus est tombé en panne à 16h dans le terminus d'une ligne de fréquence de 10 minutes. Son temps de retard est estimé à 4 minutes. Notre algorithme propose le distancement. Il s'agit d'une permutation des départs entre le véhicule perturbé et celui qui le suit après 10 minutes. Ce qui laisse du temps pour réparer tout en gardant la même qualité de service.

Exemple 3 : à 15 h (heure normale) et dans une période normale de la semaine, un bus a eu une perturbation dans une station de la ligne avec un retard estimé à 10 minutes. L'algorithme propose d'appliquer la dérive pour assurer la régularité. Il s'agit d'avancer le départ du véhicule suivant. Par contre, s'il s'agit d'une même perturbation mais dans un terminus. L'algorithme propose de supprimer le départ et appliquer la retombe. La retombe consiste à décaler les horaires de départ des autres voitures au terminus pour rééquilibrer les intervalles entre les départs.

Exemple 4 : l'algorithme propose l'insertion d'un départ pour une perturbation d'un véhicule en heure de pointe dans un terminus avec une charge importante en attente dans la direction des véhicules perturbés.

Exemple 5 : afin de rejoindre un arrêt choisi par le régulateur et assurer certains critères comme la régularité et la ponctualité, notre SARR propose le parcours haut le pied à un véhicule vide affecté par une perturbation dans une période normale. Ce qui permet de rattraper le retard. Mais si le véhicule n'est pas vide, il faut assurer la descente des passagers. Alors le SARR propose le film blanc.

La figure V.1 présente un exemple de résultats d'exécution de notre algorithme. Il propose une hiérarchisation de quatre groupes de solutions (A, B, C et D). La solution A est une décision de régulation unique (il s'agit de la reconfiguration dans ce cas). Elle est considérée comme la décision la plus appropriée. Mais le régulateur peut monter aux autres niveaux (B, C ou D) et choisir une manœuvre parmi les huit (solution D), les quatre (solution C) ou les deux (solution B) décisions. Dans tous ces cas nous avons assisté le régulateur en réduisant le nombre de décisions sans oublier le nombre de paramètres et de critères gérés pour arriver à une telle solution.

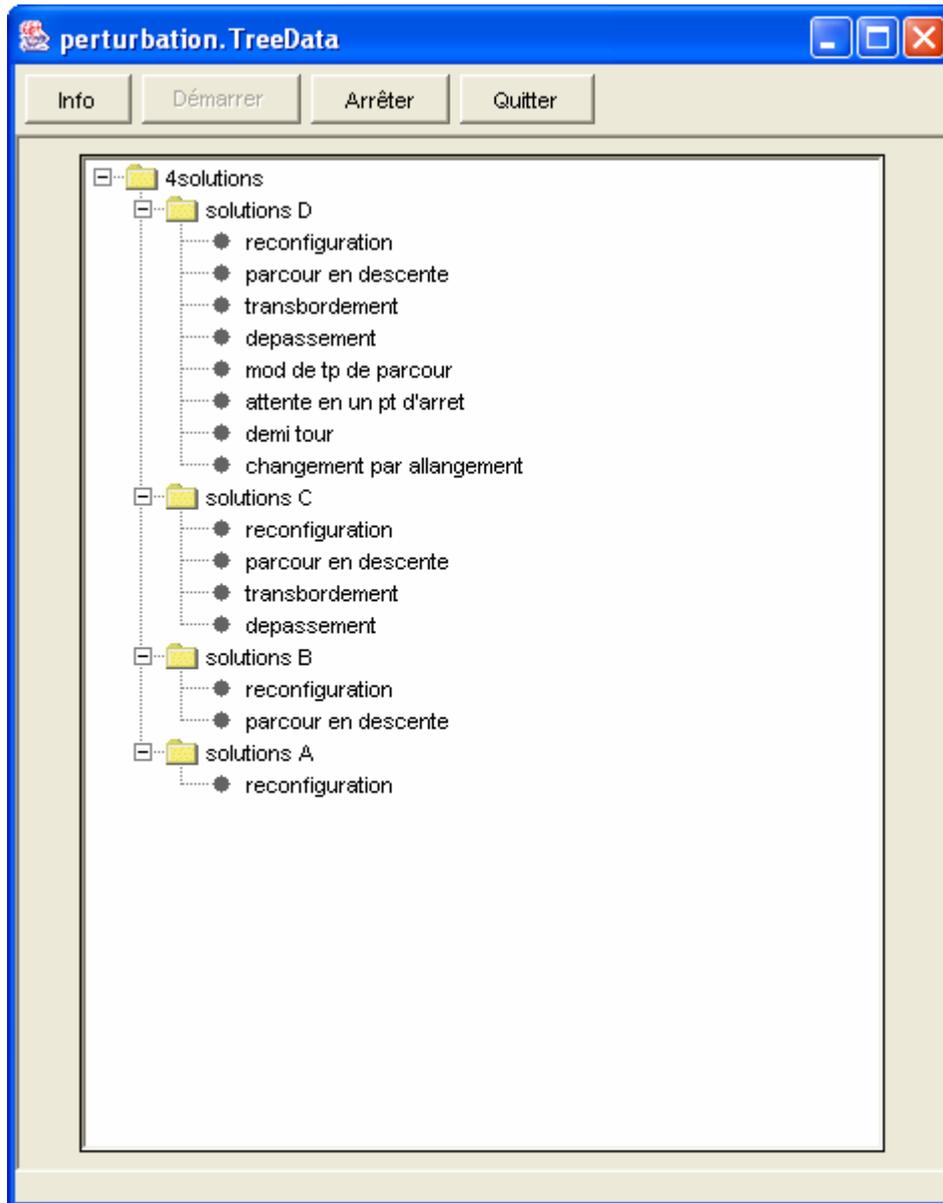


Figure V.1: Exemple d'exécution de l'algorithme.

### V.3.3 Test

Nous avons eu 5.3% d'erreurs partagées sur les niveaux d'hierarchisation ce qui peut expliquer l'efficacité de ce type de classification (SVM) pour un tel système d'aide à la décision puisque nous pouvons proposer au régulateur les 8 décisions les plus appropriées (niveau1) avec uniquement 3% d'erreur et nous pouvons aussi proposer 4 solutions (niveau 2) avec 3.8% d'erreur. Dans les vecteurs qui ont été bien classés (94.7%), il y a plus de 40% au delà des supports vecteurs c'est à dire entre les supports vecteurs et l'hyperplan de séparation. Ce qui montre la complexité de séparation entre les différentes classes. En fait, ceci peut être expliqué par la distribution des données dans l'espace de recherche. Les vecteurs des différentes classes

sont suffisamment proches et la séparation spatiale entre les classes n'est pas évidente. Le tableau V.2 résume les différents résultats obtenus par l'algorithme de classification SVM. Cette technique semble être bien adaptée à notre problématique d'aide à la régulation des réseaux de transport multimodal en temps réel. En effet, elle est rapide et a un taux d'erreur faible. Les résultats proposés sont sous la forme d'une hiérarchisation dont l'erreur est partagée sur les différents niveaux.

Tableau V.2: Résultat de l'algorithme de classification SVM.

	201	67	Données d'apprentissage			1/3
		134	Données de test			2/3
Données classées	127 = 94.7%	73	Non-SV			54.5%
		54	O-SV Outlayer SV (entre les supports vecteurs et l'hyperplan séparateur)	13	Niveau 1	9.7%
				12	Niveau 2	8.9%
				12	Niveau 3	8.9%
				17	Niveau 4	12.7%
Erreur	7 = 5.3%		4	Niveau 1	3%	
			1	Niveau 2	0.8%	
			2	Niveau 3	1.5%	

Parmi les décisions proposées par ce module de classification, il y a la reconfiguration. Il nous faut pour ce type de décision un algorithme d'optimisation de chemin. C'est le rôle de l'ACFRS. Les résultats de cette approche font l'objet de la partie suivante.

## V.4 Application d'ACFRS

### V.4.1 Paramètres de l'algorithme

Nous avons effectué des tests afin de bien choisir les paramètres  $P$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  et  $\delta$ . Ils ont une grande influence sur la convergence de l'algorithme. Pour commencer nous avons choisi un nombre de fourmis proche du nombre d'arcs du graphe. Ce choix a été utilisé par [Dorigo & al., 98] pour le problème du voyageur de commerce. Nous avons fixé aussi  $q$  à **0.9**. Après quelques tests sur des graphes simples, nous avons remarqué que la convergence est atteinte pour des nombres d'itérations maximal  $I_{\max} = 10$ ,  $I_{1\max} = 100$  et  $I_{2\max} = 15$ .

Nous avons pris le cas de deux lignes de bus, 5 et 7 du réseau de transport de Lille, qui se croisent en un nœud de correspondance (station 5) (figure V.2). Nous avons considéré des perturbations différentes, imprévues qui affectent à chaque fois la ligne 7 provoquant un ralentissement de la circulation. Nous avons accordé une certaine flexibilité aux déplacements des véhicules de la ligne 7 (figure V.3) afin qu'on puisse appliquer l'algorithme de reconfiguration spatiale (ACFRS).

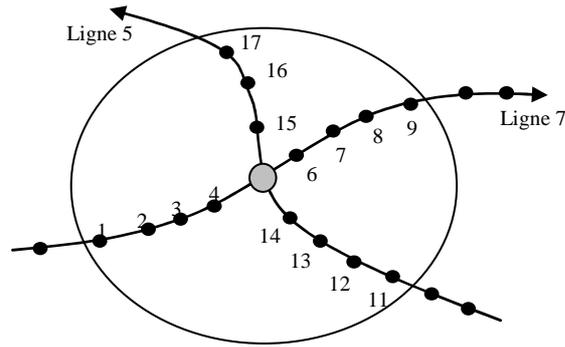


Figure V.2: Représentation des itinéraires théoriques des véhicules des lignes 5 et 7.

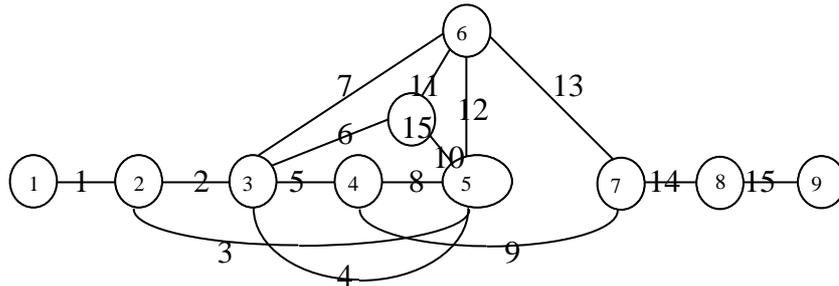


Figure V.3: Exemple de graphe de déplacement pour les véhicules de la ligne 7.

En se basant sur les valeurs utilisées en général, nous avons effectué les tests pour différentes valeurs des paramètres, probabilités et pondérations des critères. Le tableau suivant représente les résultats trouvés pour quelques exemples.

Tableau V.3: Résultats de quelques exemples.

$\alpha = 3 ; \beta = \gamma = \delta = 1 ; P = 0.2$					
perturbation	Borne inf	Nb itérations		solution	Temps en ms
		I2	I1		
1	50,28	3	11 ; 10 ; 40	50,28	125
2	50,96	4	11 ; 10 ; 100 ; 100	50,96	391
3	50,89	4	100 ; 100 ; 100 ; 100	50,89	641
4	50,89	2	100 ; 100	50,96	375
5	50,89	2	100 ; 100	52,38	343
6	52,38	2	100 ; 18	52,38	203
$\alpha = 5 ; \beta = \gamma = \delta = 1 ; P = 0.2$					
1	50,28	3	10 ; 11 ; 100	50,28	187
2	50,96	3	100 ; 100 ; 100	50,96	547
3	50,89	3	100 ; 100 ; 100	50,89	500
4	50,89	2	100 ; 27	50,96	234
5	50,89	2	100 ; 47	50,89	235
6	52,38	2	100 ; 17	52,38	204
$\alpha = 6 ; \beta = \gamma = \delta = 3 ; P = 0.2$					
1	50,28	3	11 ; 10 ; 100	50,28	484
2	50,96	2	11 ; 100	50,96	375
3	50,89	2	100 ; 100	50,89	703
4	50,89	3	100 ; 100 ; 100	50,96	969
5	50,89	2	100 ; 34	52,38	484
6	52,38	2	100 ; 22	52,38	454
$\alpha = 15 ; \beta = \gamma = \delta = 3 ; P = 0.2$					
1	50,28	3	11 ; 10 ; 14	50,28	125
2	50,96	2	11 ; 100	50,96	359
3	50,89	2	100 ; 100	50,89	672
4	50,89	2	100 ; 25	50,96	406
5	50,89	2	100 ; 23	52,38	438
6	52,38	2	100 ; 19	52,38	422
$\alpha = 15 ; \beta = \gamma = \delta = 1 ; P = 0.4$					
1	50,28	3	11 ; 10 ; 15	50,28	46
2	50,96	12	92 ; 51...	50,96	719
3	50,89	2	100 ; 86	50,89	203
4	50,89	2	100 ; 49	50,89	203
5	50,89	2	11 ; 33	50,89	94
6	52,38	2	100 ; 15	52,38	157
$\alpha = 15 ; \beta = \gamma = 1 ; \delta = 3 ; P = 0.4$					
1	50,28	3	11 ; 39	50,28	94
2	50,96	10	100 ; 18 ...	50,96	1219
3	50,89	2	100 ; 87	50,96	313
4	50,89	2	100 ; 63	50,96	266
5	50,89	2	100 ; 100	53,77	313
6	52,38	2	100 ; 53	52,38	250

## V.4.2 Applications et résultats

### V.4.2.1 Scénario 1

Le premier scénario est celui que nous avons présenté au paragraphe précédent. Il s'agit d'un ensemble de perturbations qui affectent la ligne 7 dont les retards estimés sont importants. Les correspondances avec la ligne 5 au niveau du nœud 5 ne vont pas avoir lieu pour les véhicules perturbés. Ainsi, une reconfiguration spatiale est nécessaire pour proposer à ces véhicules l'itinéraire adéquat entre la station 1 et la station 10 tout en « optimisant » les trois critères : le temps, la distance de parcours et le nombre de passagers servis.

Les résultats sont présentés dans le tableau V.3. Nous avons pris 6 scénarii différents sur le même graphe (des incidents et des conditions différents sur la même zone). À chaque fois nous considérons une perturbation sur l'un des arcs qui empêche d'arriver au nœud de correspondance. Puis on lance l'algorithme ACFRS. L'itinéraire proposé varie suivant le nombre de passagers dans les stations. Par exemple, pour une perturbation qui affecte l'arc 5, s'il n'y a pas des passagers à servir dans la station 3, l'algorithme ACFRS propose l'itinéraire 1-2-5-6-7-8-9. Les véhicules perturbés vont donc emprunter les arcs 1, 3, 12, 13, 14, et 15. Cet itinéraire est rapide et court et permet ainsi l'absorption du retard provoqué par l'incident. Mais, s'il y a un nombre important de passagers en attente à la station 3 ou bien qui descendront à cette station, l'algorithme propose plutôt 1-2-3-5-6-7-8-9.

À partir des nombres d'itérations  $I_2$  et  $I_1$ , on peut vérifier les performances de notre algorithme en terme de convergence et d'exploration de l'espace de recherche. En fait, pour un nombre d'itérations inférieur au nombre maximal, la convergence est bien atteinte. Et en comparant la solution avec la borne inférieure, on peut constater que pour  $\alpha = 15$  ;  $\beta = \gamma = \delta = 1$  et  $P=0,4$ , l'algorithme converge toujours vers un optimum global (connu puisque le graphe est simple) même si les optimas (locaux) sont très proches.

### V.4.2.2 Scénario 2

Le deuxième graphe de notre application est aussi une partie du réseau de transport de Lille. Il s'agit de la zone la plus encombrée du centre ville. Nous avons considéré les deux lignes de Metro (ligne 1 et ligne 2) et des lignes de bus au tour de la station « Lille Flandres ». Après avoir affecté une perturbation à un arc, on exécute l'algorithme de reconfiguration pour chercher une nouvelle configuration optimale entre deux stations de la zone perturbée. Les résultats de l'algorithme ACFRS sont présentés dans le tableau V.4. Il contient les deux optimaux locaux trouvés par l'algorithme (cout1 et cout2). Nous constatons que nous pouvons sortir d'un

optimum local et trouver un autre inférieur (exemple 4) même si les deux sont proches ce qui explique une bonne exploration de l'espace de recherche. On remarque que le temps d'exécution augmente par rapport au premier scénario puisque nous avons augmenté le nombre d'arcs et de stations. Mais l'algorithme reste toujours rapide et converge en moins de 2 secondes.

Tableau V.4: Résultats de reconfiguration spatiale scenario 2.

exemple	Cout1	Cout2	I3	I2	solution	Temps en ms
1	216	286	2	60 58	216	797
2	272.66	429.57	2	15 100	272,66	1203
3	860	910	2	100 53	860	1297
4	930	890	2	100 60	890	1532
5	660	710	3	11 100 26	660	1282

Nous présentons dans les paragraphes suivants quelques perturbations parmi les exemples du tableau V.4 ainsi que les solutions proposées par l'ACFRS.

**Perturbation 1:** une forte perturbation entre les stations « THEATRE » et « SACRE CŒUR » de la ligne 12. Les véhicules ne peuvent pas circuler dans cette partie pendant une période de temps importante. L'algorithme ACFRS propose d'utiliser le métro (ligne 1) jusqu'à la station « république Beaux arts » puis les bus de la ligne 12 vont emprunter les itinéraires de la ligne 17 de la station « SACRE CŒUR » jusqu'à la « REPUBLIQUE BEAUX ARTS ».

Les bus de cette ligne 12 qui sont du côté de la gare « LILLE FLANDRE » vont être utilisés pour absorber le flux et ramener les passagers à la station « FOCH » de la ligne 14 pour arriver après à la « REPUBLIQUE BAUX ARTS ». Les autres bus de la même ligne perturbée de la république (nouvelle terminus) vers les deux directions « HAUBOURDIN LE PARC » et « SANTES MARAIS »

**Perturbation 2:** Une autre perturbation sur la même ligne entre la station « CORMONTAIGNE » et « LECLERC » avec un retard estimé très important. L'ACFRS propose aux usagers partant de Lille-Flandres en direction « HAUBOURDIN LE PARC » et « SANTES MARAIS » ou venant vers Lille-Flandres d'utiliser le métro (ligne 2) de ou vers « CORMONTAIGNE ». Les passagers de la zone entre la gare et l'itinéraire perturbé vont être servis par les bus de la ligne 12 existant dans cette partie en recommandant des demi-tours entre la gare et « LECLERC ».

**Perturbation 3**: un incident qui se produit, à cause d'un accident entre la station « REPUBLIQUE » et la station « NATIONALE » de la ligne 14. Cette perturbation bloque le passage dans cet itinéraire. L'ACFRS propose d'emprunter les itinéraires de la ligne 17 en passant par la station « SACRE CŒUR ». Ce qui permet d'éviter la zone perturbée dont le temps de parcours est très élevé.

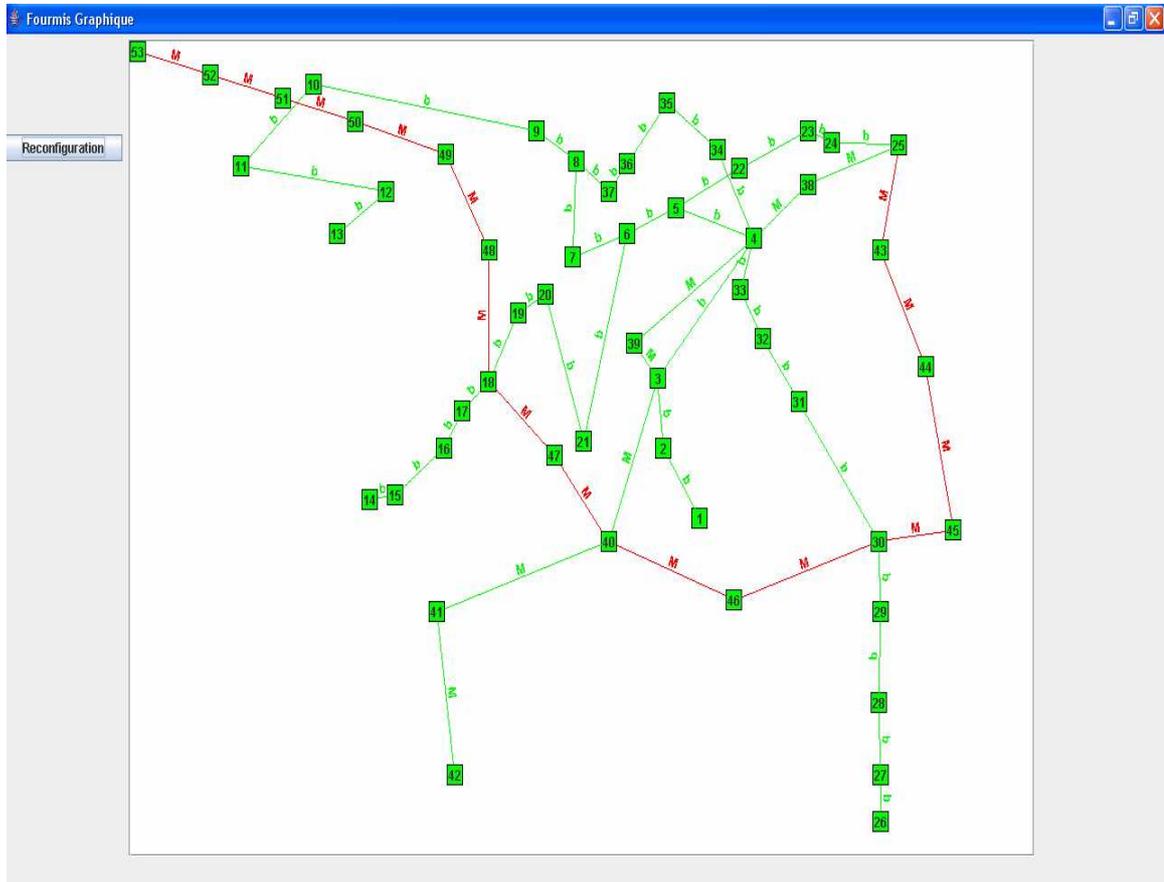


Figure V.4: Exemple de résultat d'exécution de l'ACFRS.

La figure V.4 présente un exemple d'exécution de l'ACFRS dont le chemin en rouge est la solution proposée. La zone concernée est multimodale avec deux lignes de métro désignées par "M" et des lignes de bus désignées par "b". La perturbation de cet exemple affecte la ligne 2 du métro. L'ACFRS propose les mêmes itinéraires, vu que nous ne pouvons pas changer la reconfiguration spatiale d'une ligne de métro.

La figure V.5 présente des courbes de convergence de l'ACFRS pour différentes valeurs des paramètres notamment la probabilité  $P$ . sachant que nous présentons le nombre des fourmis qui convergent vers le premier optimum en fonction des itérations de l'algorithme, nous remarquons que la convergence est très rapide pour une probabilité  $P > 10^{-2}$ . À partir de  $P = 10^{-1}$  le nombre des fourmis qui ont trouvé l'optimum a diminué puisque nous favorisons un peu plus l'exploration.

Si nous augmentons la pondération de la fonction cout ( $a=b$ ), nous aurons une convergence moins rapide puisque  $\text{cout} = 1/\tau$ .

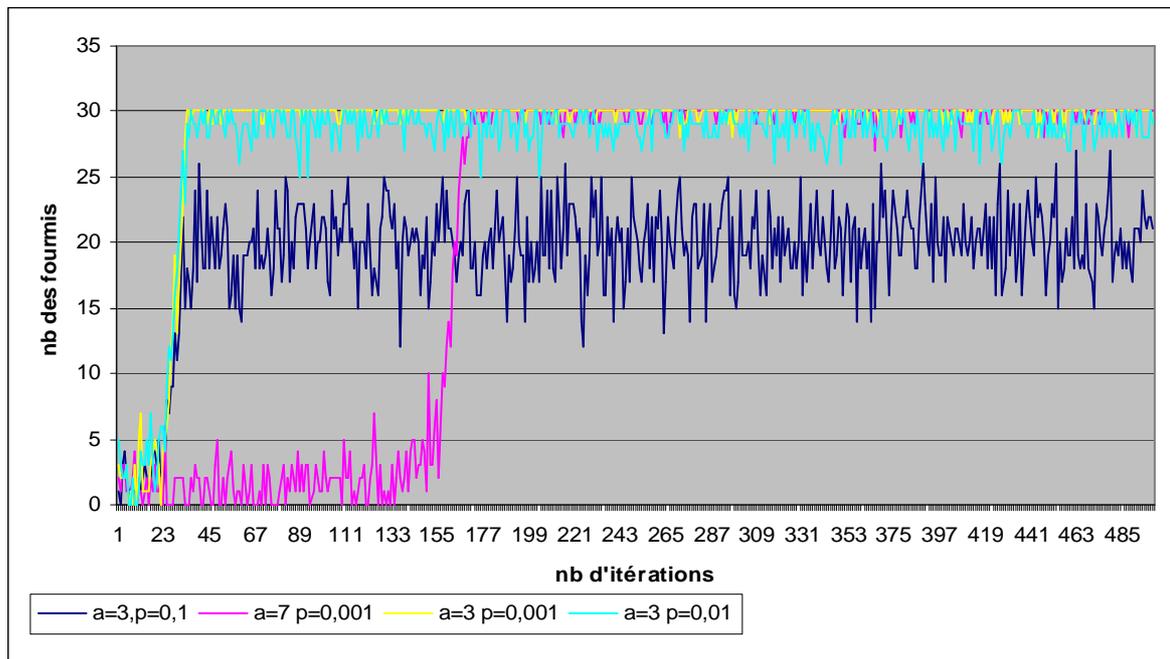


Figure V.5: Courbes de convergence de ACFRS.

## V.5 Application d'ACFRH

Nous avons considéré quatre scénarii différents toujours pour le réseau de transport de Lille dont l'exploitant est la société TRANSPOLE ([www.transpole.fr](http://www.transpole.fr)).

### V.5.1 Scénario 1

#### V.5.1.1 Description

La ligne 0 concernée par l'incident est gérée en fréquence avec un intervalle de 10 minutes. La perturbation, causée par le véhicule  $V_3^0$ , est détectée à  $t_{pert}=12:01$ , à son départ de l'arrêt  $S_2^0$ . L'incident consiste en un accident de circulation entre deux voitures, ce qui ralentit la circulation au point de la bloquer. Le retard du véhicule perturbé à son arrivée à  $S_3^0$  est estimé à 5 minutes. Nous supposons qu'aucune correspondance n'est impliquée dans la perturbation. Ainsi, nous nous intéressons uniquement aux critères de régularité et de ponctualité. La détection anticipée de la perturbation avec l'estimation du retard nous permet d'agir plus rapidement pour diminuer le plus possible l'attente des voyageurs.

Le tableau suivant affiche les horaires de passage des différents véhicules de  $V^H$  aux stations de  $S^H$ . Au lieu d'arriver à 12:06,  $V_3^0$  n'arrivera qu'à 12:11 à la station  $S_3^0$ . Les cases grisées du tableau représentent les horaires que nous ne pouvons pas modifier par des décisions directes. Il s'agit des horaires qui sont avant  $t_{pert}$  ou qui sont sur les limites de l'horizon.

Tableau V.5: Les horaires de passage théoriques pour la ligne l.

	Stations							
	$S_0^0$	$S_1^0$	$S_2^0$	$S_3^0$	$S_4^0$	$S_5^0$	$S_6^0$	$S_7^0$
$V_0^2$	11:19	11:25	11:31	11:36	11:42	11:48	11:53	11:58
$V_1^2$	11:29	11:35	11:41	11:46	11:52	11:58	12:03	12:08
$V_2^2$	11:39	11:45	11:51	11:56	12:02	12:08	12:13	12:18
$V_3^2$	11:49	11:55	12:01	12:06	12:12	12:18	12:23	12:28
$V_4^2$	11:59	12:05	12:11	12:16	12:24	12:28	12:33	12:38
$V_5^2$	12:09	12:15	12:21	12:26	12:34	12:38	12:43	12:48
$V_6^2$	12:19	12:25	12:31	12:36	12:44	12:48	12:53	12:58

Nous considérons que le flux total d'arrivée des passagers aux différentes stations est homogène et égal à 2 voyageurs/minute pour l'horizon traité. Par ailleurs, les exploitants peuvent aussi disposer des charges théoriques moyennes des véhicules à l'arrivée à chaque arrêt (en nombre de personnes). La courbe de ces charges peut avoir plusieurs allures dont la plus rencontrée est la forme triangulaire comme l'illustre la figure ci-dessous [Froloff & al., 89]. Elle sert dans le calcul des charges perturbées et régulées par ajustement selon les retards et les décisions.

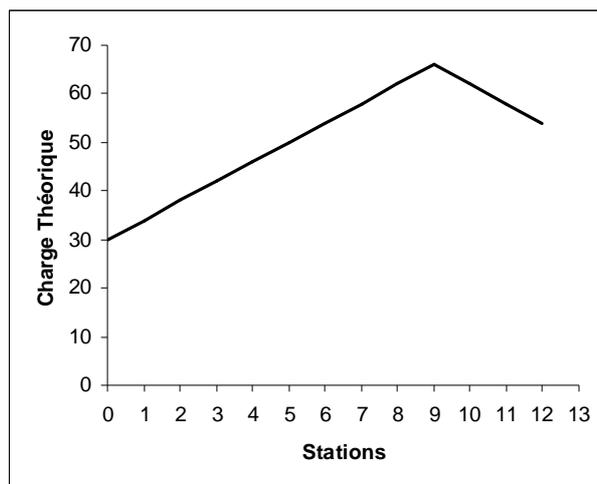


Figure V.6: Courbe des charges théoriques des véhicules de la ligne 0.

### V.5.1.2 Résultats proposés par ACFRH

Nous présentons, dans le tableau V.6, les résultats obtenus pour quatre exemples de simulation. Nous autorisons 4 décisions pour un retard de 0 à 3 minutes dans tous les exemples. Les deux premiers exemples traitent une résolution monocritère et les deux autres tiennent compte de deux critères en même temps. Rappelons que les poids  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  et  $\alpha_3$  représentent respectivement les poids des critères de régularité, correspondance et ponctualité.

Dans le premier exemple, nous ne considérons que le critère de ponctualité ( $\alpha_1=0$ ,  $\alpha_2=0$  et  $\alpha_3=1$ ). Ainsi la solution optimale ne peut correspondre qu'à des décisions nulles. En effet, pour assurer la ponctualité il suffit de minimiser les temps de parcours. Par conséquent, il ne faut retarder aucun véhicule. La solution est obtenue rapidement en moins de 8 secondes.

Dans l'exemple 2, nous ne considérons que la régularité ( $\alpha_1=1$ ,  $\alpha_2=0$  et  $\alpha_3=0$ ). L'ACFRH propose alors de retarder un véhicule en amont,  $V_2^0$ , de 4 minutes repartis sur deux stations ( $S_4^0$  : 3 minutes et  $S_6^0$  : 1 minute), sachant que nous n'avons pas la possibilité de retarder les deux premiers véhicules parce qu'ils terminent leurs services avant la perturbation. Deux véhicules en aval ont été retardés aussi de 3 et 4 minutes respectivement. L'algorithme a ajusté les intervalles qui séparent les véhicules, pour assurer la régularité de passage par les différentes stations. La solution est obtenue en 7 secondes avec une fonction objective  $f=182$ .

Les deux exemples 3 et 4 utilisent les deux critères ponctualité et régularité en même temps avec des pondérations différentes ( $\alpha_1=0,9$  et  $\alpha_3=0,1$  pour l'exemple 3 et  $\alpha_1=0,98$  et  $\alpha_3=0,02$  pour l'exemple 4). Nous remarquons l'effet de la ponctualité sur les décisions. En effet, il y a une baisse des retards à appliquer pour diminuer la durée des trajets. Dans les deux exemples l'algorithme ajuste les intervalles en retardant les véhicules avant et après le véhicule perturbé. Dans l'exemple 4 il y a plus de retard que dans l'exemple 3 puisque nous avons diminué  $\alpha_3$ . Les solutions sont obtenues en 7 secondes avec des fonctions objectif  $f= 20,89$  pour l'exemple 3 et 132.94 pour l'exemple 4.

Tableau V.6: Résultats de la régulation du premier scénario.

	$S_0^0$	$S_1^0$	$S_2^0$	$S_3^0$	$S_4^0$	$S_5^0$	$S_6^0$	$S_7^0$
$V_0^0$	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_1^0$	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_2^0$	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_3^0$	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_4^0$	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_5^0$	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_6^0$	0	0	0	0	0	0	0	0

Exemple 1 temps d'ex 7.39s

	$S_0^0$	$S_1^0$	$S_2^0$	$S_3^0$	$S_4^0$	$S_5^0$	$S_6^0$	$S_7^0$
$V_0^0$	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_1^0$	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_2^0$	0	0	0	0	<b>3</b>	0	<b>1</b>	0
$V_3^0$	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_4^0$	0	0	0	<b>3</b>	0	0	0	0
$V_5^0$	0	0	<b>1</b>	0	0	0	<b>3</b>	0
$V_6^0$	0	0	0	0	0	0	0	0

Exemple 2 tp=6.922s cout 182

	$S_0^0$	$S_1^0$	$S_2^0$	$S_3^0$	$S_4^0$	$S_5^0$	$S_6^0$	$S_7^0$
$V_0^0$	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_1^0$	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_2^0$	0	0	0	0	<b>1</b>	0	0	0
$V_3^0$	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_4^0$	0	0	0	<b>1</b>	0	0	0	0
$V_5^0$	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_6^0$	0	0	0	0	0	0	0	0

Exemple 3 tp=6.89s cout=20.89

	$S_0^0$	$S_1^0$	$S_2^0$	$S_3^0$	$S_4^0$	$S_5^0$	$S_6^0$	$S_7^0$
$V_0^0$	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_1^0$	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_2^0$	0	0	0	0	<b>3</b>	0	0	0
$V_3^0$	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_4^0$	0	0	0	<b>2</b>	0	0	<b>1</b>	0
$V_5^0$	0	0	0	<b>1</b>	0	0	0	0
$V_6^0$	0	0	0	0	0	0	0	0

Exemple 4 tp=6.86scout=132.94

La figure V.7 présente le schéma de la régulation de l'exemple 3. Nous pouvons remarquer sur cette figure l'ajustement des intervalles par l'algorithme ACFRH d'une manière répartie sur l'horizon de régulation.

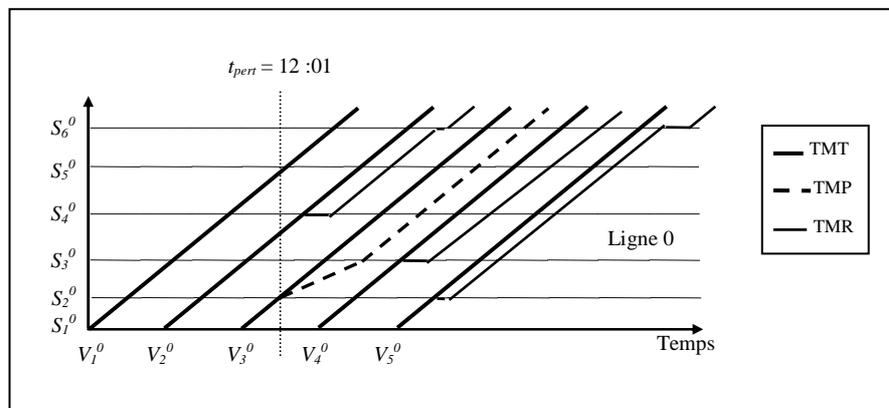


Figure V.7: schéma de régulation de l'exemple 4.

## V.5.2 Scénario 2

### V.5.2.1 Description

Considérons les deux lignes de bus, 1 et 2, ayant une fréquence de 1 véhicule/10 minutes, qui se croisent au niveau d'un nœud de correspondance. A  $t_{pert} = 13:00$ , le véhicule  $V_3^1$ , en route vers la station  $S_2^1$ , rencontre une congestion imprévue dans la circulation et son conducteur

estime un retard de 7 minutes à la prochaine station. Ce retard est saisi dans le SAE, directement par le conducteur ou via le régulateur qui prend connaissance de l'évènement par voie radio. L'horizon de régulation est composé de 7 véhicules ( $V_0^1, V_1^1, V_2^1, V_3^1, V_4^1, V_5^1, V_6^1$ ) et 7 stations ( $S_0^1, S_1^1, S_2^1, S_3^1, S_4^1, S_5^1, S_6^1$ ). Cependant,  $\mathcal{S}^H$  contient un nœud de correspondance représenté par  $S_4^1$  et qu'on appelle N. Alors l'horizon spatio-temporel doit être construit en tenant compte des véhicules de la ligne 2 qui vont effectuer une correspondance avec ceux de la ligne 1 après  $t_{per}$ .

La figure suivante présente les tableaux de marche perturbés, TMP, associés à l'horizon de régulation. Notons qu'au lieu d'arriver à 13 :07, le véhicule perturbé n'arrivera qu'à 13 :14 et le retard se propage sur les stations suivantes. Ce retard crée non seulement une irrégularité dans les intervalles mais aussi un risque que la correspondance de  $V_3^1$  vers  $V_3^2$  soit ratée. En effet, au lieu d'arriver à 13 :25 au nœud,  $V_3^1$  arrive à 13 :32, les passagers descendant de ce véhicule et voulant emprunter un véhicule de la ligne 2 devraient encore attendre 8 minutes, ce qui provoque un retard global de 15 minutes dans leur parcours.

Tableau V.7: TMP des deux lignes 1 et 2.

TMP Ligne 1							
	$S_0^1$	$S_1^1$	$S_2^1$	$S_3^1$	N	$S_5^1$	$S_6^1$
$V_0^1$	12 :20	12 :27	12 :37	12 :47	12 :55	13 :02	13 :08
$V_1^1$	12 :30	12 :37	12 :47	12 :57	13 :05	13 :12	13 :18
$V_2^1$	12 :40	12 :47	12 :57	13 :07	13 :15	13 :22	13 :28
$V_3^1$	12 :50	12 :57	13 :14	13 :24	13 :32	13 :39	13 :45
$V_4^1$	13 :00	13 :07	13 :17	13 :27	13 :35	13 :42	13 :48
$V_5^1$	13 :10	13 :17	13 :27	13 :37	13 :45	13 :52	13 :58
$V_6^1$	13 :20	13 :27	13 :37	13 :47	13 :55	14 :02	14 :08

TMP Ligne 2							
	$S_0^2$	$S_1^2$	N	$S_3^2$	$S_4^2$	$S_5^2$	$S_6^2$
$V_0^2$	12 :42	12 :52	13 :00	13 :10	13 :17	13 :25	13 :31
$V_1^2$	12 :52	13 :02	13 :10	13 :20	13 :27	13 :35	13 :41
$V_2^2$	13 :02	13 :12	13 :20	13 :30	13 :37	13 :45	13 :51
$V_3^2$	13 :12	13 :22	13 :30	13 :40	13 :47	13 :55	14 :01
$V_4^2$	13 :22	13 :32	13 :40	13 :50	13 :57	14 :05	14 :11
$V_5^2$	13 :32	13 :42	13 :50	14 :00	14 :07	14 :15	14 :21
$V_6^2$	13 :42	13 :52	14 :00	14 :10	14 :17	14 :25	14 :31

Nous remarquons, d'après la figure V.8 illustrant les charges théoriques, que pour les deux lignes, le nœud de correspondance constitue un point critique.

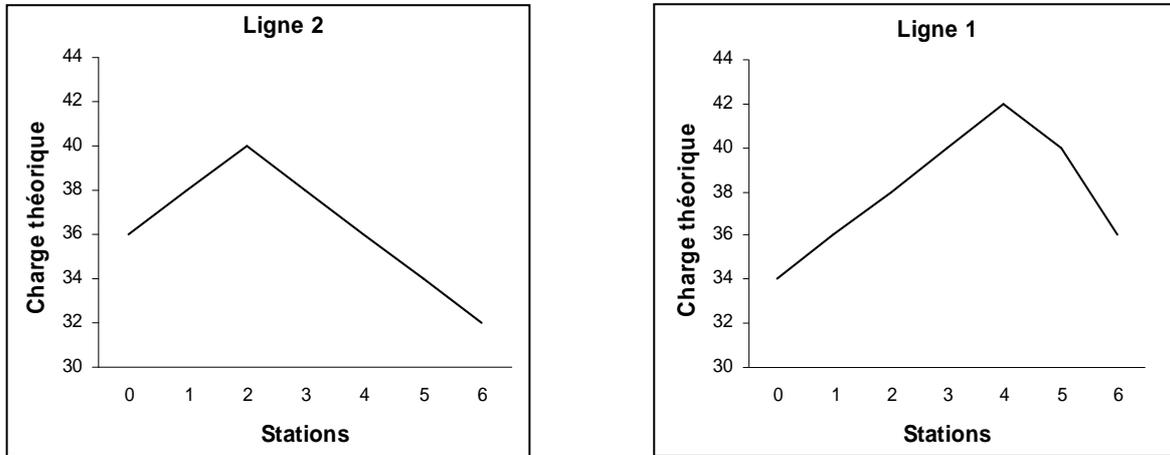


Figure V.8: Charges théoriques des véhicules aux arrêts de l'horizon.

### V.5.2.2 Résultats proposés par ACFRH

Le tableau V.8 présente les résultats de deux exemples monocritères. Dans le premier (exemple 1), nous ne considérons que la régularité. L'algorithme propose de retarder deux véhicules en amont et deux véhicules en aval par rapport au véhicule perturbé,  $V_3^I$ . Pour la ligne 2 il n'y a pas de retards à appliquer, puisqu'il n'est pas perturbé et la régularité est assurée dans la planification théorique (fréquence de 1 véhicule/10 minutes). La solution est obtenue au bout de 10 secondes avec une fonction objectif  $f=212$ .

L'exemple 2 ne tient compte que de la correspondance. Il propose de retarder un véhicule de la ligne 1 et un autre de la ligne 2. Nous remarquons que les retards ont été proposés avant le nœud de correspondance pour minimiser le temps de transfert. Le retard appliqué à  $V_2^2$ , par exemple, permet de diminuer le temps de transfert des passagers de  $V_2^2$  vers  $V_3^I$  (véhicule perturbé).

Le tableau V.9 présente le résultat d'un exemple utilisant les trois critères : la régularité avec  $\alpha_1 = 0.25$ , la correspondance avec  $\alpha_2 = 0.74$  et la ponctualité avec  $\alpha_3 = 0.01$ . L'algorithme diminue les retards pour assurer plus de ponctualité par rapport aux exemples précédents ainsi que la régularité surtout pour la ligne 2 en fonctionnement normal. La solution est obtenue en 10 secondes avec  $f=391$ .

Tableau V.8: Résultats de régulation monocritère.

Ligne 1								Ligne 1							
	$S_0^l$	$S_1^l$	$S_2^l$	$S_3^l$	<b>N</b>	$S_5^l$	$S_6^l$		$S_0^l$	$S_1^l$	$S_2^l$	$S_3^l$	<b>N</b>	$S_5^l$	$S_6^l$
$V_0^l$	0	0	0	0	0	0	0	$V_0^l$	0	0	0	0	0	0	0
$V_1^l$	0	0	0	0	0	0	<b>3</b>	$V_1^l$	0	0	0	0	0	0	0
$V_2^l$	0	0	0	0	<b>3</b>	0	0	$V_2^l$	0	0	0	0	0	0	0
$V_3^l$	0	0	0	0	0	0	0	$V_3^l$	0	0	0	0	0	0	0
$V_4^l$	0	0	<b>3</b>	0	0	0	0	$V_4^l$	0	0	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	0	0
$V_5^l$	0	0	<b>1</b>	0	0	0	0	$V_5^l$	0	0	0	0	0	0	0
$V_6^l$	0	0	0	0	0	0	0	$V_6^l$	0	0	0	0	0	0	0

Ligne 2								Ligne 2							
	$S_0^2$	$S_1^2$	<b>N</b>	$S_3^2$	$S_4^2$	$S_5^2$	$S_6^2$		$S_0^2$	$S_1^2$	<b>N</b>	$S_3^2$	$S_4^2$	$S_5^2$	$S_6^2$
$V_0^2$	0	0	0	0	0	0	0	$V_0^2$	0	0	0	0	0	0	0
$V_1^2$	0	0	0	0	0	0	0	$V_1^2$	0	0	0	0	0	0	0
$V_2^2$	0	0	0	0	0	0	0	$V_2^2$	0	<b>3</b>	0	0	0	0	0
$V_3^2$	0	0	0	0	0	0	0	$V_3^2$	0	0	0	0	0	0	0
$V_4^2$	0	0	0	0	0	0	0	$V_4^2$	0	0	0	0	0	0	0
$V_5^2$	0	0	0	0	0	0	0	$V_5^2$	0	0	0	0	0	0	0
$V_6^2$	0	0	0	0	0	0	0	$V_6^2$	0	0	0	0	0	0	0

$\alpha_1=1, \alpha_2=0$  et  $\alpha_3=0$   $f=212$  tp=10s

$\alpha_1=0, \alpha_2=1$  et  $\alpha_3=0$   $f=533.99$  tp 8.29s

Exemple 1

Exemple 2

Tableau V.9: Résultat de régulation multicritère.

Ligne 1							
	$S_0^l$	$S_1^l$	$S_2^l$	$S_3^l$	<b>N</b>	$S_5^l$	$S_6^l$
$V_0^l$	0	0	0	0	0	0	0
$V_1^l$	0	0	0	0	0	0	0
$V_2^l$	0	0	0	0	0	0	0
$V_3^l$	0	0	0	0	0	0	0
$V_4^l$	0	0	<b>3</b>	<b>3</b>	0	0	0
$V_5^l$	0	0	0	<b>1</b>	0	0	0
$V_6^l$	0	0	0	0	0	0	0

Ligne 2							
	$S_0^2$	$S_1^2$	<b>N</b>	$S_3^2$	$S_4^2$	$S_5^2$	$S_6^2$
$V_0^2$	0	0	0	0	0	0	0
$V_1^2$	0	0	0	0	0	0	0
$V_2^2$	0	0	0	0	0	0	0
$V_3^2$	0	0	0	0	0	0	0
$V_4^2$	0	0	0	0	0	0	0
$V_5^2$	0	0	0	0	0	0	0
$V_6^2$	0	0	0	0	0	0	0

$\alpha_1=0.25, \alpha_2=0.74$  et  $\alpha_3=0.01$

$f=391.956$  tp=9.37s

Exemple 3

### V.5.3 Scénario 3

#### V.5.3.1 Description

Ce scénario est issu du réseau de transport multimodal de la métropole lilloise. Ce réseau comporte trois modes de transport : bus, métro et tramway. Nous considérons la ligne de bus 27 et la ligne de tramway Lille-Roubaix-Tourcoing. Supposons qu'à  $t_{\text{pert}}=12:24$ , un problème technique ait lieu sur un tronçon de la ligne du Tramway, désignée par la ligne T, qui a une fréquence de 1 tram/10 minutes. Ce problème oblige l'un des tramways,  $V_3^T$ , de s'arrêter pendant 7 minutes au niveau d'une station  $S_2^T$ , à 10 minutes du nœud de correspondance, Mouveaux 3 Suisses, désignée par N. Ce tram doit effectuer, à 12:40, une correspondance avec un bus de la ligne 27, désignée par B, alors qu'il y arrive à 12:43. La ligne de bus a une fréquence de 1 bus/20 minutes. Le taux de correspondance des trams vers les bus est de 10% et celui des bus vers les trams est de 20%.

Nous prenons une zone perturbée qui regroupe, par exemple, 8 trams et 5 bus ainsi que 8 stations pour la ligne de tram, 8 pour la ligne de bus et le nœud N. Nous considérons plus de trams que de bus à cause de la fréquence des lignes. Le tableau suivant présente les TMP des deux lignes.

Tableau V.10: TMP des deux lignes T et B.

TMP Ligne T									
	$S_0^T$	$S_1^T$	$S_2^T$	$S_3^T$	N	$S_5^T$	$S_6^T$	$S_7^T$	$S_8^T$
$V_0^T$	11 :45	11 :50	11 :55	12 :00	12 :05	12 :10	12 :15	12 :20	12 :25
$V_1^T$	11 :56	12 :01	12 :06	12 :11	12 :16	12 :21	12 :26	12 :31	12 :36
$V_2^T$	12 :06	12 :11	12 :16	12 :21	12 :26	12 :31	12 :36	12 :41	12 :46
$V_3^T$	12 :16	12 :21	12 :33	12 :38	12 :43	12 :48	12 :53	12 :58	13 :03
$V_4^T$	12 :25	12 :30	12 :35	12 :40	12 :45	12 :50	12 :55	13 :00	13 :05
$V_5^T$	12 :34	12 :39	12 :44	12 :49	12 :54	12 :59	13 :04	13 :09	13 :14
$V_6^T$	12 :44	12 :49	12 :54	12 :59	13 :04	13 :09	13 :14	13 :19	13 :24
$V_7^T$	12 :56	13 :01	13 :06	13 :11	13 :16	13 :21	12 :26	13 :31	13 :36

TMP Ligne B									
	$S_0^B$	$S_1^B$	$S_2^B$	$S_3^B$	N	$S_5^B$	$S_6^B$	$S_7^B$	$S_8^B$
$V_0^B$	11 :33	11 :39	11 :45	11 :51	11 :57	12 :03	12 :09	12 :15	12 :21
$V_1^B$	11 :53	11 :59	12 :05	12 :11	12 :17	12 :23	12 :29	12 :35	12 :41
$V_2^B$	12 :16	12 :22	12 :28	12 :34	12 :40	12 :46	12 :52	12 :58	13 :04
$V_3^B$	12 :34	12 :40	12 :46	12 :52	12 :58	13 :04	13 :10	13 :16	13 :22
$V_4^B$	12 :54	13 :00	13 :06	13 :12	13 :18	13 :24	13 :30	13 :36	13 :42

Le flux de passagers pour les trams est de 2 passagers/minute et celui des bus est de 1 passager/minute.

### V.5.3.2 Résultats proposés par ACFRH

Ce scénario ressemble au précédent avec deux modes de transport différents. Dans un premier exemple de régulation, l'algorithme ajuste les intervalles de la même façon que pour les autres scénarii. Il propose des retards avant et après le véhicule perturbé d'une façon la plus équilibrée possible. Pour la correspondance, il n'agit que sur les véhicules avant le nœud N.

Dans le tableau V.12, nous traitons le cas multicritère avec des pondérations différentes. L'algorithme trouve rapidement les solutions pour tous les exemples au bout d'un temps ne dépassant pas 10 secondes.

Tableau V.11: Résultats des exemples monocritères.

Ligne T									
	$S_0$	$S_1^T$	$S_2^T$	$S_3^T$	<b>N</b>	$S_5^T$	$S_6^T$	$S_7^T$	$S_8^T$
$V_0^T$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_1^T$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_2^T$	0	0	0	<b>3</b>	0	0	<b>3</b>	0	0
$V_3^T$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_4^T$	0	0	<b>3</b>	<b>2</b>	0	0	0	<b>1</b>	0
$V_5^T$	0	0	0	<b>3</b>	0	0	<b>1</b>	0	0
$V_6^T$	0	0	0	0	0	0	0	<b>2</b>	<b>2</b>
$V_7^T$	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ligne B									
	$S_0$	$S_1^B$	$S_2^B$	$S_3^B$	<b>N</b>	$S_5^B$	$S_6^B$	$S_7^B$	$S_8^B$
$V_0^B$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_1^B$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_2^B$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_3^B$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_4^B$	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0$  et  $\alpha_3 = 0$   $f=362$  tp=29 s

Exemple 1

Ligne T									
	$S_0^T$	$S_1^T$	$S_2^T$	$S_3^T$	<b>N</b>	$S_5^T$	$S_6^T$	$S_7^T$	$S_8^T$
$V_0^T$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_1^T$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_2^T$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_3^T$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_4^T$	0	0	0	<b>3</b>	<b>3</b>	0	0	0	0
$V_5^T$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_6^T$	0	<b>3</b>	0	<b>3</b>	0	0	0	0	0
$V_7^T$	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ligne B									
	$S_0^B$	$S_1^B$	$S_2^B$	$S_3^B$	<b>N</b>	$S_5^B$	$S_6^B$	$S_7^B$	$S_8^B$
$V_0^B$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_1^B$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_2^B$	0	0	0	0	<b>2</b>	0	0	0	0
$V_3^B$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_4^B$	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 1$  et  $\alpha_3 = 0$   $f=232$  tp=22.8s

Exemple 2

La figure V.9 présente le schéma de régulation de l'exemple 2. Il s'agit d'un exemple monocritère dont nous assurons plus de transfert des passagers tel que la première correspondance, affectée par la perturbation, de  $V_3^T$  vers  $V_2^B$ .

Tableau V.12: Résultats des exemples multicritères.

Ligne T										Ligne T									
	$S_0$	$S_1^T$	$S_2^T$	$S_3^T$	<b>N</b>	$S_5^T$	$S_6^T$	$S_7^T$	$S_8^T$		$S_0$	$S_1^T$	$S_2^T$	$S_3^T$	<b>N</b>	$S_5^T$	$S_6^T$	$S_7^T$	$S_8^T$
$V_0^T$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$V_0^T$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_1^T$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$V_1^T$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_2^T$	0	0	0	0	0	<b>2</b>	0	0	0	$V_2^T$	0	0	0	0	0	<b>1</b>	0	0	0
$V_3^T$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$V_3^T$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_4^T$	0	0	<b>2</b>	0	0	0	0	0	0	$V_4^T$	0	0	<b>1</b>	0	<b>3</b>	0	0	0	0
$V_5^T$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$V_5^T$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_6^T$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$V_6^T$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_7^T$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$V_7^T$	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ligne B										Ligne B									
	$S_0$	$S_1^B$	$S_2^B$	$S_3^B$	<b>N</b>	$S_5^B$	$S_6^B$	$S_7^B$	$S_8^B$		$S_0$	$S_1^B$	$S_2^B$	$S_3^B$	<b>N</b>	$S_5^B$	$S_6^B$	$S_7^B$	$S_8^B$
$V_0^B$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$V_0^B$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_1^B$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$V_1^B$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_2^B$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$V_2^B$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_3^B$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$V_3^B$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_4^B$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$V_4^B$	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$\alpha_1 = 0.4, \alpha_2 = 0.58$  et  $\alpha_3 = 0.02 \Rightarrow f=104.88$        $\alpha_1 = 0.14, \alpha_2 = 0.85$  et  $\alpha_3 = 0.01 \Rightarrow f=115.23$   
 tp=28.06s      tp=26.04s  
 Exemple 3      Exemple 4

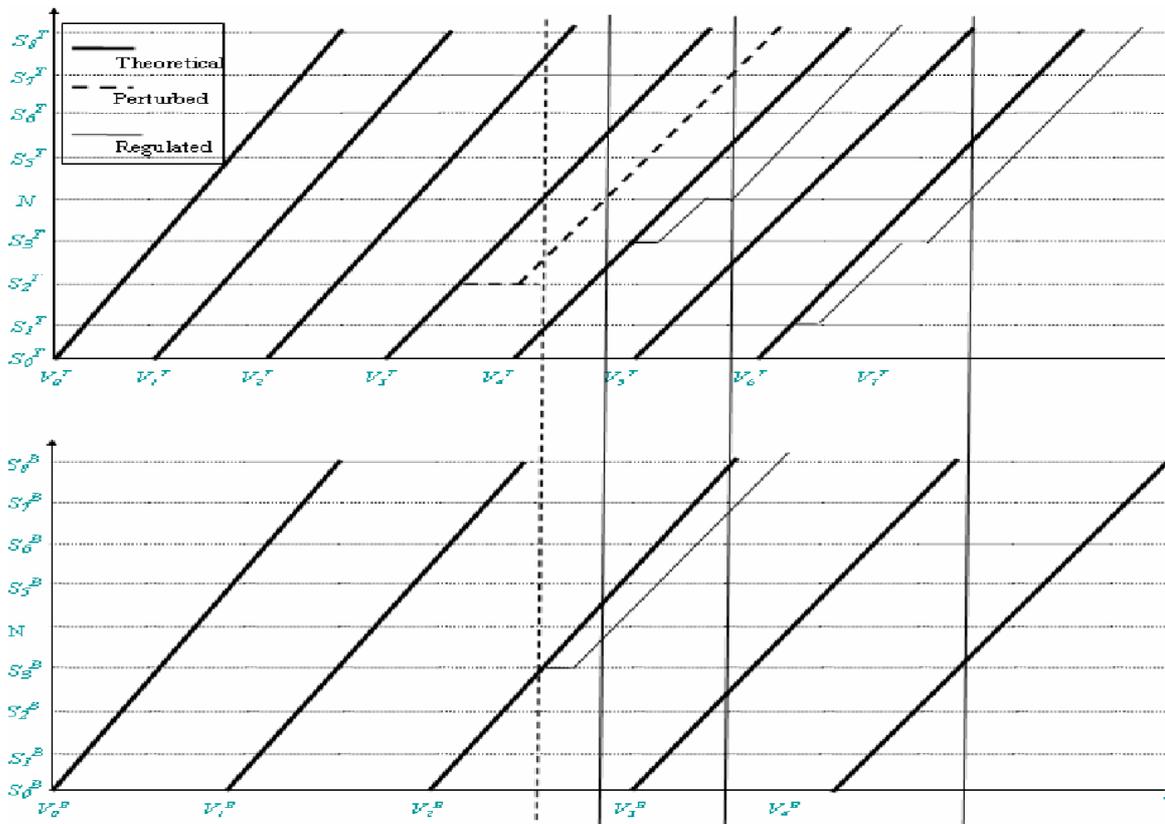


Figure V.9: Schéma de régulation de l'exemple 2.

## V.5.4 Scénario 4

### V.5.4.1 Description

Nous avons continué avec le premier scénario de la reconfiguration spatiale dont nous avons déterminé l'itinéraire optimale pour les véhicules perturbés de la ligne 7. Nous devons maintenant calculer les tableaux de marche régulée (TMR) des deux lignes de bus 5 et 7. Elles ont des fréquences de 1bus/20 minutes et de 1bus/10 minutes respectivement. L'incident traité affecte directement le véhicule  $V_3^7$ . Il est causé par une manifestation imprévue qui se déroule entre la station 9 de la ligne 7 et le nœud, et qui ralentit la circulation. A sa sortie de la station 9 à 12 :54, le véhicule  $V_3^7$  rencontre la manifestation et son conducteur estime un retard de 7 minutes et le communique au régulateur. La correspondance vers le véhicule  $V_2^5$ , qui part à 13 :15 du nœud, ne va finalement pas avoir lieu puisque le véhicule  $V_3^7$  n'arrive qu'à 13 :18. Nous considérons donc le nouvel itinéraire, proposé par ACFRS, pour ce véhicule. Il s'agit de l'itinéraire 1- 2- 3- 5- 6- 7- 8- 9. C'est un nouvel itinéraire qui correspond à une déviation du parcours initial avec un sautage de deux stations.

Les deux tableaux suivants présentent les tableaux de marche des deux lignes.

Tableau V.13: TMT de la ligne 5.

	$S_0^5$	$S_1^5$	$S_2^5$	$S_3^5$	<b>N</b>	$S_5^5$	$S_6^5$	$S_7^5$
$V_0^5$	12 :11	12 :17	12 :23	12 :29	12 :35	12 :41	12 :47	12 :53
$V_1^5$	12 :31	12 :37	12 :43	12 :49	12 :55	13 :01	13 :07	13 :13
$V_2^5$	12 :51	12 :57	13 :03	13 :09	13 :15	13 :21	13 :27	13 :33
$V_3^5$	13 :11	13 :17	13 :23	13 :29	13 :35	13 :41	13 :47	13 :53
$V_4^5$	13 :31	13 :37	13 :43	13 :49	13 :55	14 :01	14 :07	14 :13

Tableau V.14: TMP de la ligne 7.

	$S_0^7$	$S_1^7$	$S_2^7$	$S_3^7$	<b>N</b>	$S_5^7$	$S_6^7$	$S_7^7$	$S_8^7$
$V_0^7$	12.18	12.24	12.30	12.36	12.42	12.48	12.54	13.00	13.06
$V_1^7$	12.28	12.34	12.40	12.46	12.52	12.58	13.04	13.10	13.16
$V_2^7$	12.38	12.44	12.50	12.56	13.02	13.08	13.14	13.20	13.26
$V_3^7$	12.48	12.54	13.03	13.13	13.19	13.25	13.31	13.37	13.43
$V_4^7$	12.58	13.04	13.10	13.16	13.22	13.28	13.34	13.40	13.46
$V_5^7$	13.08	13.14	13.20	13.26	13.32	13.38	13.44	13.50	13.56
$V_6^7$	13.18	13.24	13.30	13.36	13.42	13.48	13.54	14.00	14.06

### V.5.4.2 Résultats proposés par ACFRH

Après avoir déterminé le chemin optimal par l'algorithme de reconfiguration spatiale (ACFRS), nous devons proposer les nouveaux tableaux de marche régulés de chaque ligne. Les tableaux suivants présentent les résultats des régulations horaires.

Tableau V.15: Régulation de la correspondance.

	$S_0^5$	$S_1^5$	$S_2^5$	$S_3^5$	<b>N</b>	$S_5^5$	$S_6^5$	$S_7^5$
$V_0^5$	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_1^5$	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_2^5$	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_3^5$	0	0	<b>2</b>	0	0	0	0	0
$V_4^5$	0	0	0	0	0	0	0	0

	$S_0^7$	$S_1^7$	$S_2^7$	$S_3^7$	<b>N</b>	$S_5^7$	$S_6^7$	$S_7^7$	$S_8^7$
$V_0^7$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_1^7$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_2^7$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_3^7$	0	0	<b>non</b>	<b>non</b>	0	0	0	0	0
$V_4^7$	0	0	0	<b>3</b>	<b>3</b>	0	0	0	0
$V_5^7$	0	<b>3</b>	<b>3</b>	0	<b>3</b>	0	0	0	0
$V_6^7$	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$$\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 1 \text{ et } \alpha_3 = 0$$

Exemple 1

Dans l'exemple 1, nous optimisons le critère correspondance. Avec la même logique que dans les scénarii précédents, l'algorithme nous propose de retarder des véhicules avant d'arriver au nœud de correspondance, pour permettre le transfert d'un plus grand nombre d'usagers entre les deux lignes.

Le deuxième exemple (tableau V.16) traite la régularité.

Tableau V.16: Régulation de la régularité.

	$S_0^5$	$S_1^5$	$S_2^5$	$S_3^5$	<b>N</b>	$S_5^5$	$S_6^5$	$S_7^5$
$V_0^5$	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_1^5$	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_2^5$	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_3^5$	0	0	<b>2</b>	0	0	0	0	0
$V_4^5$	0	0	0	0	0	0	0	0

	$S_0^7$	$S_1^7$	$S_2^7$	$S_3^7$	<b>N</b>	$S_5^7$	$S_6^7$	$S_7^7$	$S_8^7$
$V_0^7$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_1^7$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_2^7$	0	0	0	0	<b>3</b>	0	0	0	0
$V_3^7$	0	0	<b>non</b>	<b>non</b>	0	0	0	0	0
$V_4^7$	0	<b>1</b>	0	<b>3</b>	0	0	0	0	0
$V_5^7$	0	0	<b>2</b>	0	0	0	0	0	0
$V_6^7$	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$$\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0 \text{ et } \alpha_3 = 0$$

Exemple 2

Dans l'exemple 3, nous ne considérons que la ponctualité. Ainsi la solution optimale ne peut être composée que de décisions nulles. La fonction objectif est nulle si nous considérons que la situation perturbée est celle de la zone juste après la reconfiguration. Dans ce cas, nous construisons le TMP avec la nouvelle configuration spatiale. Par contre, la fonction objectif est différente de zéro si nous considérons le premier TMP qui précède la reconfiguration puisque le temps de parcours a diminué.

Tableau V.17: Régulation de la ponctualité.

	$S_0^5$	$S_1^5$	$S_2^5$	$S_3^5$	<b>N</b>	$S_5^5$	$S_6^5$	$S_7^5$	
$V_0^5$	0	0	0	0	0	0	0	0	
$V_1^5$	0	0	0	0	0	0	0	0	
$V_2^5$	0	0	0	0	0	0	0	0	
$V_3^5$	0	0	0	0	0	0	0	0	
$V_4^5$	0	0	0	0	0	0	0	0	
	$S_0^7$	$S_1^7$	$S_2^7$	$S_3^7$	<b>N</b>	$S_5^7$	$S_6^7$	$S_7^7$	$S_8^7$
$V_0^7$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_1^7$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_2^7$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_3^7$	0	0	<b>non</b>	<b>non</b>	0	0	0	0	0
$V_4^7$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_5^7$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_6^7$	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$$\alpha_1=0, \alpha_2=0 \text{ et } \alpha_3=1$$

Exemple 3

### V.5.5 Comparaisons des résultats

Dans cette partie nous allons comparer les résultats trouvés par l'ACFRH avec d'autres algorithmes. Pour vérifier l'efficacité de nos travaux, nous avons appliqué le même algorithme à une colonie de fourmis, mais sans la recherche locale, pour les mêmes quatre scénarios que nous avons présentés précédemment. Le tableau V.18 présente les résultats de ce dernier et celles de l'ACFRH utilisant une recherche locale dynamique. Nous pouvons remarquer l'importance des résultats proposés par l'ACFRH. En effet, l'ACFRH reste meilleur sauf dans un seul exemple mais plus rapide dans tous les cas.

Le temps d'exécution de l'ACFRH est légèrement inférieur à celui de l'ACS. En fait, la recherche locale permet de restreindre l'espace d'exploration puisque nous utilisons des fenêtres spatiotemporelles de limitation.

Tableau V.18: Tableau de comparaison entre ACS et ACFRH.

		ACS		ACFRH	
Scénario	Exemple	f	Temps d'exécution	f	Temps d'exécution
1	1	0	8s	0	7s
	2	160		182	
	3	20.89		20.89	
	4	132.78		132.94	
2	1	192	11s	212	10s
	2	526.4		533.99	
	3	394		391.956	
3	1	362	31s	362	29s
	2	208		232	
	3	104.88		104.88	
	4	114.39		115.23	
4	1	192	11s	192	9s
	2	290		310	
	3	0		0	

Les mêmes scénarii ont été traités par [Besma, 03] avec une approche évolutionniste. Le tableau V.19 présente les résultats de cette approche que nous comparons avec notre algorithme de régulation horaire ACFRH. Dans les trois premiers scénarii, ACFRH est meilleur que l'Algorithme Evolutionniste AE [Borne & al., 02] dans 8 exemples. Alors que ce dernier (AE) a abouti à des solutions meilleures dans deux exemples

Dans le scénario 4, les fonctions objectif de AE sont calculées à partir du TMP initial (TM avant la reconfiguration spatiale). Mais pour l'ACFRH, la régulation horaire est appliquée après la reconfiguration spatiale. Les valeurs présentées pour notre approche sont naturellement plus grande si nous calculons les différences de temps d'attente, de temps de transfert et de temps de parcours par rapport à l'état perturbé avant la reconfiguration. Par exemple, pour l'exemple 3 du scénario 4, les deux algorithmes trouvent la même solution (des décisions nulles) avec des valeurs différentes de  $f$  (0 pour ACFRH et 76 pour AE).

L'ACFRH est beaucoup plus rapide que l'approche évolutionniste. C'est un facteur très important pour une régulation en temps réel de l'exploitation ou en temps minimal. Il est aussi intéressant d'agir rapidement avant que les retards s'accumulent et que l'incident se propage sur le réseau. Ceci nous permet d'éviter l'élargissement de la perturbation.

Tableau V.19: Tableau de comparaison entre AE et ACFRH.

		AE		ACFRH	
Scénario	Exemple	f	Temps d'exécution	f	Temps d'exécution
1	1	0	18s	0	7s
	2	136		182	
	3	25.2		20.89	
	4	101.08		132.94	
2	1	278	29s	212	10s
	2	136		533.99	
	3	82		391.956	
3	1	308	32s	362	29s
	2	162		232	
	3	23.86		104.88	
	4	82.41		115.23	
4	1	193	190s NB : Fonction calculé avec TMP avant la reconfiguration spatiale	192	9s
	2	354		310	
	3	76		0	

## V.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré, avec des applications, l'apport du SARR pour la régulation et la reconfiguration des réseaux de transport multimodal. Nous avons mis en évidence l'efficacité des trois algorithmes utilisés dans ce système d'aide à la décision. En fait, nous appliquons une première approche de classification utilisant la technique SVM. Elle permet de proposer une première solution rapide établie selon les paramètres de la perturbation et les objectifs de l'exploitant. Les décisions fournies par ce module sont faciles à comprendre par le régulateur. Elles sont sous la forme d'une hiérarchisation dans laquelle une erreur faible de 5.3% est répartie sur les différents niveaux. C'est une vision globale du réseau qui nous permet par la suite de passer aux autres modules avec plus de précision dans le traitement.

Nous avons appliqué une autre approche pour la reconfiguration spatiale (ACFRS). Il s'agit d'un algorithme à colonie de fourmis pour l'optimisation des itinéraires de transport multimodal en temps réel. A travers les résultats exposés, nous avons montré l'apport d'une telle approche pour gérer les perturbations complexes et simultanées.

Une régulation des horaires de passage des véhicules par les stations est aussi nécessaire pour assurer la ponctualité, la régularité et la correspondance. Nous avons donc vérifié l'apport du troisième algorithme (ACFRH) à travers quatre scénarii réels d'un réseau de transport multimodal. Les résultats de ces scénarii prouvent que l'algorithme est capable d'améliorer la qualité de service offerte aux usagers. Nous avons vérifié aussi et montré l'importance de la

recherche locale dynamique introduite dans l'algorithme en comparant avec un algorithme à colonie de fourmis standard.

## Conclusion et perspectives

### *Conclusion*

Le travail effectué dans cette thèse traite le problème de l'adaptation de l'offre aux conditions réelles d'exploitation des réseaux de transport multimodal. Il s'agit d'un besoin majeur des exploitants qui cherchent à améliorer la qualité du service offert aux usagers du transport en commun. Malgré l'aide très précieuse des SAE, les régulateurs n'arrivent pas à prendre en compte le grand nombre d'informations véhiculées par ces systèmes dans la prise de décision en cas de perturbations. Ainsi, nous avons proposé un système d'aide à la décision (SAD) qui s'avère nécessaire, afin d'aider les régulateurs à prendre des décisions pertinentes pour la régulation de réseaux. Nous avons aussi contribué à l'aide à la reconfiguration. Une nouvelle problématique d'optimisation très complexe étant donnés l'aspect temps réel et le type des perturbations à traiter.

Nous avons commencé par une étude bibliographique sur la gestion de l'exploitation des réseaux de transport multimodal. Nous avons étudié en particulier la régulation en temps réel ce qui nous a permis de comprendre les difficultés actuelles concernant les systèmes de transport. Nous avons aussi montré la nécessité d'un tel système d'aide à la décision.

Le premier module du système que nous avons proposé repose sur la technique SVM. Il intègre l'expertise et le savoir faire des régulateurs à travers la base d'apprentissage. Il s'agit d'un outil d'apprentissage statistique très performant même dans les cas non-linéaires comme notre cas de régulation des perturbations aléatoires et de sources différents. Nous avons montré l'utilité de cet outil pour assister le régulateur en temps réel. En effet, ce processus de classification est rapide et le choix de l'arbre binaire pour la multiclasse nous a permis de proposer une hiérarchisation des décisions au régulateur. Ce qui correspond bien à notre objectif d'aide à la régulation.

La complexité des perturbations qui peuvent affecter les réseaux nous a incités à concevoir un système d'aide à la régulation et à la reconfiguration. Dans ce cadre, nous avons proposé un premier algorithme à colonie de fourmis pour la reconfiguration spatiale (ACFRS). Il s'agit d'une approche heuristique de recherche d'itinéraire multimodale pour laquelle nous avons optimisé le temps de parcours, la distance de parcours et le nombre de passagers servis.

Nous avons proposé aussi l'Algorithme à Colonie de Fourmis pour la Régulation Horaire (ACFRH) prenant en compte les trois critères : la régularité, la ponctualité et la correspondance. L'espace de recherche est très grand et les difficultés d'optimums locaux sont importantes. Nous avons procédé à la recherche locale pour minimiser la complexité et gagner en temps d'exécution. Mais, pour assurer l'exploration de l'espace de recherche, nous avons limité cet espace par des fenêtres spatio-temporelles de dimensions croissantes au cours des itérations. C'est ce que nous avons appelé la recherche locale dynamique.

Nous avons développé une application en JAVA des différents modules afin de vérifier les résultats et mettre en évidence l'apport des approches proposées. Des scénarios réels sont utilisés pour valider notre SARR.

## ***Perspectives***

Dans ce présent travail d'aide à la régulation et à la reconfiguration, la gestion de l'exploitation est effectuée à travers une vision globale du réseau traduite par le vecteur d'entrée du premier module de classification. Nous pouvons considérer une première perspective qui s'agit de traiter chaque zone perturbée à part, à travers une vision locale avec les mêmes approches. Avec cette idée, nous revenons au caractère distribué et ouvert des réseaux de transport urbain. Nous pouvons donc ajouter un Système Multi-Agent (SMA) dont chaque zone (au tour des nœuds de correspondance, par exemple) est surveillée par un groupe d'agents. Les agents responsables à des zones différentes communiquent entre eux afin d'échanger des informations, de coopérer et de négocier pour résoudre surtout des conflits et des chevauchements entre les zones perturbées. Ils peuvent utiliser les approches déjà développées pour la régulation et la reconfiguration.

Nous avons mis au point un module de classification dont la phase d'apprentissage (la résolution du dual) est effectuée avec l'usage des outils de résolution quadratique existants comme loqo. Quelques difficultés sont apparues lors de la réalisation. Il s'agit :

- D'une base d'apprentissage relativement petite : difficulté d'avoir assez d'exemples de perturbations (des informations considérées confidentielles pour les compagnies de transport).
- Des erreurs d'apprentissages.
- Des spécificités de chaque réseau pour la régulation : ce qui nous empêche de proposer un système directement utilisable dans tout réseau.

- L'architecture et les moyens de chaque réseau évolue : les manœuvres de régulations ne seront pas les mêmes pour les mêmes perturbations.

Puisque notre approche de classification sera utilisée dans un système d'aide à la décision, l'interaction avec le régulateur nous permet d'augmenter la base d'apprentissage et de corriger les erreurs. Et par la suite, notre SARR peut s'adapter à n'importe quel réseau. En fait, en temps réel et avec l'apparition des incidents, notre système propose une solution qui peut être rejetée par le régulateur. Dans ce cas, nous proposons d'ajouter à la base cette perturbation ainsi que la décision prise par cet opérateur (le régulateur), comme exemple d'apprentissage. Après avoir ajouté plusieurs exemples, le régulateur doit refaire la phase d'apprentissage. Comme l'opérateur ne dispose pas de compétences informatiques, nous devons proposer un système facile et dynamique susceptible de réaliser automatiquement la phase d'apprentissage. Il s'agit alors de l'apprentissage en ligne. Dans ce cadre, notre perspective consiste à développer un outil rapide de résolution du dual tel que SMO (*Sequential Minimal Optimisation*) et l'intégrer dans le module de classification proposé.

Dans le cadre des algorithmes à colonie de fourmis, nous pouvons intégrer d'autres idées pour l'analyse multicritère. L'une des perspectives envisagées consiste à utiliser un groupe de fourmis pour chaque critère et les différents groupes communiquent entre eux à travers la phéromone qui reste la même substance attirant les fourmis de tous les groupes de la même façon. Dans ce cas, nous aurons aussi la possibilité de contrôler l'importance de chaque critère par le nombre de fourmis attribués.

D'autre part, afin d'améliorer la façon de choisir les préférences du régulateur concernant les critères, nous pouvons intégrer un module basé sur la théorie de la logique floue. La même approche peut être aussi utilisée pour l'estimation de certains paramètres notamment le flux des passagers.

## Références bibliographiques

- [Abbas-Turki & al., 02] A.Abbas-Turki, O.Grunder, R.Bouykhek and A.Elmoudni, “Modular controlled stochastic Petri Nets for the connection monitoring”, Proceedings of the World Automation Congress, Fourth International Symposium on Intelligent Automation and Control, ISIAC030, Florida, 2002.
- [Alaya & al., 05] I.Alaya, C.Solnon et K.Ghédira, “Algorithme fourni avec différentes stratégies phéromonales pour le sac à dos multidimensionnel”, MHOSI’05, Hammamet, Tunisie, 2005.
- [Aloulou, 99] M.A.Aloulou, “Application des algorithmes génétiques à la régulation du trafic des bus”, Rapport de DEA en Informatique Industrielle à l’université des sciences et technologies de Lille, juin 1999.
- [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.
- [Bartlett, 03] P.L.Bartlett and W.Maass, “Vapnik-Chervonenkis dimension of neural nets”, In Michael A. Arbib, editor, The Handbook of Brain Theory and Neural Networks, pages 1188-1192. MIT Press, 2003. Second Edition.
- [Ben Khaled & al., 05] I.Ben Khaled, M.A.Kamoun, K.Zidi, S.Hammadi. “Vers un système d’information voyageur multimodal (SIM) à base de système multi-agent (SMA)”. REE N° 1 Janvier 2005 pp: 41-47.
- [Besma, 03] F.C.Besma “Régulation des réseaux de transport multimodal : systèmes multi-agent et algorithmes évolutionnistes”, thèse de doctorat en automatique informatique industrielle à l’université des sciences et technologies de Lille, n d’ordre 3349, 14 octobre 2003.

- [Borne & al., 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, 2003.
- [Boukachour & al., 00] H.Boukachour, C.Duvellet, and A.Cardon, “multi agent system to prevent technological risks”, in proceeding of ACIDCA’2000.
- [Bouomrane & al., 05] K.Bouomrane, T.Bonte, M.Sevaux, C. Tahon (2005). SART : un système d'aide à la décision pour la régulation d'un réseau de transport bimodal. Proceedings of the workshop Méthodologies et Heuristiques pour l'Optimisation des Systèmes Industriels, MHOSI 2005, Hammamet, Tunisie, avril.
- [Bouomrane & al., 06] K. Bouamrane, C.Tahon, H.Sefiane, “régulation d’un réseau de transport urbain : formalisation des actions de régulation et raisonnement a partir de cas”, 6e Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation - MOSIM’06 - du 3 au 5 avril 2006 – Rabat- Maroc « Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes : Défis et Opportunités ».
- [Bullnheimer & al., 97] B.Bullnheimer, R.F.Hartl, and C.Strauss, “A new rank-based version of the ant system: a computational study”, Technical Report POM-03/97, Institute of Management Science, University of Vienna, 1997, Accepted for publication in the Central European Journal for Operations Research and Economics.
- [Bullnheimer & al., 98] B.Bullnheimer, R.F.Hartl, and C.Strauss, “Applying the ant system to the vehicle routing problem”, In I. H. Osman S. Vos, S. Martello and C. Roucairol, editors, Meta-Heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization, pages 109–120. Kluwer Academics, 1998.
- [Burge, 98] C.J.C.Bruges, “A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition”, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [Castelain & al., 02] E.Castelain and K.Mesghouni, “Regulation of a public transport Network with consideration of the passenger flow: modelling of the system with high-level Petri Nets”, Proceedings of the IEEE SMC Conference, WA2C3, Hammamet, Tunisia, 6-9 October 2002.
- [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.
- [Claude, 01] D.Claude, "Des systèmes d'aide à la décision temps réel et distribués : modélisation par agents", thèse de doctorat en informatique de l'université du Havre, 5 octobre 2001.
- [Colorni & al, 92] A.Colorni, M.Dorigo, V.Maniezzo, "An Investigation of some Properties of an Ant Algorithm", Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature Conference (PPSN 92), Brussels, Belgium, R.Männer and B.Manderick (Eds.), Elsevier Publishing, 509-520, 1992.
- [Colorni & al, 91] A.Colorni, M.Dorigo, V.Maniezzo, "Distributed Optimization by Ant Colonies", Proceedings of the First European Conference on Artificial Life, Paris, France, F.Varela and P.Bourgine (Eds.), Elsevier Publishing, 134-142, 1991.
- [Cornuéjols, 02] A.Cornuéjols, "Une nouvelle méthode d'apprentissage : les SVM. Séparateurs à vaste marge", Bulletin de l'AFIA, numéro 51, juin 2002.
- [Costa & hertz, 97] D.Costa, and A.Hertz, "ants can colour graphs", Journal of the operational research society, 48: 295-305, 1997.
- [Cure & al., 84] C.Cure, B.Foraste, « système d'aide à l'exploitation et algorithmes de régulation », recherche transport sécurité, 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.
- [Deb & al, 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.
- [Demmou & al, 98] H.Demmou, L.Hermite, A.Sahraoui and P.Oliverio, "A Neural Network Methodology for Traffic Congestion and On-line Traffic Control", April 1998.
- [Deneubourg & al, 83] J.L.Deneubourg, J.M.Pasteels, J.C.Verhaeghe, "Probabilistic Behaviour in Ants: a Strategy of Errors ?", Journal of Theoretical Biology, 105, 259-271, 1983.
- [Deneubourg & al, 89] J.L.Deneubourg, S.Goss, "Collective patterns and decision-making", Ethology, Ecology & Evolution, Vol.1, 295-311, 1989.

- [Desobry & al., 05] F.Desobry, M.Davy, C.Doncarli, “An online kernel change detection algorithm”, IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 53(8-2), pp: 2961-2974. 2005.
- [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.
- [Dodd & al., 03] T.J.Dodd, V.Kadirkamanathan and R.F.Harrison. “Function Estimation Hilbert Space Using Sequential Projections”. Department of Automatic Control and Systems Engineering University of Sheffield, Sheffield S1 3JD, UK 2003.
- [Dorigo & al, 99] M.Dorigo, G.DiCaro and L.M.Gambardella, “Ant Algorithms for Discrete Optimization”, Artificial Life, 5(2):137-172, 1999.
- [Dorigo & al, 96] M.Dorigo, V.Maniezzo and A.Colorni. “Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents”. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B, 26(1):29-41, 1996.
- [Dorigo & al., 97] M.Dorigo and L.M.Gambardella. “Ant Colonies for the Traveling Salesman Problem”, BioSystems, 43:73-81, (Also Technical Report TR/IRIDIA/1996-3, IRIDIA, Université Libre de Bruxelles.) 1997.
- [Dorigo & al, 92] M.Dorigo, V.Maniezzo, and A.Colorni, “Positive feedback as a search strategy”, Technical Report 91-016, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, IT, 1991.
- [Dorigo, 92] M.Dorigo, “Optimization, learning and natural algorithms”, Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano, Italy, 1992
- [Dreo, 04] J.Dreo, “Adaptation de la métaheuristique des colonies de fourmis pour l’optimisation difficile en variables continues. Application en génie biologique et médical”, thèse de doctorat en Génie biologique et médical à l’université de paris, décembre 2004.
- [Fox, 81] M.Fox., “factory modelling, simulation, and scheduling in the intelligent management system”, in proceeding of 7th international joint conference on artificial intelligence, 1981.
- [Friedman, 96] J. Friedman, “Another approach to polychotomous classification”, Technical Report, Stanford University, UA, 1996.
- [Frollof & al., 89] E.Frollof, M.Rizzi et A.Saporito, “Bases et pratiques de la régulation”, RATP, Direction du Réseau Routier RC/MSE, août 1989.

- [Gagné & Price, 01] C.Gagné & w.L.Price, “Optimisation par colonie de fourmis pour un problème d’ordonnancement industriel avec temps de réglages dépendants de la séquence”, 3e Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation MOSIM’01 – du 25 au 27 avril 2001 – Troyes (France)
- [Gambardella & Dorigo, 2000] L.Gambardella, and M.Dorigo, “Ant Colony System hybridized with a new local search for the sequential ordering problem”, *INFORMS Journal on Computing*, 12(3): 237-255, 2000.
- [Gamberdella & al, 97] L.M.Gambardella, E.D.Taillard, and M.Dorigo. Ant colonies for the QAP. Technical Report 4-97, IDSIA, Lugano, Switzerland, 1997.
- [Gamberdella & al, 99] L.M.Gambardella, E.Taillard, and G.Agazzi. Macs-vrptw: A multiple ant colony system for vehicle routing problems with time windows. In D. Corne, M. Dorigo, and F. Glover, editors, *New Methods in Optimisation*. McGraw-Hill, 1999.
- [Goss & al, 90] S.Goss, R.Beckers, J.L.Deneubourg, S.Aron, J.M.Pasteels, “How Trail Laying and Trail Following Can Solve Foraging Problems for Ant Colonies”, in *Behavioural Mechanisms of Food Selection*, R.N.Hughes ed., NATO-ASI Series, vol. G 20, Berlin:Springer-Verlag, 1990.
- [Guzolek & al., 89] J.Guzolek, E.Koch, “Real time route planning in road networks”, *IEEE CH2789*, juin1989.
- [Habib, 06] A.B.Habiboulaye, “Classification dynamique de données non-stationnaires: apprentissage et suivi de classes évolutives”, thèse de doctorat en automatique informatique industrielle à l’université des sciences et technologies de Lille, 28 juin 2006.
- [Habib & al., 05] A.B.Habiboulaye, S. Lecoeuche, A new kernel-based algorithm for online clustering. Springer-Verlag, Duch, W. and al. (Eds): *International Conference on Neural Networks (ICANN05)*, pp: 583-588. Warsaw, Poland, 2005.
- [Hastus] <http://www.giro.ca> (mise à jour 2007)
- [Herbrich, 02] R.Herbrich, “Learning with Kernel”, The MIT Press, 2002. ISBN: 0-262-08306-X.
- [Herbrich & al., 99] R.Herbrich, T.Graepel and C.Campbell, “Bayesian Learning in Reproducing Kernel Hilbert Spaces”, Technical University of Berlin, 1999.

- [Hsu & Lin, 02] C.W.Hsu and C.J.Lin, "A Comparison of Methods for Multiclass Support Vector Machines", IEEE transactions on neural networks, Vol. 13, NO. 2, March 2002.
- [Huissman & al., 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").
- [Kamel, 06] Z.Kamel, "Système Interactif d'Aide au Déplacement Multimodal (SIADM)", thèse de doctorat en automatique informatique industrielle délivré conjointement par l'Université des Sciences et Technologies de Lille et l'École Centrale de Lille, n d'ordre 37, 13 décembre 2006.
- [Kaufmann, 99] L.Kaufman, "Solving the Quadratic Programming Problem Arising in Support Vector Classification", Advances in Kernel Methods - Support Vector Learning, edited by B. Scholkopf, C. J. C. Burges, A. J. Smola, MIT Press, Cambridge, MA, pp: 147-167, 1999.
- [Khorovitch & al., 91] B.G.Khorovitch, G.Catalano, P.Hoflinger et M.Leprince, "aspect techniques et économiques de système d'aide à l'exploitation", Transport Public'91, Union Internationale des transports publics, 49e Congrès International, Stockholm, 1991.
- [Lacomme & al, 03] P.Lacomme, C.Prins, A.Tanguy, "Optimisation par colonies de fourmis pour les tournées sur arcs", 4e Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation MOSIM03, Toulouse (France) 2003.
- [Lacomme & al, 01] P.Lacomme, C.Prins et W.Ramdane-Chérif, "Competitive genetic algorithms for the Capacitated Arc Routing Problem and its extensions", dans E.J.W. Boers et al. (éd.), Applications of evolutionary computing, pp. 473-483, Lecture Notes in Computer Science 2037, Springer, 2001
- [Laïchour, 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.
- [Lévine & al., 89] P.Lévine and J.C.Pomerol, "système interactif d'aide à la décision et système expert" éditions Hermes, 1989.

- [Li & 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.
- [Mangasarian & Bradley, 00] O.L.Mangasarian and P.S.Bradley, “Massive data discrimination via linear support vector machine”, *Optimization Methods & Software*,13:1t0,2000.
- [Mayoras & Alpaydin, 99] E.Mayoraz and E.Alpaydin, “Support Vector Machines for multiclass classification”, *International Workshop on Artificial Neural Networks(IWANN)*, 1999.
- [Meskine & Gendre, 01] A.Meskine, P.Gendre. “Algorithmes et calculs d’optimisation d’itinéraires pour l’information multimodale ; implémentation d’un prototype pour les transports collectifs avec horaires”, Rapport d’étude, CERTU/EMSE (Ecole des Mines de Saint-Étienne et Centre d’études sur les réseaux, les transports, l’urbanisme et les constructions urbaines). Novembre 2001. <http://www.predim.org>.
- [Micchelli, 86] C.A.Micchelli, “Interpolation of scattered data: Distance matrices and conditionally positive definite functions”, *Constructive Approximation*, vol. 2, pp: 11–22, 1986.
- [Monmarche, 2000] N.Monmarché. “Algorithme de fourmis artificielles : application à la classification et à l’optimisation”, Thèse de doctorat à l’université de François Rabelais Tour. 20 décembre 2000.
- [Musicant, 00] D.R.Musicant, “Data Mining via Mathematical Programming and Machine Learning”, Phd. Thesis, Computer Sciences Department, University of Wisconsin, Madison, 2000.
- [Nait-Sidi & al, 02] A.Nait Sidi Moh, M.A.Manier and A.El Moudni, “A controlled policy for public transport network modelled by Petri Nets and Max-Plus Algebra”, CD-Rom Proceedings of World Automation Congress, ISIAC028, WAC 2002, Orlando, Florida, USA, June 9-13, 2002.
- [Ngamchai & Lovell, 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.

- [Ould Sidi & al.\_a, 05] M.M.Ould Sidi, S.Hammadi, S.Hayet, P.Borne, “Urban transport disrupted networks regulation strategies making and evaluation: a new approach”, IESM 2005, Marrakech (2005).
- [Ould Sidi & al.\_b, 05] M.M.Ould Sidi., S.Hammadi, S.Hayet, “AEMC pour l’aide à la regulation du trafic d’un réseau de transport collectif”, MHOSI 2005, Hammamet (2005).
- [Ould sidi, 06] M.M.Ould Sidi, “ Contribution à l’amélioration des systèmes d’aide à la décision pour la régulation du trafic dans Les réseaux de transport collectif ”, thèse de doctorat en automatique informatique industrielle délivré conjointement par l’Université des Sciences et Technologies de Lille et l’Ecole Centrale de Lille, n d’ordre 38, 12 décembre 2006.
- [Paul & Wren, 97] F.Paul and A.Wren, “An Ant Sytem for Bus driver Scheduling”, 7th international workshop on Computer-Aided Schudeling of public transport, Boston, July, 1997.
- [Pattipati & Deckert, 91] K.R.Pattipati, J.C.Deckert, “A decision support system for the design of a large electronics test facility Shaw”, Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on Volume 21, Issue 3, May-June 1991 Page(s):533 – 544
- [Pilli, 88] D.Pillai, “Developing a decision support system for optimizing automated wafer fabrication”, Electronic Manufacturing Technology Symposium, 1988, 'Design-to-Manufacturing Transfer Cycle'. Fifth IEEE/CHMT International 10-12 Oct. 1988 Page(s):170 – 176
- [Platt & al., 00] J.C.Platt, N.Cristianini and J.Shawe-Taylor, “Large margin DAG’s for multiclass classification”, in Advances in Neural Information Processing Systems. Cambridge, MA: MIT Press, 2000, vol. 12, pp. 547–553.
- [Platt, 99] J.C.Platt, “Fast training of support vector machines using sequential minimal optimization”, Advances in kernel methods: support vector learning, MIT Press, Cambridge, MA, 1999.
- [Rizzi, 88] Michel RIZZI, “le graphicage des lignes d’autobus. Comment déterminer l’intervalle”, RATP, juillet-aout 1988.
- [Robert & al., 00] J.S.Robert, P.Galkowski, I.Glikstein, N.Ternullo, “Robust algorithm for real time route planning”, IEEE transactions on aerospace and electronic systems vol. 36, No. 3, juillet 2000.

- [Rousseau & al., 89] J.M.Rousseau and J.Y.Blais, “HASTUS: An interactive systems for buses and crew scheduling”, *Computer Scheduling of Public Transport-2*, J.M.Rousseau ed., pp.45-60, Amsterdam, North Holland, 1985.
- [Ruud & al, 96] S.Ruud, H.Owen and B.Janet, “Ant-Like Agents for Load Balancing”, in *Telecommunications Networks Agents*, pages: 209-216, 1997.
- [Salomon, 01] J.Salomon, “Support Vector Machines for Phoneme Classification”, Master of science, School of Artificial Intelligence, University of Edinburgh, 2001.
- [Schölkopf & Smola, 01] B.Schölkopf and A.J.Smola, “Learning with Kernels, Support Vector Machines, Regularization, Optimization and Beyond”, MIT Press, Cambridge, MA : December 2001.
- [Schölkopf & al., 97] B.Schölkopf, K.Sung, C.Burges, F.Girosi, P.Niyogi, T. Poggio and V.Vapnik, “Comparing support vector machines with Gaussian kernels to radial basis function classifiers”, *IEEE Trans. Sign. Processing*, vol. 45, pp: 2758 – 2765, 1997.
- [Sim & Sun, 02] K.M.Sim, W.H.Sun, “Multiple ant-colony optimization for network routing”, *Proceedings of the First International Symposium on Cyber Worlds (CW.02) IEEE 6-8 Nov. 2002* Page(s):277 – 281.
- [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.
- [Stiles & al., 91] P. Stiles, I. Glikstein, “Route planning”, *IEEE CH3030*, avril 1991.
- [Stuzle & al, 97] T.Stutzle and H.Hoos, “The MAX–MIN ant system and local search for the traveling salesman problem”, In T. Baeck, Z. Michalewicz, and X. Yao, editors, *Proceedings of IEEE-ICEC-EPS’97, IEEE International Conference on Evolutionary Computation and Evolutionary Programming Conference*, pages 309–314. IEEE Press, 1997.
- [Stuzle & Hoos, 98] T.Stutzle and H.Hoos, “MAX–MIN Ant system and local search for combinatorial optimization problems”, In S. Vos, S. Martello, I.H. Osman, and C. Roucairol, editors, *Meta-Heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization*, pages 137–154. Kluwer, Boston, 1998.

- [Tu, 03] Y.K.Tu, “Hierarchical Text Classification using One-Class-SVM”, Thesis of Computer Science & Information Engineering, National Cheng Kung University, Taiwan, China. 2003.
- [Vapnik, 82] V.N.Vapnik. “Estimation of Dependences Based on Empirical Data” (russe). Nauka, Moscou, 1979. (Traduction anglaise : Springer Verlag, New York, 1982).
- [Vapnik, 99] V.N.Vapnick, “An Overview of Statistical Learning Theory”, IEEE transactions on neural networks, VOL. 10, NO. 5. 1999.
- [Vapnik, 98] V.N.Vapnik. “Statistical Learning Theory”, John Wiley & Sons Inc., New York, 1998.
- [Vapnik, 95] V.N.Vapnik, “The Nature of Statistical Learning Theory”, Springer, New York, 1995.
- [Wynter & al., 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.
- [Zhou & al., 02] W.Zhou, L.Zhang and L.Jiao, “Linear programming support vector machines“, Pattern Recognition Society, Published by Elsevier Science Ltd. 2002.
- [Zibulevsky, 98] M.Zibulevsky, “Pattern Recognition via Support Vector Machine with Computationally Efficient Nonlinear Transform”, Computer Science dept, FEC 313 the University of New Mexico, USA 1998.
- [Zidi & al, 05] S.Zidi, S.Maouche and S.Hammadi, “Support vector machine for regulation of multimodal transport network”, EANN2005, The 9th International Conference on Engineering Applications of Neural Networks, Lille, France, August 2005.
- [Zidi & al\_a, 06] S.Zidi, S.Maouche and S.Hammadi, “Nouvelle approche pour la régulation des réseaux de transport multimodal”, MOSIM’06, 6e Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation, Rabat, Maroc, 2006.
- [Zidi & al\_b, 06] S.Zidi, K.Zidi and S.Maouche, “Approches métaheuristiques pour des problèmes de transport multimodal”, LT’ 2006 Workshop International : Logistique et Transport, Hammamet, Tunisie, 30 avril -2 mai 2006.

- [Zidi & al\_c, 06] S. Zidi, S. Maouche and S. Hammadi, “Ant colony optimization for spatial reconfiguration of multimodal transport network”, CTS2006 11th IFAC-Symposium on Control in Transportation Systems Delft, The Netherlands, August 2006.
- [Zidi & al\_d, 06] S.Zidi, S.Maouche and S.Hammadi, “Real time route planning of the public transportation system”, IEEE ITSC2006 The 9th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Toronto, septembre 2006.
- [Zidi & al\_e, 06] S.Zidi and S.Maouche, “Ant Colony Optimization for the rescheduling of multimodal transport networks”, CESA’06 IMACS-IEEE Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications, Beijing, China, October 2006.
- [Zidi & al\_f, 06] S.Zidi, S.Maouche and S.Hammadi, “Ant Colony with Dynamic Local Search for the Time Scheduling of Transport Networks”, International Journal of Computers, Communications & Control, IJCCC, Vol. I (2006), No. 4, pp. 110-125.

## Récapitulatif des Publications

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons publié sept articles dont un dans une revue internationale et six dans des congrès internationaux. Nous parlons, dans cette partie, des différentes publications, par ordre chronologique. Nous présentons un résumé de chacune ainsi que leurs liaisons avec les chapitres de ce mémoire.

### 1. EANN2005, Aout 2005

S.Zidi, S.Maouche and S.Hammadi, Support vector machine for regulation of multimodal transport network, Proceedings of EANN2005, The 9th International Conference on Engineering Applications of Neural Networks, Lille, France, 24-26 August 2005, pp 205-212.

Cet article concerne le début des travaux sur l'approche SVM pour la régulation. Nous avons présenté l'idée de la classification des perturbations selon les manœuvres de régulation, ce qui est lié au chapitre III. Nous avons aussi montré l'importance de la méthode MSVM d'arbre binaire pour un tel système d'aide à la décision.

### 2. MOSIM'06, Avril 2006

S.Zidi, S.Maouche and S.Hammadi, Nouvelle approche pour la régulation des réseaux de transport multimodal, MOSIM'06, 6e Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation, Rabat, Maroc, 3-5 Avril, 2006.

Dans cet article, présenté au Maroc, nous proposons un système d'aide à la régulation ainsi qu'à la reconfiguration. Nous présentons, dans un premier lieu, l'algorithme de classification SVM (Support Vectors Machines) pour la régulation (chapitre III). Puis nous marquons le début des travaux sur la reconfiguration utilisant une approche à colonie de fourmis, ce qui est lié au chapitre IV.

### 3. LT' 2006, Mai 2006

S.Zidi, K.Zidi and S.Maouche, Approches métaheuristiques pour des problèmes de transport multimodal, LT' 2006 Workshop International : Logistique et Transport, Hammamet, Tunisie, 30 avril -2 mai 2006.

Ce papier, qui a été présenté au Workshop International LT' 2006 en Tunisie, s'intéresse au problème de perturbation des réseaux de transport multimodale. Nous proposons des approches

pour l'aide au déplacement des usagers et pour la reconfiguration spatiale. Nous comparons dans ce papier notre algorithme à colonie de fourmis avec une approche qui s'appuie sur une hybridation entre l'algorithme de Dijkstra et un algorithme évolutionniste.

#### **4. IFAC-CTS2006, Aout 2006**

S.Zidi, S.Maouche and S.Hammadi, Ant colony optimization for spatial reconfiguration of multimodal transport network, CTS2006 11th IFAC-Symposium on Control in Transportation Systems Delft, Netherlands, August 2006.

Nous avons exposé ce papier à Delft (Pay-bas). Il met en œuvre l'algorithme à colonie de fourmis pour la reconfiguration spatiale avec une plus large exploration de l'espace de recherche. Nous avons présenté des scénarios du réseau de Lille. Cet article a contribué à la rédaction des chapitres I (planification), chapitre IV et aussi chapitre V (scénarios de reconfiguration spatiale).

#### **5. IEEE ITSC2006, Septembre 2006**

S. Zidi, S. Maouche and S. Hammadi, "Real time route planning of the public transportation system", IEEE ITSC2006 The 9th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Toronto, septembre 2006.

Cet article traite aussi de l'algorithme de reconfiguration spatiale (ACFRS) du chapitre IV. Nous avons présenté en plus une étude sur sa convergence et nous l'avons comparé avec un algorithme génétique.

#### **6. CESA'06 IMACS-IEEE, Octobre 2006**

S.Zidi and S.Maouche, "Ant Colony Optimization for the rescheduling of multimodal transport networks", CESA'06 IMACS-IEEE Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications, Beijing, China, October 2006.

Dans cet article, nous avons présenté la première version de l'algorithme à colonie de fourmis pour la régulation horaire. Il s'agit de l'approche ACFRH du chapitre IV. Toutefois, nous n'avons pas utilisé la recherche locale dynamique. Ce papier a aussi contribué à la rédaction de chapitre V par les scénarios de la régulation horaire.

#### **7. IJCCC, Vol. I (2006)**

S.Zidi, S.Maouche and S.Hammadi, Ant Colony with Dynamic Local Search for the Time Scheduling of Transport Networks, International Journal of Computers, Communications & Control, IJCCC, Vol. I (2006), No. 4, pp. 110-125.

Dans ce papier, nous avons commencé par le contexte général de la gestion en temps réel des réseaux de transport (chapitre I). Puis nous avons présenté l'algorithme de régulation horaire ACFRH mais avec la recherche locale dynamique. Comme dans le chapitre V, nous avons comparé les résultats de l'algorithme sans recherche locale et avec recherche locale pour mettre en œuvre notre idée théorique.

# **Annexes**

# Annexe 1

## Apprentissage

Nous utilisons le langage AMPL pour La résolution du dual lagrangien. Comme le montre la figure suivante, nous faisons appel à des solveurs dont le premier est MINOS et le second est LOQO.

```

sw: ampl
ampl: model pert.mod;
ampl: data pert.dat;
ampl: solve;
MINOS 5.5: optimal solution found.
134 iterations, objective 38.71633283
Nonlin evals: obj = 263, grad = 262.
ampl: display x;
x [*] :=
1 0.458226      15 1.06309      29 1.51245      43 0.309667      57 0.557017
2 0            16 0.917889      30 0.911897      44 0            58 0.858882
3 0.240787      17 0.322523      31 0.950196      45 1.12587      59 2
4 0            18 2            32 0.604696      46 0            60 1.24989
5 0.288876      19 1.62775      33 0.776123      47 1.82963      61 1.14907
6 0.744702      20 0.954852      34 0.887963      48 1.2833       62 0.781734
7 1.01286       21 1.08254      35 0.641514      49 0.88748      63 2
8 0.00731718    22 1.20744      36 2            50 1.25617      64 0.771265
9 1.26259       23 1.08446      37 2            51 0            65 0.88157
10 0.544936      24 2            38 0.964824      52 0.327961     66 0.622875
11 1.64813       25 2            39 1.06995      53 0.716402     67 0.894562
12 2            26 0.790218     40 1.14295      54 0.785221
13 2            27 2            41 1.2946        55 0
14 2            28 0.653656     42 1.10563      56 2
;

ampl: option solver loqo;
ampl: solve;
LOQO 6.06: optimal solution (13 QP iterations, 13 evaluations)
primal objective 38.71632563
dual objective 38.71635445
ampl: display x;
x [*] :=
1 0.458048      18 2            35 0.641619      52 0.327885
2 1.97213e-06   19 1.6278        36 2            53 0.713884
3 0.240757      20 0.954882      37 2            54 0.78529
4 3.23258e-06   21 1.08254      38 0.964786      55 0.00313412
5 0.288891      22 1.20738      39 1.06992      56 2
6 0.744703      23 1.08446      40 1.14297      57 0.557011
7 1.01279       24 2            41 1.2943        58 0.858887
8 0.00797342    25 2            42 1.10567      59 1.99983
9 1.26241       26 0.790261     43 0.309655      60 1.2499
10 0.544918      27 2            44 7.2105e-06    61 1.14906
11 1.64797       28 0.653655     45 1.12589      62 0.781748
12 1.999999      29 1.51247      46 1.08863e-05   63 2
13 2            30 0.911889     47 1.82981      64 0.771256
14 2            31 0.95022      48 1.28331      65 0.881554
15 1.06307      32 0.604385     49 0.887306      66 0.622875
16 0.917874      33 0.776211     50 1.25618      67 0.894554
17 0.322435     34 0.887959     51 2.48716e-06
;

ampl:

```

Exemple d'exécution sous le langage AMPL.

Nous devons déclarer le modèle dans un fichier d'extension .mod (figure suivante). Il s'agit de la fonction à optimiser et des contraintes. Dans notre cas de classification SVM, la forme est celle du dual que nous avons présenté dans le chapitre III.

```

pert - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
param a{1..24,1..67};
param y{1..67};
var x{1..67}>=0;
maximize linear_combination:
sum{i in 1..67}x[i]-1/2*sum{i in 1..67}(sum{j in 1..67}(x[i]*x[j]*y[i]*y[j]*(exp(-0.005*sum{k in 1..24}((a[k,i]-a[k,j])^2))))
subject to total_mass: sum{i in 1..67}(x[i]*y[i])=0;
subject to definitional_constraints {i in 1..67}: x[i]<=10000;

```

## Exemple de fichier model

Nous déclarons aussi l'ensemble de données de la base d'apprentissage dans un fichier d'extension .dat (figure suivante). Ce fichier doit contenir les vecteurs à classer ainsi que leurs attribut y.

```

pert - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
let a[17,64] := -1;
let a[17,65] := -1;
let a[17,66] := -1;
let a[17,67] := 0;
let a[18,64] := 0;
let a[18,65] := 0.3;
let a[18,66] := 0.2;
let a[18,67] := 0.1;
let a[19,64] := 0;
let a[19,65] := 0.2;
let a[19,66] := 0.1;
let a[19,67] := 0.3;
let a[20,64] := 0;
let a[20,65] := 0;
let a[20,66] := 0;
let a[20,67] := -1;
let a[21,64] := 0;
let a[21,65] := 0;
let a[21,66] := -1;
let a[21,67] := 0;
let a[22,64] := 0;
let a[22,65] := -1;
let a[22,66] := 0;
let a[22,67] := 0;
let a[23,64] := -1;
let a[23,65] := 0;
let a[23,66] := 0;
let a[23,67] := 0;
let a[24,64] := 0.3;
let a[24,65] := 0.45;
let a[24,66] := 0.2;
let a[24,67] := -1;
let y[1] := -1;
let y[2] := -1;
let y[3] := -1;
let y[4] := -1;
let y[5] := -1;
let y[6] := -1;
let y[7] := -1;
let y[8] := -1;
let y[9] := -1;
let y[10] := -1;
let y[11] := -1;
let y[12] := -1;
let y[13] := -1;
let y[14] := -1;
let y[15] := -1;
let y[16] := -1;
let y[17] := -1;
let y[18] := -1;
let y[19] := -1;
let y[20] := -1;
let y[21] := -1;

```

## Exemple de fichier de données

# Classification

The screenshot shows the IDE interface with the following components:

- Project Explorer:** Shows a project named 'classification' with a sub-package 'perturbation' containing 'Classification.java'.
- Structure:** Shows the class hierarchy for 'Classification', including methods like 'calcul(double[] tab)' and 'regulation(double tab)'.
- Source Editor:** Displays the Java code for 'Classification.java' with line numbers 241 to 265. The code includes static variables for solutions, a constructor, and two main methods: 'calcul' and 'regulation'.
- Messages - TreeData:** Shows the output of the program, which consists of several lines of text indicating the execution progress and configuration steps.

```

241 static String sol3 ;
242 static String sol4 ;
243 static String sol5 ;
244 static String sol6 ;
245 static String sol7 ;
246 static String sol8 ;
247 public Classification() {
248     /*d=new Date();
249     o=d.getTime();*/
250 }
251
252 static void calcul(double tab[]) {
253     f = b;
254     double norme;
255     for (int i = 0; i < N; i++) {
256         norme = 0;
257         for (int j = 0; j < 24; j++) {
258             norme = norme + (X[j][i] - tab[j]) * (X[j][i] - tab[j]);
259         }
260         f = f + X[i] * Y[i] * (Math.exp(-0.005 * norme));
261     }
262 }
263
264 static void regulation(double tab[]) {
265     calcul(tab);
  
```

```

C:\Borland\JBuilder2006\jdk1.5\bin\javaw -classpath "C:\Documents and Settings\zidi\Bureau\recherche\classification\classes;C:\Borland\JBuilder2006\jdk1.5\re\lib\plugin.jar;C:\Borl

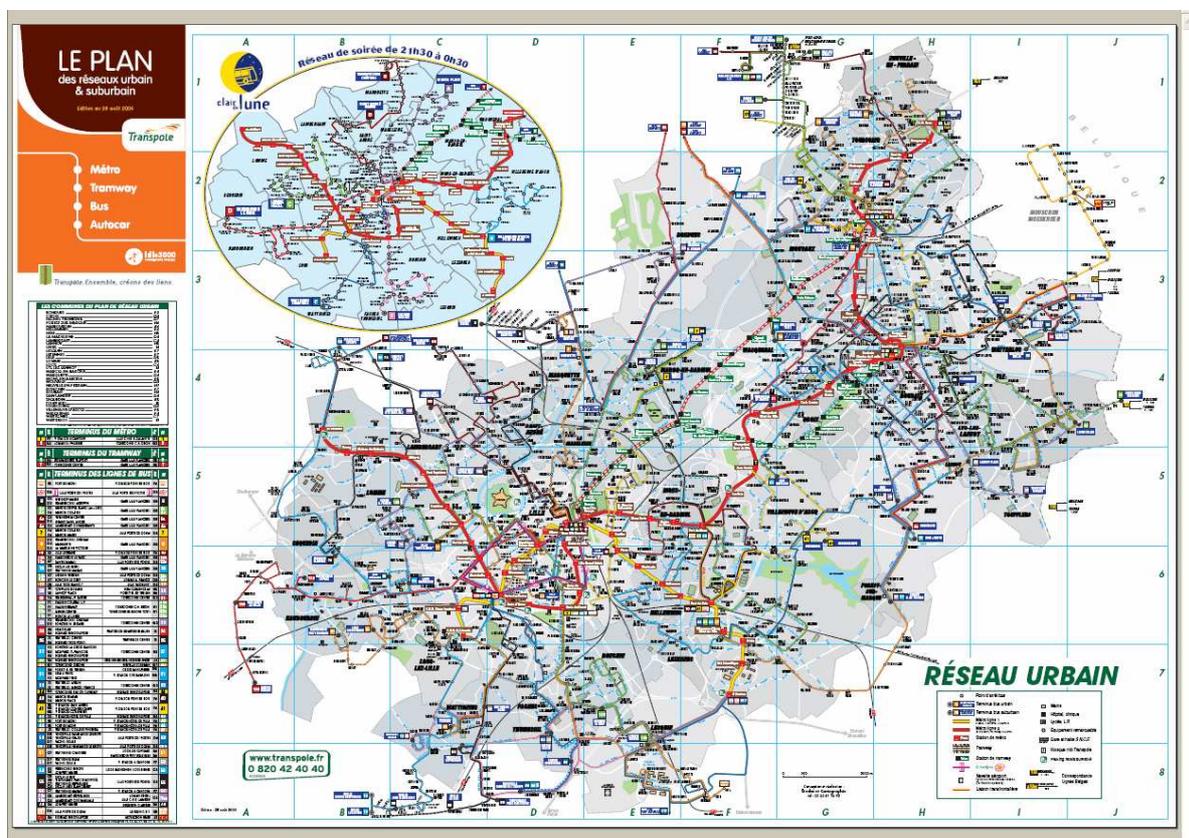
reconfiguration *--* parcour en descente *--* transbordement *--* depassement *--* mod de tp de parcour *--* attente en un pt d'arret *--* demi tour *--* changement par allangement
^-----^
reconfiguration *--* parcour en descente *--* transbordement *--* depassement
^-----^
reconfiguration ** parcour en descente
^--^
reconfiguration
  
```

Exemple d'exécution de l'algorithme de classification SVM

## Annexe 2

## Reconfiguration spatiale

Le réseau de transport de Lille est multimodal avec trois modes de transport : le métro, le bus et le tramway. Il y a dans ce réseau plusieurs pôles d'échange (nœuds de correspondance) entre des modes différents ou des lignes de même mode.



Le plan du réseau urbain de Lille



## Régulation horaire

The screenshot shows the JBuilder 2006 IDE with the following components:

- Project Explorer:** Shows the project structure with 'horaire.java' selected.
- Source Editor:** Displays the Java code for 'horaire.java' with line numbers 154 to 177. The code implements the ACFRH algorithm, including random number generation and iterative calculations.
- Messages Window:** Shows the output of the program, which is a list of time values:
 

```

0 12.53
0 12.31
0 12.37
0 12.43
0 12.49
0 12.55
0 13.01
0 13.07
0 13.13
0 12.51
0 12.57
1 13.04
0 13.1
0 13.16
0 13.22
0 13.28
0 13.34
0 13.11
      
```

Exemple d'exécution de l'algorithme ACFRH

## Quelques lignes utilisées dans les scénarios

### Ligne 1



### Ligne 27



# Tramway



**Résumé :** Il est bien difficile, en temps réel, de suivre les horaires issus du processus de planification des réseaux de transport réalisée en temps anticipé. En effet, l'apparition de perturbations complexes et aléatoires nécessite un traitement rapide à travers un processus de régulation. Dans ce contexte, nous proposons un système d'Aide à la décision nommé SARR (Système d'Aide à la Régulation et la Reconfiguration), pour assister les exploitants dans ces tâches de gestion d'exploitation. Les premières contributions portent sur l'élaboration d'un module d'apprentissage et de classification utilisant la technique S.V.M (Séparateurs à Vaste Marge) pour le diagnostic et la régulation des cas familiers. Mais dans les cas de perturbations plus complexes, simultanées et difficiles à gérer, nous proposons alors une première approche à colonie de fourmis pour la reconfiguration spatiale nommé ACFRS (Algorithme à Colonie de Fourmis pour la Reconfiguration Spatiale). Un autre algorithme est développé pour la régulation horaire appelé ACFRH (Algorithme à Colonie de Fourmis pour la Régulation Horaire). Ces deux approches disposent de bonnes performances en termes de convergence et qualité de solutions, Ces dernières sont prouvées et montrés à travers des scénarii de simulation.

**Mots clés :** Transport multimodal, système d'aide à la décision, régulation, reconfiguration, apprentissage, classification S.V.M, métaheuristique, optimisation, algorithme à colonie de fourmis.

\*-----\*

**Abstract.** It is very difficult, in real-time, to follow schedules given by the planning process of transport networks realized at early time. Indeed, the Appearance of complex and unpredictable disturbances affecting the traffic must be quickly managed through a regulation process. In this context, we propose an Assistant decision system named SARR, to assist the developers in these exploitation management tasks. The first contributions concern the elaboration of a learning and classification module using the technique S.V.M (Support Vector Machines) for the diagnosis and the regulation of the familiar cases. But in the cases of complex and simultaneous disturbances, we propose a first ant colony approach for the spatial reconfiguration named ACFRS (Ant Colony Algorithm for the Spatial Reconfiguration). Another algorithm is developed for the rescheduling, called ACFRH (Ant Colony Algorithm for the Hourly Regulation). These two approaches have good performances of convergence and solution quality. These latter are proved and illustrated by simulation.

**Key words:** multimodal transport, decision support system, rescheduling, reconfiguration, learning, SVM classification, métaheuristique, optimisation, ant colony approach.