

N° d'ordre : 38

**Ecole Centrale de Lille**

**THESE**

présentée pour obtenir le grade de

**DOCTEUR**

**en Automatique et Informatique Industrielle**

par

**Mohamed Mahmoud Ould Sidi**

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

**CONTRIBUTION A L'AMELIORATION DES SYSTEMES D'AIDE A LA  
DECISION POUR LA REGULATION DU TRAFIC DANS LES  
RESEAUX DE TRANSPORT COLLECTIF**

Soutenu publiquement le 12 décembre 2006, devant le jury d'examen :

<b>Rapporteurs :</b>	<b>B. Descotes-Genon</b>	Professeur, IUT de Grenoble
	<b>P. Siarry</b>	Professeur, Université de Paris 12
<b>Examineurs :</b>	<b>A. Jarry</b>	Responsable d'exploitation SEMURVAL
	<b>D. Jolly</b>	Professeur, IUT de Béthune
<b>Directeurs :</b>	<b>P. Borne</b>	Professeur, Ecole Centrale de Lille
	<b>S. Hammadi</b>	Professeur, Ecole Centrale de Lille
	<b>S. Hayat</b>	HDR, Chargé de recherche à l'INRETS

Thèse préparée aux laboratoires LAGIS de l'Ecole Centrale de Lille et ESTAS de l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS).



## ***Remerciements***

Je tiens tout d'abord à remercier monsieur Pierre Borne, professeur à l'école Centrale de Lille directeur de ma thèse pour m'avoir accueilli dans son équipe Ingénierie de Décision (ID) et pour sa rigueur scientifique, son soutien et encadrement constants pendant mes trois années de thèse.

Je remercie chaleureusement le professeur Slim Hammadi, directeur de ma thèse pour ses conseils fraternels, sa disponibilité, son épaulement, et pour son soutien sans faille.

Mes vifs remerciements s'adressent à Monsieur Saïd Hayat, chargé de recherche à ESTAS, INRETS et directeur de ma thèse, qui a le mérite d'avoir guidé mes premiers pas dans la recherche et qui n'a jamais cessé de m'encourager et me diriger durant toute la période de mon stage de DEA et de ma thèse.

J'adresse ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements aux professeurs Patrick Siarry, professeur à l'université de Paris 12 et Bernard Descotes-Genon, professeur à l'IUT de Grenoble, rapporteurs de ce travail de recherche, pour avoir accepté de juger ma thèse et pour leurs conseils et critiques très précieux qui m'ont bien aidé à améliorer à la fois la qualité et la forme de mon rapport.

Mes remerciements et toute ma gratitude s'adressent à Monsieur Daniel Jolly, professeur à l'IUT de Béthune et à Monsieur Antoine Jarry responsable de l'exploitation à la SEMURVAL pour l'intérêt qu'ils ont accordé à mon travail en acceptant d'en être les examinateurs.

Un remerciement particulier à mes collègues doctorants : Kamel et Salah Zidi, Amine et Sana Kamoun, Ryan Kammarti et Bisma Glaa. A vous tous, je dis merci mille fois. Merci pour vos plats tunisiens bien préparés et pour votre soutien et conseils fraternels. Vous resterez toujours un des meilleurs souvenirs de cette thèse et les meilleurs ambassadeurs de la Tunisie en France.

Que le personnel du LAGIS soit remercié pour leur sympathie et pour les moments inoubliables que nous avons passé ensemble. Merci de votre enthousiasme et de vos aides précieuses. Je remercie Mme M.F Tricot pour sa veille sur mon français pas terrible et pour tout ce qu'elle a pu m'apporter. Merci à Régine, Bernard, Jacques, Patrick, Brigitte et Laetitia, sans oublier bien sûr mon Chef : Hilaire.

Je remercie du fond de mon coeur les membres du service de personnel pour leur accueil toujours aussi chaleureux et la simplification de toutes mes démarches administratives et mes ordres de mission.

Toute ma reconnaissance et mes sincères remerciements s'adressent aussi aux membres d'ESTAS et particulièrement à Valérie Schellaert et à Nathalie Bourbotte qui ont toujours su m'aider et être à mon écoute.

Aucune expression ne peut exprimer mes remerciements et ma reconnaissance et affection pour mes parents et mes proches : frères et sœurs qui m'ont épaulé depuis mon jeune âge et qui ont fait d'énormes sacrifices pour que je puisse terminer mes études dans les meilleures conditions. Je leurs dédie avec plaisir ce modeste travail en témoignage de mon amour et ma reconnaissance, en espérant être à la hauteur de leurs attentes.

*A mes parents*  
*A mes frères et sœurs*  
*A toute ma famille et tous mes amis*  
*A tous et à toutes qui m'ont aidé un jour dans mon cursus scolaire et universitaire*

## Table de Matières

Introduction générale.....	8
Chapitre I. Planification et régulation du trafic d'un réseau de transport collectif : problématique et état de l'art.....	12
1.1 Introduction .....	13
1.2 La multimodalité dans le domaine du transport urbain.....	14
1.2.1 Multimodalité et intermodalité d'un réseau de transport .....	14
1.2.2 Recherche liée aux réseaux de transport multimodaux .....	15
1.3 Processus de planification .....	16
1.3.1 Problématique de la planification.....	16
1.3.2 Approches de planification.....	18
1.4 Processus de régulation .....	19
1.4.1 Problématique de la régulation.....	19
1.4.2 Système d'aide à l'exploitation .....	22
1.4.3 Logiques et manœuvres de régulation.....	27
1.5 Système d'aide à la décision (SAD).....	31
1.5.1 Pourquoi un système d'aide à la décision ?.....	31
1.5.2 Les systèmes d'aide à la décision.....	32
1.5.3 Rôle d'un SAD pour la régulation du trafic d'un réseau de transport urbain ..	33
1.5.4 Outils et approches de régulation .....	34
1.6 Projet de recherche coopérative .....	42
1.6.1 Cahier des charges et architecture retenue .....	43
1.6.2 Communications et échanges entre les modules .....	44
1.7 Conclusion.....	45
Chapitre II. Modélisation, formulation mathématique et méthodologies de résolution du problème de régulation.....	46
2.1 Introduction .....	47
2.2 Modélisation et représentation des réseaux de transport.....	47
2.2.1 Modélisation par graphes .....	47
2.2.2 Modélisation par réseaux de Pétri .....	48
2.2.3 Modélisation par systèmes multi-agents .....	50
2.3 Formulation mathématique .....	52
2.3.1 Détermination de l'horizon spatio-temporel de la régulation .....	52
2.3.2 Variables de décision .....	55
2.3.3 Les critères .....	57
2.3.4 Les contraintes.....	63
2.3.5 Caractéristiques du modèle mathématique.....	65
2.4 Aide à la décision multicritère .....	66
2.4.1 Complexité des problèmes réels d'aide à la décision.....	67
2.4.2 Démarches et méthodes de résolution d'un problème d'aide à la décision ....	68
2.5 Module d'aide à la décision proposé.....	72
2.5.1 Génération de décisions .....	73
2.5.2 Evaluation des décisions .....	73
2.6 Conclusion.....	73
Chapitre III. Approches évolutionnaires de résolution proposées pour la régulation en ligne du trafic.....	75
3.1 Introduction .....	76
3.2 Les métaheuristiques .....	77
3.2.1 Recuit simulé.....	77

3.2.2	Recherche tabou .....	78
3.2.3	Algorithmes évolutionnaires .....	78
3.3	Approches évolutionnaires proposées pour la régulation en ligne.....	87
3.3.1	Objectif.....	87
3.3.2	Codage proposé .....	87
3.3.3	Opérateur de sélection choisi .....	89
3.3.4	Opérateur de croisement choisi .....	90
3.3.5	Opérateur de mutation choisi .....	91
3.3.6	Approche agrégative classique.....	92
3.3.7	Agrégation par intégrale de Choquet .....	98
3.3.8	Approche basée sur l'épsilon dominance.....	103
3.3.9	Approche basée sur la Pareto dominance.....	105
3.4	Conclusion.....	107
Chapitre IV.	Applications et résultats .....	108
4.1	Introduction .....	109
4.2	Scénario 1 : Perturbation touchant une seule ligne .....	111
4.2.1	Exemple 1 : .....	111
4.2.2	Exemple 2 : .....	114
4.3	Scénario 2 : Perturbation touchant deux lignes.....	117
4.3.1	Exemple 3.....	117
4.3.2	Exemple 4.....	120
4.3.3	Exemple 5.....	123
4.4	Scénario 3 : Perturbation touchant trois lignes.....	126
4.4.1	Exemple 6 : .....	126
4.4.2	Exemple 7 : .....	129
4.5	Scénario 4 : Perturbation touchant quatre lignes.....	132
4.5.1	Exemple 8 : .....	132
4.5.2	Exemple 9 : .....	135
4.6	Conclusion.....	138
	Conclusions et perspectives .....	140
	Glossaire.....	143
	Références Bibliographiques.....	145
	Annexe : Illustrations des différentes tâches réalisées par le module d'aide à la décision ....	158

## Introduction générale

Dans notre monde d'aujourd'hui, la mobilité des personnes, qu'il s'agisse des déplacements interurbains, domicile-travail ou domicile-loisirs, est de plus en plus importante. Malheureusement, les problèmes d'explosion démographique, de pollution, d'étalement urbain, et de circulation difficile dans les villes de grandes et de moyennes tailles ne favorisent pas cette mobilité. L'un des meilleurs compromis à ce dilemme est l'incitation des citoyens à l'utilisation des transports en commun, qui doivent être rapides et confortables. Cependant, l'exigence de la clientèle est de plus en plus difficile à satisfaire en termes d'innovation et d'amélioration de la qualité de service. Les usagers, qui n'acceptent pas toujours la dépendance vis-à-vis des horaires, sont de plus en plus exigeants envers les exploitants de réseaux de transport. Pour ces derniers, le processus d'exploitation doit réagir à travers un modèle d'aide à la décision efficace pour pallier aux perturbations qui peuvent dégrader la qualité de service. Productivité et réactivité se doivent, alors, de faire bon ménage !

En outre, les exploitants des réseaux de transport collectif urbain sont contraints de respecter une réglementation très stricte. Ils sont placés sous le contrôle et la tutelle des autorités publiques et des collectivités territoriales, qui leurs payent des subventions, qui contrôlent la qualité du service rendu aux usagers et qui prévoient des sanctions, au cas où ce service est jugé défectueux. Nous pouvons encore citer, les organisations syndicales qui deviennent un autre acteur majeur dans ce domaine, et qui peuvent être source de perturbations, s'ils choisissent la voie des grèves (cas de la RTM Marseille en 2005: plus d'un mois de grève). Pour toutes ces raisons, les exploitants des réseaux de transport se doivent de trouver des solutions plus rapides et efficaces pour dissiper des perturbations de plus en plus gênantes, et donc d'améliorer la qualité des services offerts aux voyageurs, en respectant au maximum les horaires théoriques annoncés. Ils doivent aussi profiter de l'évolution technologique dans le domaine informatique pour définir et concevoir de nouveaux outils de gestion, qui leurs permettent la collecte et la mise en forme des informations disponibles sur l'ensemble du réseau de transport. Ainsi, l'apparition des Systèmes d'Aide à l'Exploitation (SAE) a beaucoup aidé les régulateurs à mieux accomplir leur mission. Ces systèmes permettent le suivi en temps réel de l'exploitation d'un réseau de transport urbain et ils ne cessent d'évoluer, grâce notamment aux progrès technologiques dans les domaines des communications et du traitement de l'information. Les SAE peuvent traiter des quantités très importantes d'informations, mais, malgré leur aide très précieuse, 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. Un système d'aide à la décision (SAD) s'avère donc nécessaire, afin d'aider les régulateurs à mieux maîtriser leur métier, et par conséquent, à prendre des décisions pertinentes pour la régulation du trafic.

Le présent travail de recherche s'inscrit dans le cadre d'un projet du Groupement Régional Nord-Pas de Calais pour la Recherche dans les Transports (G.R.R.T), intitulé : *Amélioration de la qualité des correspondances dans les réseaux de transport urbains*. 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 la SEMURVAL (exploitant du réseau de transport collectif de la ville de Valenciennes et de ses environs). Le projet vise à minimiser les temps d'attente des usagers des réseaux de transport urbain. Notre étude concerne le mode normal et le mode perturbé du trafic des différentes lignes du réseau de transport de la SEMURVAL. Dans un premier temps, les partenaires de ce projet ont partagé les tâches de la façon suivante : régulation de trafic en interstations, régulation de trafic aux nœuds de correspondances, gestion des flux de passagers, information voyageurs et simulation du trafic sur le réseau. Chaque partenaire utilise une approche scientifique adéquate pour résoudre une partie du problème et développe un module correspondant. Parmi les méthodes utilisées, nous pouvons citer celles qui sont basées sur les réseaux de Pétri [Mesghouni 02], la logique floue [Chihaib 00], les systèmes multi-agents [Laichour 02] ou encore les algorithmes évolutionnaires [Fayeche 03] [Dridi 04].

L'objectif final est d'intégrer tous ces modules pour la réalisation d'un système d'aide à la régulation du trafic permettant d'assister les régulateurs et de faciliter leur tâche de prise de décision. Ce système doit être, à son tour, intégré dans les postes de travail des régulateurs et d'utilisation facile. L'impact de ce système sur les voyageurs sera de minimiser leur temps d'attente, en mode dégradé, dans les pôles d'échanges et de leur assurer, dans la mesure du possible, la continuité de leurs déplacements dans ce réseau de transport multimodal (Bus, tramway et trains). Il s'agit donc d'améliorer la qualité de service rendu aux voyageurs et de les maintenir informés.

L'apport de notre équipe dans ce projet collectif concerne le développement d'un module d'aide à décision pour la génération et l'évaluation des stratégies de régulation. Les approches proposées pour atteindre un tel objectif sont basées sur les algorithmes évolutionnaires et la théorie des sous-ensembles et intégrales flous. En effet, ces théories scientifiques du domaine de l'automatique et de l'informatique industrielle ont fait leurs

preuves par ailleurs, elles intègrent l'homme dans la boucle de la prise de décision, et elles contribuent à résoudre le problème posé et à améliorer la qualité du service rendu aux usagers des réseaux de transport urbain.

Notre choix de la logique floue est justifié par le fait que, dans les réseaux de transport, on dispose souvent d'un ensemble d'informations pris au sens d'un ensemble d'éléments en relation les uns avec les autres et interférant avec leur environnement. Les connaissances dont nous disposons sur ces systèmes sont parfois entachées d'incertitude et d'imprécision, ce qui perturbe le pilotage et la régulation de ces « systèmes ». De ce fait, il est très important de pouvoir modéliser et représenter ces informations imprécises. En outre, la réalisation d'un système d'aide à la décision pour la régulation du trafic de transport passe nécessairement par l'acquisition des connaissances du poste de régulation. La théorie des sous-ensembles flous a été proposée comme une théorie rationnelle de modélisation et de manipulation de la connaissance incertaine, présentant un bon compromis entre la souplesse d'emploi et la puissance de représentation.

D'autre part, le choix des algorithmes évolutionnaires est dû à l'échec des méthodes de résolution exactes dans le traitement de la régulation. Ces algorithmes nous aident à trouver des solutions proches de l'optimum pour un problème d'optimisation NP-difficile, en un temps de calcul beaucoup moins important que celui nécessaire à la mise en œuvre des autres méthodes dites exactes.

Avant de préciser le contenu et l'organisation de ce mémoire, nous souhaitons d'ores et déjà poser quelques restrictions concernant notre champ d'investigation et préciser les limites que nous nous sommes fixées dans ce travail. Signalons tout d'abord que nous ne traitons pas ici le cas d'une reconfiguration complète du réseau, mais nous nous plaçons à la limite de ce cas. Nous n'avons pas non plus touché au module d'informations de voyageurs. Une autre restriction concerne les interfaces graphiques et les aspects des interfaces Homme-Machine, qui sont la spécialité et la part du travail d'une autre équipe.

Ce mémoire, composé de quatre chapitres, commence par un état de l'art sur la gestion des réseaux de transport collectif multimodaux. Nous y abordons notamment le processus de planification et d'exploitation d'un réseau de transport collectif et nous exposons les outils nécessaires pour la conception du système d'aide à la régulation. Dans le deuxième chapitre, nous présentons les différents modèles attribués aux réseaux de transport multimodaux tels que ceux relevant la théorie de graphes, des systèmes multi-agents, des réseaux de Pétri, etc. Nous présentons aussi la caractérisation mathématique du problème traité. Nous décrivons les variables de décision liées à la régulation du trafic d'un réseau de transport collectif urbain,

ainsi qu'une nouvelle formulation mathématique du problème traité. Les approches et les méthodes proposées pour la résolution de ce problème sont présentées au chapitre 3. Le quatrième chapitre de ce mémoire est consacré aux résultats de notre recherche, tant sur le plan théorique que pratique. Ainsi, nous illustrons la mise en œuvre des différentes approches et méthodes proposées à travers les résultats de simulation, afin d'évaluer leur performances sur quelques scénarii réels de perturbations de natures différentes. Enfin, la conclusion générale met en valeur les apports de cette étude et présente des perspectives de notre travail.

**Chapitre I. Planification et régulation du trafic d'un réseau de transport collectif : problématique et état de l'art**

## 1.1 Introduction

Les transports des personnes et des biens ont toujours été au centre des préoccupations des responsables et élus des collectivités locales, car la qualité des transports urbains constitue un élément essentiel de la compétitivité [Hayat 05]. Ainsi, pour répondre au mieux à la demande croissante de transport, plusieurs systèmes ont été mis en place. Ces systèmes varient selon les lieux géographiques et les coûts d'exploitation des infrastructures qui leur sont dédiées.

Cependant, bien que les exigences en matière de confort et de sécurité soient les aspects les plus préoccupants et que la fiabilité et la ponctualité du transport retiennent elles aussi l'attention de décideurs, la croissance de la mobilité et l'allongement des distances parcourues se sont traduits, ces dernières années, par une forte augmentation de l'utilisation des véhicules particuliers, au détriment des transports collectifs.

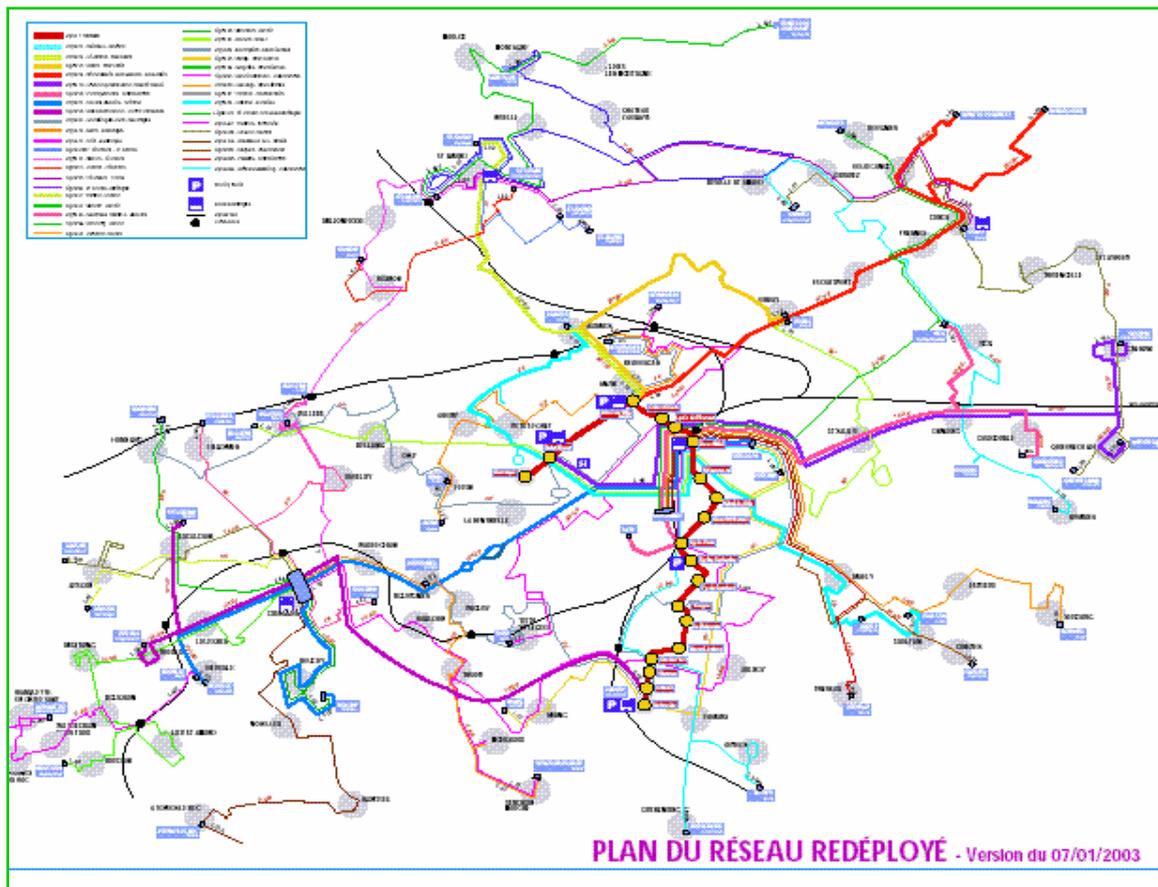
Nous commençons ce chapitre par aborder les notions de multimodalité et d'intermodalité dans les réseaux de transport collectif, qui font l'objet de différentes thématiques de recherche liées à l'aménagement des réseaux, à la gestion conjointe des différents modes de transport, à l'information multimodale et à la planification et la régulation du trafic. Afin de saisir l'importance et la complexité de la problématique de la planification du trafic d'un réseau de transport collectif, nous la présenterons dans la deuxième partie de ce chapitre. Il s'agit, en effet de la construction des différents horaires de passage et des listes de service du personnel à travers des tâches d'ordonnancement, en tenant compte des ressources de l'entreprise. Par ailleurs, puisque le processus de planification ne s'appuie que sur des estimations prévisionnelles des durées de parcours et des conditions de circulation et puisque divers aléas peuvent affecter le trafic, il est nécessaire de prendre des mesures de régulation pour pallier aux perturbations. La troisième partie de ce chapitre traite alors la problématique, les manœuvres et les critères de régulation. Nous achevons ce chapitre par la mise en évidence de la nécessité d'un système d'aide à la régulation pour assister les régulateurs dans leur mission. Auparavant, les différents outils et approches existants pour l'aide à la décision dans ce domaine seront exposés.

## **1.2 La multimodalité dans le domaine du transport urbain**

### **1.2.1 Multimodalité et intermodalité d'un réseau de transport**

Un réseau de transport collectif urbain est dit multimodal s'il conjugue plusieurs modes de transport tels que bus, métro et tramway. La connexion entre ces modes est assurée par la présence de pôles d'échange ou de nœuds de correspondance, au niveau desquels il y aura éventuellement des échanges de voyageurs entre deux ou plusieurs véhicules à différents horaires de la journée (fig. 1.1). La multimodalité d'un réseau de transport collectif devient de plus en plus indispensable dans les zones à haute densité populaire, qui engendrent un plus grand nombre de déplacements et qui sont généralement d'accès difficile pour certains modes de transport en heure d'affluence, ou à cause des conditions de circulation [Fayech 03]. Il s'agit là en l'occurrence des modes de transport non guidés, dont le plus connu est l'autobus. Pour ces systèmes, les itinéraires sont nettement plus flexibles et ce mode permet de desservir des zones à faible densité avec un coût d'exploitation peu important. Cependant, l'inconvénient majeur de systèmes de transport non guidés est leur dépendance des conditions de circulation, ce qui n'est pas le cas des systèmes de transport guidés tels que le métro, qui nécessitent, néanmoins, une infrastructure beaucoup plus complexe. Le tramway est aussi un mode de transport guidé, mais qui dépend plus ou moins des conditions de circulation, puisqu'il emprunte parfois les voies routières [Dridi 04]. Ainsi, l'exploitation simultanée de ces différents modes résulte en un réseau fortement maillé et donc plus difficile à gérer hors-ligne et en ligne.

Une autre notion importante et d'actualité est celle d'intermodalité, dont on parle quand il s'agit de conjuguer les réseaux multimodaux de transport terrestre, dits aussi de surface, avec d'autres modes de transport individuel, tels que les voitures particulières ou les bicyclettes. En effet, pour des raisons économiques et écologiques, les plans de déplacement urbain traduisent des politiques ambitieuses en matière d'amélioration de l'usage des transports en commun et de diminution de l'usage des voitures particulières. La réussite de ces plans repose sur une stratégie 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.



**Figure 1.1 Réseau de transport multimodal de Valenciennes et de ses environs.**

### 1.2.2 Recherche liée aux réseaux de transport multimodaux

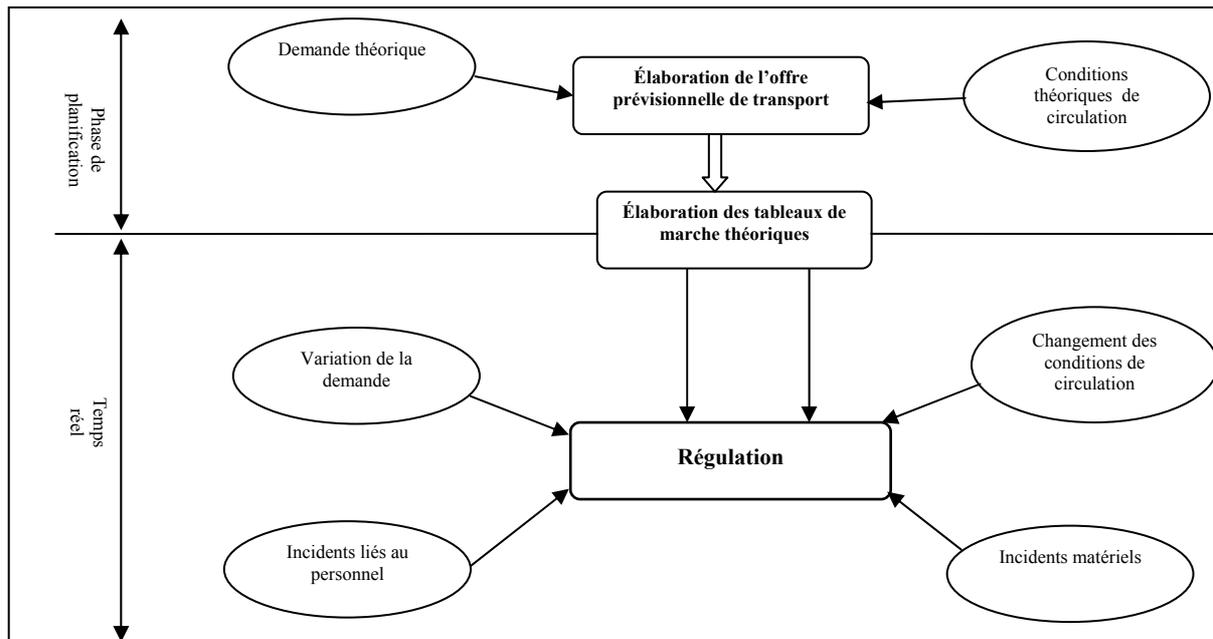
Plusieurs études liées à la multimodalité et l'intermodalité ont été réalisées ces dernières décennies. Elles traitent des problématiques allant de l'aménagement des réseaux jusqu'à leur exploitation en temps réel, en passant par la planification du trafic. Ainsi, lors de l'aménagement des infrastructures routières et des réseaux de transport, l'intermodalité a pour objectif de faciliter et d'optimiser les déplacements et les échanges entre les modes de transport public et individuel par l'aménagement des pôles d'échange [Fayech 03]. A titre d'exemple, offrir aux usagers des parkings gratuits au niveau des terminus des lignes de métro ou de tramway favorisera l'emprunt du transport en commun. D'autre part, en phase de planification, pour garantir aux usagers un service de qualité optimale et éviter les conflits dus à une gestion décentralisée, il est très utile de prévoir un échange à travers un support intermodal entre les différents systèmes d'aide à l'exploitation du réseau de transport, surtout en conditions dégradées ou de crise (congestion, panne, grève, etc.). L'autre axe de recherche lié aux notions de multimodalité et d'intermodalité concerne les systèmes d'information multimodale de voyageurs. En fait, l'apparition de nouveaux médias et les avancées en termes

de collecte et de diffusion d'informations issues des nouvelles technologies font que les usagers de transport collectif souhaitent être informés davantage et d'une manière fiable avant et pendant leurs déplacements. Ainsi, quelques études récentes [Danflous 01] [Meskine 01] [Benkhaled 05] ont traité ces systèmes d'information multimodale qui visent, entre autres, à réduire l'incertitude des voyageurs et, dans la mesure du possible, à accroître l'attractivité du transport en commun, au bénéfice d'une utilisation optimale des infrastructures et d'une priorité aux transports collectifs. Dans notre équipe de recherche, outre les travaux de Benkhaled, K. Zidi a proposé dans le cadre de sa thèse de doctorat, un système interactif d'aide au déplacement multimodal. Le système développé repose sur une modélisation multi-agents et hybride des algorithmes génétiques et un algorithme de type Dijkstra pour obtenir les chemins les plus rapides et le plus confortables aux yeux des usagers [Zidi 04][Zidi 05].

### **1.3 Processus de planification**

#### **1.3.1 Problématique de la planification**

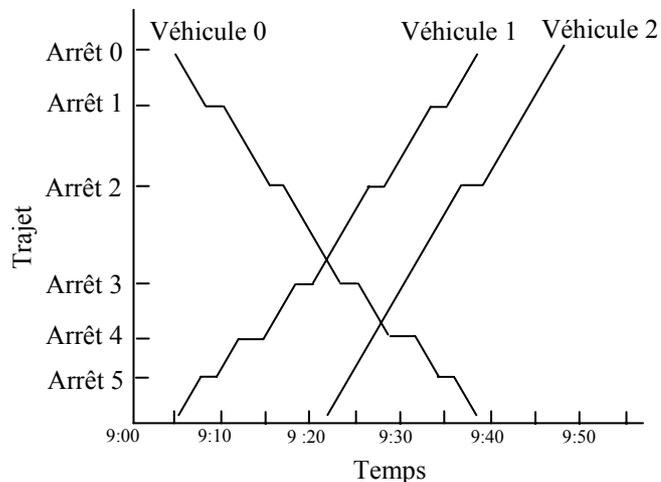
L'exploitation d'un réseau de transport collectif comprend essentiellement deux grandes parties (fig. 1.2). Après l'élaboration du programme de production par la mise en place d'un tableau de marche théorique (TMT), vient la partie la plus difficile, qui est la régulation de trafic : c'est une adaptation du programme aux conditions réelles, qui se concrétise par un tableau de marche commandé en temps réel. Celui-ci fonctionne selon les stratégies de régulation adoptées par les régulateurs et les experts du réseau de transport urbain. Plus précisément, il s'agit là du processus d'actualisation en temps réel du tableau de marche (TM) en tenant compte de conditions d'exploitation [Soulhi 00][Laichour 02]. En fait, l'objectif du processus de planification est d'établir une offre prévisionnelle de transport qui s'ajuste à la demande. Ainsi, la configuration initiale des lignes du réseau et leurs fréquences sont fixées, et les durées des trajets entre les différents points du réseau sont estimées. A partir de ces données, des tableaux horaires sont établis et des courses (affectation d'un véhicule à un itinéraire) correspondant aux temps et lieux d'arrivée et de départ sont aussi déterminées. Vient ensuite l'étape de l'affectation de ces courses aux véhicules, consistant en une tâche d'ordonnancement statique, à l'issue de laquelle un ensemble de courses est attribué à chaque véhicule de la flotte. Par ailleurs, la gestion du personnel est aussi réalisée lors de la planification pour fixer les fiches horaires journalières de service des conducteurs et des régulateurs, ainsi que les différentes relèves.



**Fig. 1.2. Processus d'exploitation d'un réseau de transport collectif.**

Le résultat de cette étape de planification est alors traduit en listes de service pour les différents intervenants de l'exploitation, et aussi en tableaux de marche théoriques. Ces TMT représentent les différents horaires de passage des véhicules aux arrêts du réseau et sont établis en tenant compte de la période de la journée (heures de pointe ou creuse), du type de journée (jour férié, semaine, week-end, etc.), de la période de l'année (vacances scolaires, saisons), des conditions météorologiques et surtout des contraintes d'exploitation (nombre de véhicules, travaux prévus, durées de stationnement et de correspondances). La production des TMT est assurée par les graphistes qui les illustrent par des graphiques horaires pour les véhicules, selon le temps et la distance. L'évolution de chaque véhicule y est représentée par une droite discontinue entre son origine et sa destination et dont la pente traduit la vitesse moyenne entre des stations successives (fig. 1.3). La longueur de chaque segment horizontal est égale à la durée de stationnement à la station courante [Fayech 03]. Plusieurs équipes de recherche ont essayé d'apporter leur aide aux exploitants des réseaux de transport collectif dans le but de créer des tableaux de marche théoriques optimaux, qui maximisent la qualité de service et réduisent les coûts d'exploitation, en utilisant souvent, des heuristiques inspirées de la recherche opérationnelle. La planification est en fait souvent considérée comme un axe particulier des problèmes d'ordonnancement et de tournées de véhicules, qui traite entre autres les problèmes de la livraison à domicile, de la collecte des déchets ménagers urbains, du transport spécifique des écoliers ou handicapés [Fayech 03]. Dans ce cadre, quelques outils informatiques développés pour ce type de problèmes sont utilisés par les compagnies de

transport, on peut citer ici HASTUS [Rousseau 85], IMPACTS [Smith 88], HOT [Daduna 88], TRACS II [Kwan 97] et GIST [Lourenço, 01].



**Fig. 1.3. Graphique des horaires de véhicules.**

### 1.3.2 Approches de planification

Comme nous l'avons signalé auparavant, la première étape de la modélisation d'un réseau de transport est l'estimation des flux de voyageurs (évaluation de la demande et analyse du besoin) se basant sur les matrices origine-destination, résultant d'enquêtes auprès des usagers, d'études statistiques et des systèmes électroniques de comptage existants au niveau des véhicules et des arrêts. Cependant, plusieurs approches de planification du transport s'appuient sur des modèles stochastiques de la demande et sur la théorie des files d'attente pour estimer les durées des attentes des voyageurs aux arrêts [Afanassieva 96][Barla 00].

D'autres études reposent sur les principes de l'écoulement du trafic, surtout quand les véhicules particuliers sont pris en considération. Elles recherchent l'équilibre statique entre l'offre et la demande en terme de débit ou de flot sur les différents itinéraires routiers [Lebacque 02] [Wynter 03] [EL-Hmam 05]. Par ailleurs, le choix des lignes d'un réseau de transport public s'appuie sur des techniques d'optimisation qui concernent la longueur des itinéraires et la localisation des dépôts. En fait, l'ordonnancement des véhicules prend aussi en considération leur affectation au dépôt à la fin de leurs courses, en minimisant le temps de parcours à vide. L'existence de plusieurs dépôts rend le problème encore plus complexe, il est appelé alors problème d'ordonnancement multi-dépôt [Huissman 01] [Wren 98] [Zhu, 95].

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

Le problème des correspondances entre les différentes lignes d'un réseau de transport collectif a aussi été traité dans [Deb 98], [Chakroborty 95] [Kidwai 05], [Park 05] par des approches s'appuyant sur les algorithmes génétiques. Dans [Fan 04] a été proposée une heuristique basée sur une recherche tabou pour ce même problème. Un algorithme génétique a été utilisé dans [Ngamchai 00] pour construire les différentes routes des véhicules, en même temps que leurs horaires, en optimisant les coûts de la gestion de la flotte des véhicules, de l'attente des voyageurs et les coûts liés à la présence des voyageurs à bord des véhicules (durée du parcours. D'autre part, la gestion du personnel a fait aussi l'objet de plusieurs recherches depuis plus d'une trentaine d'années. Il s'agit en fait de fixer les horaires de service des différents conducteurs, ainsi que les heures et lieux de relève, en minimisant les heures supplémentaires et les durées des relèves. Wren et al. [Wren 00] ont proposé une approche génétique hybride pour l'affectation des conducteurs des bus et des trains. Une approche combinée d'ordonnement des véhicules et du personnel, basée sur la programmation linéaire, est aussi présentée dans [Valouxis 01]. Lourençau a développé une approche utilisant un algorithme de recherche tabou pour l'ordonnement des véhicules et du personnel [Lourençau 01].

## **1.4 Processus de régulation**

### **1.4.1 Problématique de la régulation**

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

- les régulateurs, travaillant au Poste de Commande Central (PCC) ou au Poste de Commande Local (PCL), selon le mode d'organisation du réseau,
- les conducteurs,
- les agents de surveillance et d'intervention présents sur l'itinéraire de la ligne.

Cependant, la responsabilité première de la régulation incombe au régulateur, qui a la vision la plus globale de l'état du réseau, car c'est vers lui que convergent tous les canaux de communication. Les actions des autres intervenants du processus, qui n'ont qu'une version fragmentaire des événements, ne présentent pas le même caractère systématique et ne sont en principe réalisés qu'après accord du régulateur ; leur rôle est par contre déterminant dans l'information du régulateur [OuldSidi 03].

Une autre caractéristique du travail du régulateur est la nécessité d'anticiper l'évolution des perturbations et leurs conséquences sur le fonctionnement de la ligne. En effet, comme le montre le schéma de la figure 1.4, plus le régulateur agit tôt, mieux il peut prévenir la dégradation de l'état du réseau (système), qui tend à s'éloigner de l'optimum. Le travail d'un régulateur est en fait un travail complexe, qui peut être décomposé en quatre phases principales : acquisition des informations, analyse de ces informations, prise de décision et application de cette décision :

a) L'acquisition de connaissances :

Cette partie est capitale dans la notion de régulation. C'est une phase de diagnostic, qui consiste à détecter et analyser les perturbations, afin d'évaluer leur gravité. Avant de proposer des stratégies de régulation de trafic, le régulateur s'appuie sur des critères tels que l'état des véhicules en correspondance (retard/avance) et leur charge. Ces informations représentent la base de la régulation, il est donc nécessaire qu'elles soient bien définies. Elles proviennent de deux sources principales : du Système d'Aide à l'Exploitation (SAE), et de la communication directe avec les chauffeurs, qui rendent compte au régulateur de toutes les informations disponibles et jugées utiles, telles que les incidents,

b) L'analyse des connaissances :

Après la phase de diagnostic, le régulateur trie les informations et garde celles qu'il juge déterminantes. Cette opération se fait généralement d'une façon traditionnelle, en s'appuyant sur l'expérience professionnelle ou quelquefois sur des règles de régulation préalablement définies.

c) La prise de décision :

Suite à l'opération de l'analyse des connaissances, le régulateur fait appel à son savoir-faire pour proposer des stratégies de régulation. Tout en respectant les impératifs de qualité de

service, prédéfinies en collaboration avec les responsables du réseau, ainsi que les contraintes d'exploitation, il peut donc ordonner des manœuvres aux chauffeurs, suivant la nature et la gravité des perturbations. Il peut aussi ne pas intervenir, s'il juge que l'incident n'a pas d'impact important sur le réseau, ni sur la satisfaction des clients du transport en commun,

d) La mise en application :

Après avoir défini les stratégies de régulation, le régulateur les transmet et ordonne aux chauffeurs d'appliquer les différentes manœuvres de régulation correspondantes, par communication directe par le biais de la radio. En retour d'information, les chauffeurs rendent compte au régulateur de l'impact des décisions prises sur l'état du réseau et des conséquences sur les véhicules, et éventuellement sur les clients (flux de passagers non absorbé, par exemple). Ces différentes tâches qu'effectue le régulateur montrent la complexité du poste de régulation de trafic d'un réseau de transport, surtout lorsqu'il s'agit de gérer plusieurs incidents produits simultanément. D'où la nécessité d'un modèle d'aide à la décision, à la fois consistant et convivial, pour modéliser et représenter l'information incertaine sur les incidents, et pour analyser et proposer des stratégies de régulation. L'objectif du module d'aide à la décision consiste alors, à partir des informations fournies par le SAE, à élaborer, évaluer et proposer des solutions efficaces au régulateur. Ainsi, la tâche de celui-ci sera allégée, ce qui améliorera la qualité de la régulation. Bien sûr, ce système d'aide à la décision ne prétend pas remplacer le régulateur, mais il doit apporter une aide dans la prise en compte des événements importants et dans la prise de décisions, décisions dont le régulateur sera toujours le maître.

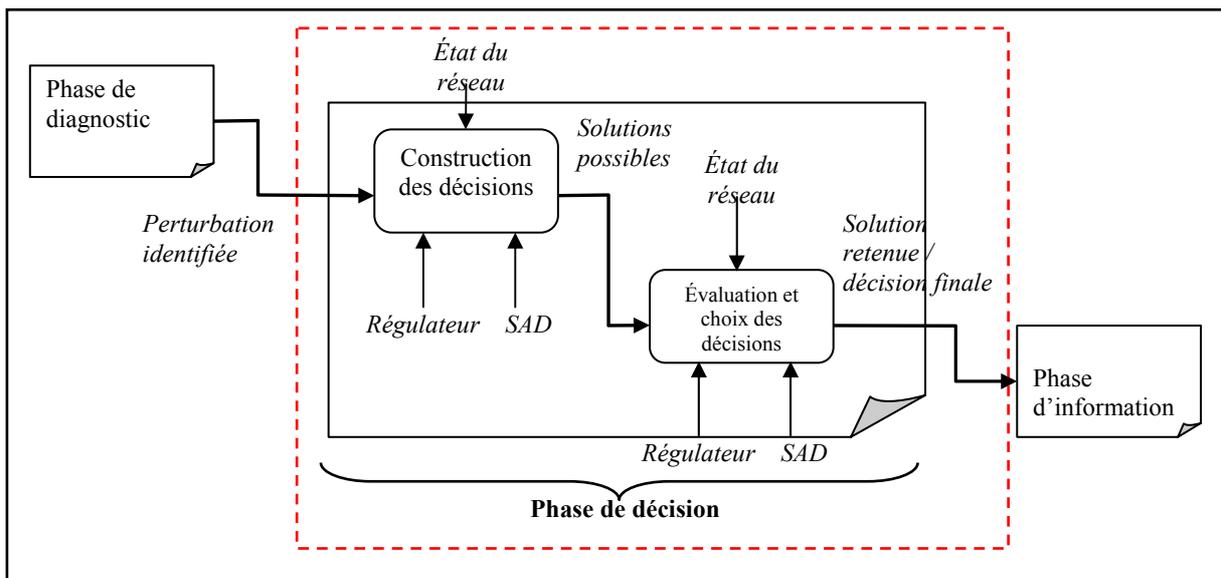


Fig. 1.4 Étapes de la prise de décision.

## **1.4.2 Système d'aide à l'exploitation**

### **1.4.2.1 Historique**

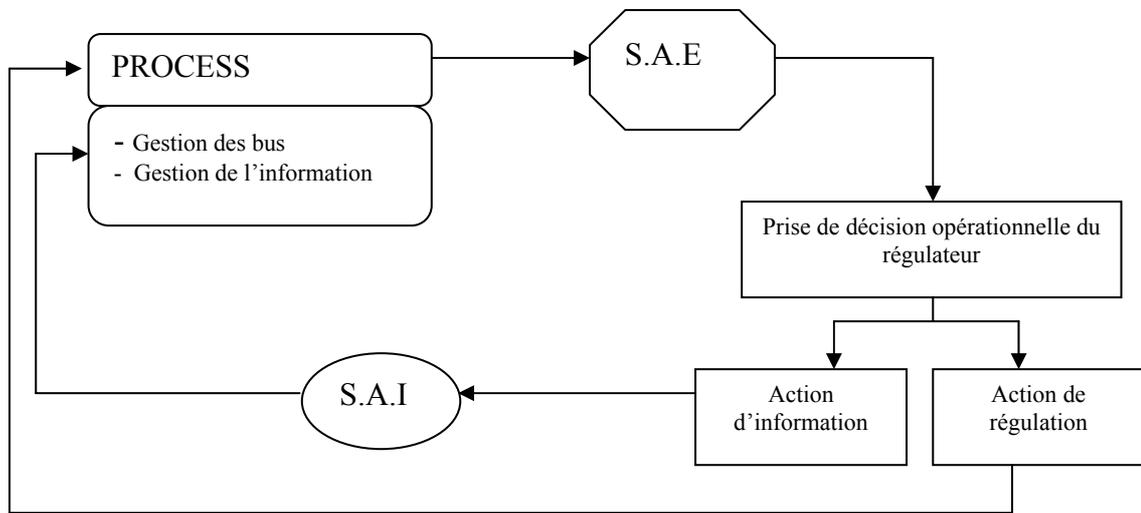
La gestion en temps réel des réseaux de transports urbains a connu plusieurs phases de développement. A l'origine, l'exploitation commerciale du transport urbain était largement décentralisée. Des agents de surveillance étaient placés à certains arrêts stratégiques du réseau, afin d'observer les passages réels des bus aux temps convenus dans le tableau de marche de base. L'exploitation était gérée sur la base des informations récoltées par ces agents de surveillance. En cas de perturbations très importantes, ils informaient la centrale par des appels téléphoniques [Ouldsidi 03].

La principale caractéristique de la deuxième phase du développement de l'aide à l'exploitation réside dans l'utilisation de la radiophonie. L'aide à l'exploitation centralisée et la surveillance ont dès lors pris de plus en plus d'importance. Ainsi, le chauffeur peut communiquer directement au poste central toute perturbation produite sur son trajet ou toute irrégularité du service. Par radio, les régulateurs obtiennent une vue plus au moins globale du réseau et de la localisation des véhicules, ainsi que de leur situation à partir du poste de commandement central (PCC). Comme l'a montré la pratique, le fort accroissement des tâches du transport urbain, surtout aux heures de pointe, surcharge les régulateurs, qui ne peuvent presque plus garantir le déroulement correct de l'exploitation par la seule radiophonie. Dès lors, les entreprises de transports urbains ont envisagé de nouvelles améliorations possibles de la gestion de l'exploitation. L'application des systèmes informatiques puissants et la transmission par radio des données, pour échanger des informations entre les conducteurs et les régulateurs, ont bien vite été vues comme des solutions possibles pour gérer entièrement l'exploitation, ainsi les SAE ont vu le jour. SAE qui ont inauguré la troisième phase du développement de la gestion de l'exploitation dans les transports urbains [Laichour 02]. L'étape actuelle vise à améliorer les SAE, en intégrant des modules d'aide à la décision et d'information voyageurs.

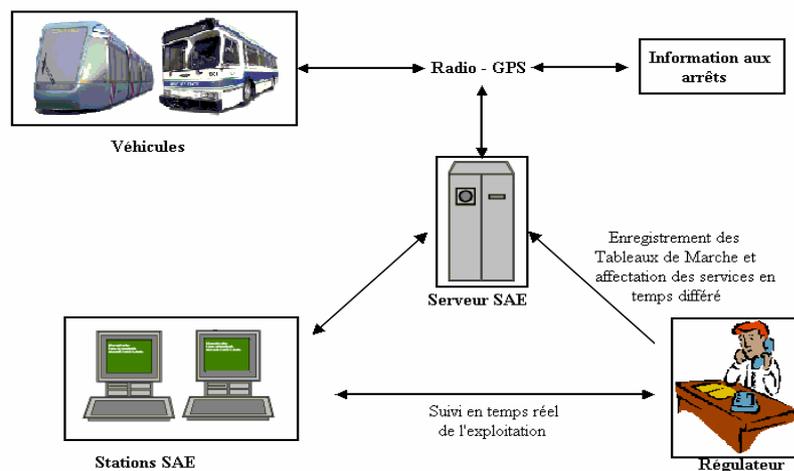
### **1.4.2.2 Rôle et gestion des systèmes d'aide à l'exploitation**

Les SAE sont conçus afin de garantir au mieux le déroulement planifié de l'exploitation. Cette exploitation peut se concevoir comme une boucle de régulation, dont l'horaire est le fondement et le paramètre de base. Des perturbations internes et externes accidentelles (congestion, accidents, avaries, pannes de courant, ..... ) influencent cette exploitation et écartent la sortie de la consigne. En cas de perturbations, le SAE doit assister le régulateur et gérer les perturbations, en intervenant pour rétablir la situation théorique.

D'ailleurs, il est clair que le processus de régulation est d'autant plus efficace que les perturbations sont découvertes plus tôt et que les régulateurs sont ainsi informés en détail (fig.1.5).



**Fig. 1.5 Régulation en boucle fermée.**



**Fig. 1.6 Rôle et place du SAE.**

En effet, pour une régulation plus efficace, le rôle principal d'un SAE est de permettre, par la comparaison des informations théoriques et des informations réelles, la détection et le traitement des perturbations (fig. 1.6). Grâce à ce rôle, un SAE permet la mise à jour des différentes sources d'informations :

- mise à jour du TM en différé : le TM initial est produit à partir de l'optimisation de l'offre de transport. Mais un réseau de transport urbain est soumis à de fortes variations,

tant en ce qui concerne les conditions de circulation que la demande. Le SAE permet une mise à jour de ces données le cas échéant.

- modification du TM en temps réel : en cas de perturbation et suivant les besoins et les préférences du régulateur, le SAE lui permet de modifier le TM initial.

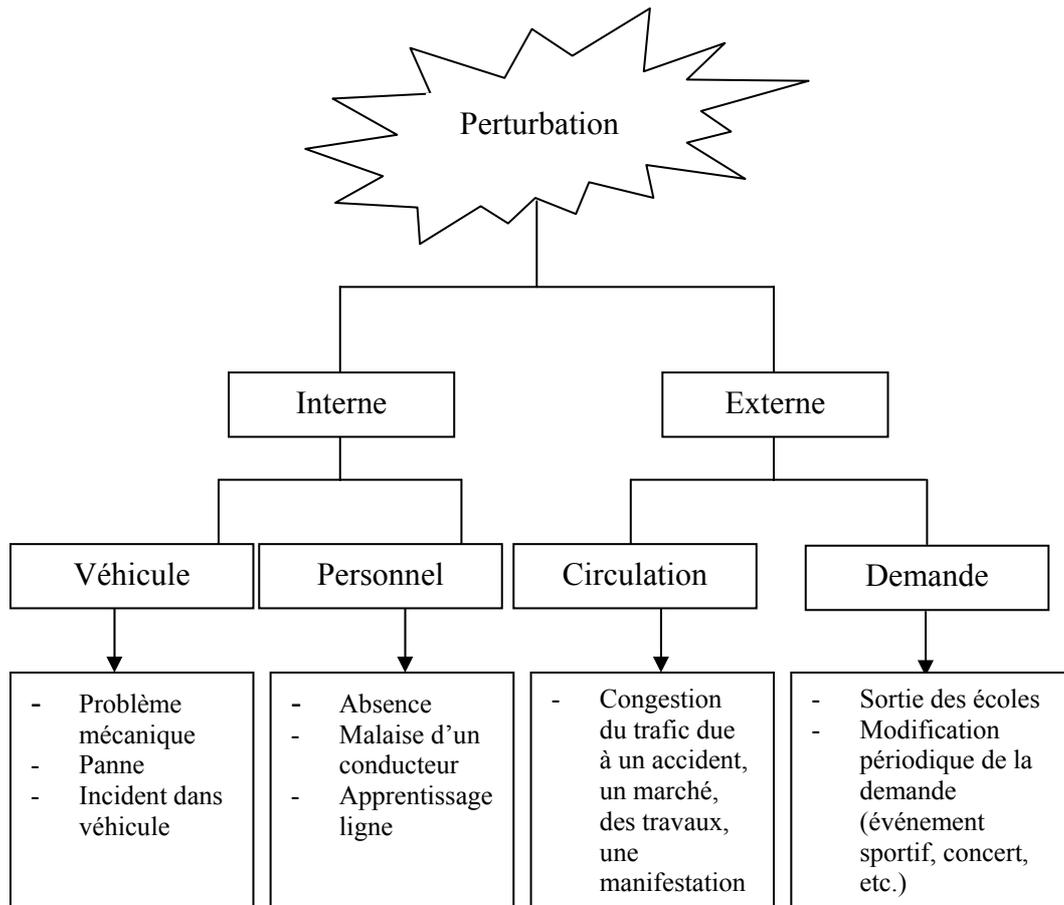
### **1.4.2.3 Détection et classification des perturbations**

Une perturbation est, par définition, un incident qui peut affecter un réseau de transport d'une manière aléatoire et qui a comme effet un écart entre le tableau de marche théorique et le tableau de marche réel. En fait, le transport collectif opère dans un univers essentiellement aléatoire. Au rang des perturbations majeures qui peuvent affecter le trafic, il convient d'inscrire les différents types d'aléas qui peuvent rendre caducs les plans de service préétablis (tableaux de marche et de service) et justifier la mise en place de plans de production provisoires ou dégradés (fig. 1.7). Le non respect de TMT à travers ces multiples manifestations apparaît comme la conséquence de l'instabilité qui se développe à la suite de l'apparition de perturbations ou du fait d'une mauvaise prévision des plans de marche [Cure, 84].

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

- Avance/retard : Il s'agit de déterminer pour chacun des véhicules 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 prévue entre deux véhicules risque de ne pas avoir lieu ou ne peut pas être assurée.
- Train de bus : Certains SAE permettent la signalisation du risque de train de bus (au moins deux véhicules se suivent de trop près).
- Prochain départ non assuré : Il s'agit de prévenir le poste de commande qu'un véhicule ne peut pas assurer son prochain départ.

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



**Fig. 1.7 Analyse et classification des perturbations.**

#### **1.4.2.4 Fonctions fondamentales d'un SAE**

Les fonctionnalités suivantes appartiennent à la plupart des SAE :

##### **a) Saisie de la localisation des véhicules**

Les procédures de détermination de la localisation des véhicules appliquées par le SAE s'inspirent du principe de la navigation à l'estime qui, à partir d'un arrêt de référence fixe, permet de mesurer et d'additionner dans le véhicule les éléments du déplacement et les changements de direction. Après un certain trajet, il est nécessaire de corriger la valeur mesurée. Il faut distinguer trois procédures, en fonction du type d'ajustement de la valeur mesurée qui sont : le repérage physique, le repérage logique et le repérage combiné.

La procédure la plus répandue dans les SAE est le repérage physique. Un compteur incrémental mesure dans le véhicule le trajet parcouru. Des émetteurs de codes de localisation (balises) sont placés sur la ligne pour transmettre des coordonnées de localisation codées au véhicule. De cette manière, le compteur incrémental du véhicule est mis à zéro au niveau des

balises et la section de trajet entre deux balises est calculée en fonction du nombre de rotations des roues.

Les balises sont absentes du repérage logique. L'odomètre se règle en fonction de la localisation des arrêts. Le signal d'ouverture des portes indique qu'un arrêt est atteint. Les arrêts sont identifiés par la succession des distances entre les arrêts de la ligne concernée. Ces dernières années, de nombreux SAE ont, en partie, appliqué un repérage combiné. Par conséquent, les informations proviennent aussi bien de balises que de l'arrivée à un arrêt, ce qui permet aussi de réduire le nombre de balises et, dans le même temps, de simplifier le logiciel d'exploitation.

### **b) Saisie de l'occupation des véhicules**

Il est important de connaître, surtout à des fins d'évaluation, l'occupation du véhicule pour adapter l'offre d'exploitation à la demande :

- introduction manuelle du taux d'occupation estimé globalement par le conducteur, qui l'introduit dans son terminal ;
- calcul automatique, par des appareils de saisie embarqués, du nombre de passagers.

La plupart des entreprises de transport ont déjà la saisie du taux d'occupation comme étant une fonctionnalité de leur SAE, et elles travaillent en saisie automatique.

### **c) Echange d'informations entre PCC et les véhicules**

Le véhicule transmet deux types d'informations au poste central :

- des messages de routine, données qui sont saisies automatiquement et transmises par radio. Par exemple : désignation de la ligne, numéro du véhicule, informations sur la localisation, etc.
- des messages individuels sur les incidents ponctuels survenant pendant l'exploitation commerciale, qui sont envoyés par le chauffeur, en enfonçant une touche de l'appareil de commande. Par exemple : messages d'accident, demande d'intervention de la police ou des pompiers, demande d'informations, demande de répartition, etc.

Les messages et instructions envoyés au chauffeur par le poste de commande centralisée (PCC) peuvent être classés en trois catégories :

- informations pour le conducteur transmises de manière permanente et automatique par l'ordinateur de gestion. Il s'agit surtout d'informations sur les perturbations.
- Instructions, qui peuvent être directement activées par la centrale, pour corriger l'exploitation commerciale perturbée. Par exemple : accélérer, ralentir, supprimer l'horaire, éviter l'embouteillage, etc.

- Réponse au chauffeur. Par exemple : horaire exact, temps de travail actuel, pause de midi, etc. Ces messages facilitent les conditions de travail du chauffeur.

#### **d) Garantie des correspondances**

Le contrôle et la garantie des correspondances représentent une fonction absolument essentielle du SAE, car, dans l'ensemble, ils améliorent la qualité du service offert dans des réseaux de transport urbain intégrés. Une comparaison automatique des valeurs théoriques et réelles permet de détecter les correspondances compromises et de les assurer par la centrale de gestion. Pour les correspondances non automatiques, des propositions émanent du système. Elles peuvent être exécutées, modifiées et rejetées par les régulateurs du poste de commande centralisée.

#### **e) Informations des passagers**

Grâce à l'échange continu des données entre les véhicules et la centrale de gestion, il est possible d'informer les passagers sur les services théoriques et réels. Le SAE dispose de deux possibilités : acoustique, via une annonce directe du PCC, ou visuelle, via des tableaux d'affichage ou des écrans. Les passagers peuvent prendre connaissance de cette information à l'arrêt comme dans les véhicules. Du PCC, le régulateur envoie ces messages au choix sur une seule ligne, sur plusieurs lignes ou sur toutes les lignes. En raison du trouble qu'elles provoquent chez les personnes non concernées, les informations sonores aux arrêts de surface ne sont recommandées que pour les messages relatifs à d'importantes irrégularités du service. Pour l'information continue des passagers sur la situation de l'exploitation, il faut prévoir des moyens visuels qui sont gérés automatiquement par le SAE et donnent des informations comme: heures du départ effectif, affichage de la destination, remarques relatives à la correspondance, annonces de perturbations, informations spéciales.

Entre temps, divers éléments destinés à l'information des passagers sont affichés dans le véhicule : nom du prochain arrêt, ligne, destination, remarques relatives à la correspondance, messages de perturbations.

### **1.4.3 Logiques et manœuvres de régulation**

#### **1.4.3.1 Logiques ou critères de régulation**

##### **a) Logique d'enlèvement de voyageurs**

C'est la logique dominante aux pointes du matin et de l'après midi, où la charge est par définition la plus forte. Mais cette logique est également opératoire dans d'autres cas, tels que les sorties d'écoles ou les dessertes des magasins le midi. L'objectif ici est d'enlever les voyageurs sans en laisser aux arrêts, en concentrant les moyens sur le(s) point(s) de montée(s)

le(s) plus importante(s). Les procédures de régulation mises en œuvre dans le cadre de cette logique sont par conséquent très diversifiées, en fonction de la configuration de la charge.

**b) Logique de régularité**

On est en logique de régularité lorsque l'arrivée des voyageurs aux points d'arrêt s'effectue indépendamment des passages des voitures. Cette logique prévaut notamment dans les périodes creuses, où cette condition est respectée, ainsi qu'aux périodes de pointe, dans le cas où la charge est répartie sur un grand nombre des points d'arrêt. Du point de vue de la qualité de service offert, la régularité permet de satisfaire deux objectifs : minimiser le temps d'attente des voyageurs aux arrêts et équilibrer la répartition des charges entre les véhicules.

**c) Logique de ponctualité**

L'objectif ici est d'assurer la ponctualité des véhicules. Cette logique s'adapte évidemment en premier lieu aux lignes à horaires. On la trouve généralement sur l'ensemble du réseau dans le cas d'horaires à respecter impérativement : premiers et derniers départs de la journée.

**d) Logique de correspondance**

Cette logique est présente lorsqu'il existe un échange de voyageurs entre deux lignes du réseau ou bien entre une ligne du réseau et un autre mode de transport indépendant de l'exploitant situé en amont ou en aval de celle-ci (c'est le cas pour les lignes desservant des gares de chemin de fer, un aéroport, voire un métro). On cherche alors à minimiser le temps de correspondance des voyageurs en transit.

**e) Logique de gestion du personnel**

Cette logique concerne les périodes de la journée où se pose le problème des fins de service et des relèves des personnels. Il faut, dans ce cas, respecter les conditions statutaires de travail du personnel, tout en assurant les relèves et en répartissant au mieux le temps de travail total sur l'ensemble des personnels.

### **1.4.3.2 Manœuvres de régulation**

Les classes de décisions les plus répandues dans la régulation du trafic d'un réseau de transport perturbé et les plus utilisées par notre partenaire (SEMURVAL) sont :

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

- b) Le direct en ligne :** La voiture suit l'itinéraire de la ligne assurant uniquement les arrêts de descente pour les clients à bord.
- c) Le demi-tour en ligne :** Il consiste en la suppression d'une partie de course pour remettre une voiture sur son horaire théorique, à un point de retournement, suite à un retard important de cette voiture.
- d) Le demi-tour avec échange de conducteurs et de véhicules :** Une voiture en retard est rattrapée par la suivante à l'heure et moins chargée. La voiture à l'heure transborde ses clients sur celle en retard et on effectue un échange de conducteurs. Puis, la voiture en retard continue le service sur l'horaire de la voiture à l'heure qui, quant à elle, fait demi-tour et prend l'horaire théorique de la voiture en retard.
- e) Le dépassement et service en descente uniquement :** Une voiture en retard est rattrapée par la suivante à l'heure. La deuxième passe devant la première et assure le service normalement. La voiture dépassée continue la course mais n'assure que les arrêts de descente.
- f) Le départ retardé au terminus :** Dans le cas où une voiture a un retard supérieur à son temps de battement au terminus d'arrivée, on retarde la voiture précédente au terminus d'arrivée de la moitié de la valeur du retard réel.
- g) L'échange des conducteurs et des véhicules :** Une voiture en retard est rattrapée par la voiture qui la suit, d'où le transbordement des voyageurs de la seconde voiture vers la première qui est plus chargée, et échange de conducteurs et des numéros des véhicules. La seconde voiture, qui est vide, repart haut le pied, reprendre l'horaire théorique de la première, qui continue le service sur les horaires théoriques de la seconde.
- h) Le raccourci :** Une voiture en retard est à deux minutes devant la voiture suivante qui est à l'heure. Le conducteur de la voiture en retard informe sa clientèle qu'il ne desservira pas une partie de la ligne et que ceux qui désirent descendre sur la partie non desservie du parcours doivent passer dans la voiture suivante. La voiture en retard repart par le raccourci reprendre son horaire théorique en ligne.
- i) La remise à l'heure par réserve et disponible :** Elle consiste en l'injection d'une réserve et d'un disponible sur l'horaire théorique d'une voiture en retard ou en panne.

- j) La régulation en terminus** : Elle consiste à effectuer des départs avancés ou retardés sur un terminus pour rétablir la régularité en ligne.
- k) La régulation en cascade** : Elle s'applique lors d'une perturbation générale d'une ligne sans boucle. Elle consiste à utiliser une voiture de ligne en navette qui fait la rotation entre un terminus partiel en ligne et le terminus d'arrivée.
- l) La régulation en ligne** : Cette décision consiste à retarder proportionnellement deux à trois véhicules en amont et en aval d'un véhicule en retard, pour éviter la surcharge sur celui-ci et l'aider à ne pas accroître son retard et afin de rétablir la régularité.

### 1.4.3.3 Perception de l'utilisateur

Avant d'aborder l'aide à la régulation proprement dite, il est nécessaire de voir d'abord la perception du client de la qualité de service rendu lors de son parcours et sa vision de la réaction face aux perturbations. En fait, le jugement du client s'applique au déplacement dans son intégralité et la qualité du déplacement est évaluée à partir de l'ensemble des caractéristiques de celui-ci [Dridi 04] [Fayech 03].

L'un des facteurs principaux auxquels un usager peut être très sensible est la durée totale du trajet à bord. Le temps étant perçu d'une manière subjective par l'individu, il devient élastique et flexible. En effet, les individus sont très sensibles au temps, certains sont pressés, d'autres sont plus patients. Un allongement du temps d'attente provoque une surestimation de cette attente et la rend plus pénible avec l'anxiété et aussi avec sa nature incertaine et inexplicée.

D'autre part, dans un réseau fortement maillé, le client se doit de rechercher le parcours optimal qui convient à ses objectifs de déplacement. Autrement dit, il doit identifier les lignes, trouver leurs intersections, évaluer le temps, chercher les bons horaires de correspondance et suivre en permanence la progression du déplacement. Ce raisonnement, qui implique un accroissement de l'exigence de réflexion, est perçu comme une contrainte supplémentaire pour l'utilisateur. De plus, une survenue de stress chez le client est souvent provoquée à cause de la diminution du temps de repos dans le véhicule (situation assise) ou d'une correspondance manquée [Hayat 97]. Bref, les usagers peuvent être sensibles à différents facteurs liés à la durée des déplacements, à la sécurité perçue, au confort psychologique (demande de considération, de prise en charge, de repérage et de quiétude), à la valorisation du temps, aux conditions matérielles de déplacement, à l'existence du service (accessibilité spatiale du système, disponibilité temporelle, conditions d'accès), à la prédictibilité des conditions de

déplacement, à la maîtrise de la complexité du déplacement et, finalement, aux coûts et tarifications.

Afin de garantir la satisfaction des clients, le régulateur doit prendre des mesures de régulation pour pallier aux perturbations, sans pour autant négliger les objectifs et les intérêts commerciaux de la compagnie de transport. Il doit ainsi bien définir les différents critères correspondant à la situation perturbée, mais aussi respecter les contraintes imposées. Par exemple, il doit optimiser l'utilisation des moyens de réserve (véhicules, conducteurs et agents d'intervention), minimiser les parcours à vide, les répercussions sur les TMT et respecter les conventions collectives (gestion du repos des chauffeurs), et surtout minimiser le coût supplémentaire de l'action de régulation prise : heures supplémentaires, carburant etc.

## **1.5 Système d'aide à la décision (SAD)**

### **1.5.1 Pourquoi un système d'aide à la décision ?**

Pour répondre à cette question il nous semble suffisant de rappeler les tâches du régulateur avec un peu plus de détails. Ces tâches, comme nous l'avons dit, sont diverses et difficiles, car elles vont de la détection des perturbations à la prise de décision, en passant par l'évaluation de l'importance de chaque perturbation et de son impact sur le réseau. Le régulateur doit aussi bien construire son espace de décision ou, plus clairement, l'espace spatio-temporel de régulation. Il doit constamment faire face à toutes ces questions en temps réel. Tout en étant submergé d'informations provenant du SAE, il doit prendre, en un temps limité, des décisions immédiates, pour traiter les incidents qui peuvent aussi apparaître simultanément [Fayech 02]. De plus, malgré l'existence et l'aide très précieuse du SAE, le régulateur passe un temps important à communiquer avec les chauffeurs des véhicules. Ainsi, afin d'avoir une régulation efficace, il est nécessaire :

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

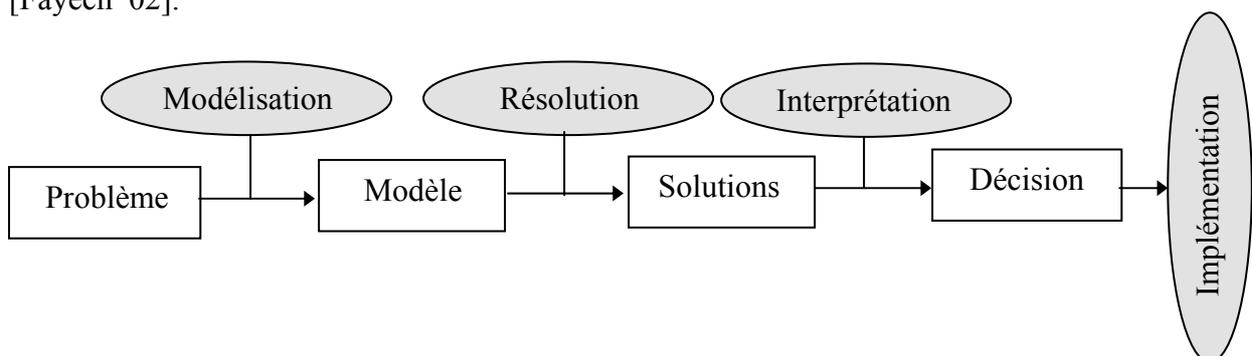
Les régulateurs doivent exécuter ainsi, en temps réel, des tâches difficiles, qui dépassent souvent l'échelle humaine, ce qui les rend moins efficaces dans la gestion des incidents. Un Système d'Aide à la Décision (SAD) s'avère donc nécessaire pour les assister dans la régulation.

### 1.5.2 Les systèmes d'aide à la décision

« L'aide à la décision, c'est l'apport des éléments de réponses aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, en s'appuyant sur des modèles clairement explicites, afin que la décision soit prise avec plus de rigueur et d'efficacité. Elle traite des modèles mathématiques, mais elle utilise également la modélisation de situations réelles fort complexes ; aussi le développement de modèles utiles ne peut être que le fruit du contact entre théoriciens et praticiens » [Soulhi 00]. Ainsi, les technologies et les applications des systèmes d'aide à la décision ont beaucoup évolué ces dernières décennies, grâce au développement technologique et organisationnel. Les SAD sont en fait des solutions informatiques développées pour aider à la prise de décision et à la résolution de problèmes complexes [Fayeche 03] [Shim 02]. Dans le processus de prise de décision (fig. 1.8), le problème doit être d'abord détecté et identifié, pour qu'on puisse le modéliser. Cette étape de modélisation comprend :

- la localisation des intervenants dans le problème à résoudre et des entités concernées,
- la définition de l'horizon de décision,
- la définition des paramètres et contraintes,
- la formalisation des critères.

Une étape de résolution impose alors le choix d'une approche algorithmique. Un ensemble de propositions est ensuite établi à travers une étape d'interprétation et présenté aux acteurs concernés. L'étape finale d'implémentation consiste à appliquer les décisions opérationnelles, suivre leur impact, prendre des décisions correctives et valider les décisions [Soulhi 00] [Fayeche 02].



**Fig. 1.8 étapes de résolution d'un problème d'aide à la décision.**

La littérature relative aux SAD révèle un intérêt particulier pour la théorie et l'application des systèmes intelligents et du *soft computing* dans la gestion, la planification, l'ordonnancement et la résolution de problèmes diversifiés. Le contexte de cette recherche varie de la gestion financière, la gestion de la production et le marketing jusqu'au commerce électronique, les

interfaces Homme-Machine et la gestion stratégique. Un dénominateur commun de divers domaines d'étude réside dans la conception et l'utilisation de systèmes intelligents (systèmes experts, multi-agents, etc.) et/ou de systèmes basés sur le « soft computing » (algorithmes évolutionnaires, logique floue, etc.).

Par ailleurs, dans le domaine de l'aide à la décision, les approches hybrides ont prouvé leur efficacité. A titre d'exemple, une approche hybride basée sur la logique floue et les algorithmes évolutionnaires exploitant à la fois les capacités représentatives des connaissances de la logique floue et les capacités adaptatives des algorithmes évolutionnaires a été proposée dans [Kacem 02]. Une autre approche de ce type a été développée par Takanori [Takanori 03] pour les problèmes de conception mécanique.

Il est très important ici de noter que la qualité d'un SAD peut être évaluée suivant sa capacité à réduire la complexité et à avoir des techniques multi-modèles, plusieurs niveaux de coopération, un degré d'intelligence et aussi un degré d'autonomie. Par exemple, la coopération entre plusieurs méthodes de résolution permet une meilleure flexibilité et une adaptation à des problèmes réels et variés [Borne 02].

### **1.5.3 Rôle d'un SAD pour la régulation du trafic d'un réseau de transport urbain**

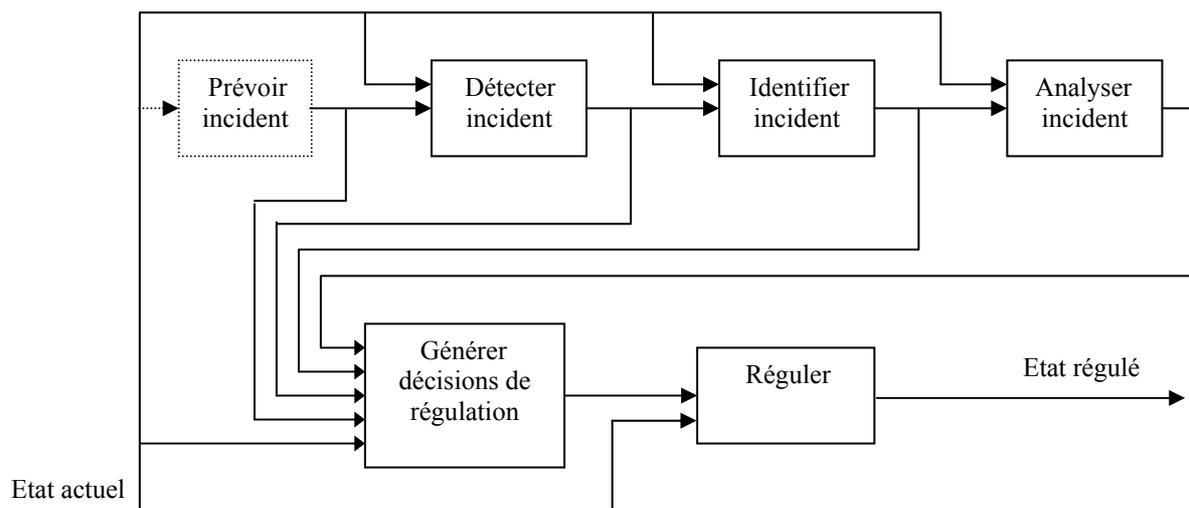
Le processus de prise de décision lié à la gestion en temps réel du trafic d'un réseau de transport urbain est présenté sur la figure 1.9. Un SAD pour la régulation doit alors être capable d'exécuter les différentes étapes de ce processus.

A partir de l'état actuel du réseau, le SAD doit être capable non seulement de détecter les perturbations, mais aussi, dans la mesure du possible, d'anticiper leur apparition, afin de pouvoir intervenir avec des procédures préventives de régulation. La prédiction des perturbations permet de réagir à temps et de réduire leurs impacts sur le trafic. Aussi, le SAD peut diriger le régulateur vers les perturbations considérées les plus gênantes, dans le cas de l'apparition de plusieurs incidents simultanés.

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

Finalement, l'étape de résolution résulte en une proposition de solutions envisageables et en la projection dans le futur de l'effet de ces éventuelles décisions sur le réseau. Le choix des décisions revient au régulateur et le SAD peut servir de support pour l'implémentation des

décisions à l'aide du SAE. En fait, le SAD présent, en tant que support du régulateur dans le choix de ses décisions, est considéré comme un serveur de propositions qui est lié aux opérateurs humains par une communication verticale [Balbo 00]. Ce serveur leur fournit un ensemble de solutions, dont l'objectif est de limiter le rôle du régulateur au choix de la solution la plus appropriée, si les solutions sont multiples, ou à sa simple approbation, si la solution est unique. Par ailleurs, si le régulateur est en désaccord avec le SAD vis-à-vis des solutions proposées, on doit prévoir la possibilité d'une interaction entre eux afin d'aboutir à un accord [Fayech 03].



**Fig. 1.9 Processus de contrôle en temps réel d'un réseau de transport.**

#### 1.5.4 Outils et approches de régulation

Dans ce paragraphe, nous essaierons de faire la synthèse bibliographique des approches de régulation d'un réseau de transport perturbé existantes, qu'il s'agisse d'une régulation entièrement automatisée ou non. Nous commençons par les approches liées à la théorie de la commande proprement dite, avant de citer les autres approches, issues principalement de l'intelligence artificielle et du *soft computing*.

##### A) Approche par séquençage temporel

Le principe de base de la séquentialisation temporelle, consiste à établir des modèles mathématiques linéaires caractérisant le transfert d'un véhicule (la rame, en l'occurrence) entre deux points d'arrêts successifs d'une ligne de transport en commun à haute densité

[Hartani 95]. Pour ce faire, deux types d'équations sont établis : les équations aux déviations, relatives aux écarts entre les instants de départ réels et théoriques de chaque véhicule à chaque arrêt et les équations aux intervalles, qui concernent les intervalles de temps séparant les départs de deux véhicules successifs de chaque arrêt.

Cette modélisation est soumise à un certain nombre d'hypothèses détaillées dans [Hayat 93] et [Hartani 95]. Ces hypothèses nous permettent de déterminer le temps d'arrêt d'un véhicule au niveau de sa prochaine station, en tenant compte du nombre de passagers à embarquer à l'intervalle de temps écoulé entre deux départs. Les modèles linéaires présentés nous permettent de définir les équations qui serviront d'indicateurs pour la mise en place de la régulation. D'une manière analogue, il est possible d'exprimer l'intervalle de temps entre les instants de départ des véhicules successifs du même quai.

Cette méthode de régulation présente deux principaux avantages :

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

Néanmoins, certaines limites apparaissent :

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

## **B) Approche cinématique de la régulation**

La seconde famille des modèles mathématiques permettant la description et la régulation de la dynamique du trafic sur une ligne de transport en commun à haute densité, est construite à partir des fonctions de transfert des équations du mouvement. Le principe de base de cette approche consiste à connaître à tout moment, et pour chaque rame, les différents paramètres cinématiques qui la caractérisent, à savoir : sa position, sa vitesse, son accélération et son *jerk* (dérivée troisième par rapport à la position).

La détermination de la commande optimale pour le système dynamique étudié passe par la description de l'ensemble des équations de mouvement. Ces équations permettent de décrire, en fonction du temps, l'évolution de l'ensemble des paramètres cinématiques de la rame. La combinaison des différents critères, en attribuant des poids à chacun d'eux, nous amène à établir des critères quadratiques de performance qu'il faut optimiser.

La solution du problème d'optimisation posé est obtenue après résolution des équations de Riccati correspondantes, la commande optimale à appliquer, le jerk en l'occurrence, est ainsi déterminée. L'analyse du système en boucle fermée nous renseigne quant à la stabilité et la robustesse des algorithmes proposés [OuldSidi 03].

Ce type de modélisation nous donne une simulation détaillée du mouvement et permet de connaître l'état du système à tout instant. Néanmoins, il nécessite, pour sa mise en œuvre réelle, un système d'identification des véhicules performant et fiable, mais coûteux, ainsi qu'un traitement de l'information en temps réel, si l'on veut une adéquation du modèle réel avec les modèles théoriques.

### **C) Le cas du VAL**

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

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

La méthode de régulation du VAL est la suivante : si une rame a un retard dont la valeur est inférieure à un seuil donné (marge de sécurité par rapport au temps normal d'arrêt à quai, 3 secondes en réalité), alors ce retard n'aura pas d'impact sur le trafic, car le régulateur peut agir sur le temps de stationnement aux arrêts pour compenser le retard. Par contre, si le retard est supérieur à un second seuil (2 minutes), un recalage de l'ensemble des horaires théoriques est effectué et toutes les rames seront retardées. Sinon, c'est-à-dire si le retard est compris entre ces deux seuils, le régulateur doit diminuer le temps d'arrêt en station de 3 secondes et l'on donne à la rame en retard une consigne de vitesse supérieure à maintenir sur l'interstation suivante.

## D) Autres approches

Les approches issues des concepts généraux du contrôle et de la commande en automatique sont théoriquement bien fondées et rigoureusement établies. Néanmoins, elles se basent sur des hypothèses de modélisation qui sont souvent simplificatrices et réductrices. De plus, elles concernent des régulations par simulation détaillée en station sans se soucier de l'état d'une rame ou d'un véhicule entre deux stations. Du fait de l'imperfection des données sur lesquelles la plupart des modèles mathématiques se basent, la logique floue [Bouchon 95] a été introduite dans diverses approches de régulation [OuldSidi 03] [Chihaïb 02][Soulhi 00][Bailly 96]. [Chihaïb 02] s'appuie aussi sur un algorithme de propagation des contraintes pour la régulation du trafic d'un réseau multimodal.

Par ailleurs, la régulation est souvent considérée comme une planification en temps réel. Il s'agit alors d'un réordonnement des véhicules suivant les conditions réelles d'exploitation. Dans [Li 91], les auteurs ont développé un modèle de programmation linéaire stochastique pour la régulation d'une ligne de bus. Ce modèle est basé sur la modification des courses affectées aux véhicules grâce à l'amélioration de scénarii archivés au préalable et déjà vécus, en tenant compte des flux des passagers. Par contre, il ne traite pas le problème de la correspondance.

De même, Yan et al. [Yan 97] proposent une heuristique fondée sur la relaxation Lagrangienne, pour gérer le trafic aérien en cas de perturbations. Ils présentent une modélisation spatio-temporelle de l'ordonnement des avions sous la forme d'un graphe. Ce graphe montre le séquençage des tâches effectuées par les avions (en vol, au sol, etc.). Dans [Zeghal 01] le problème d'affectation d'équipages en transport aérien a été traité. Le but de cette étude est de déterminer le nombre de personnes à affecter à chaque programme de vol pour minimiser les coûts dus aux heures supplémentaires nécessaires.

Dans [Huissman 01], les auteurs ont développé une approche d'ordonnement issue de la programmation dynamique avec relaxation. Son but est d'affecter les différentes courses aux véhicules pour un horizon fixé. La création des horaires se fait alors presque en temps réel, si l'horizon est assez réduit. [Huissman 01] considère d'abord le problème d'un ordonnancement statique, qu'il généralise en un problème dynamique, en changeant les paramètres du temps et de l'horizon. Aussi, il généralise le problème d'ordonnement à un seul dépôt à un problème multi-dépôt, en itérant l'application de l'approche à chaque dépôt, jusqu'à l'obtention de la solution optimale. Par ailleurs, le flux des passagers et les problèmes de correspondance ne sont pas considérés.

Il existe néanmoins certaines formes de connaissance qui sont parfois indispensables et qui ne sont pas représentées de manière formelle dans la plupart des modèles, comme le savoir-faire des experts. Ainsi, [Isaai 01] présente une approche prédictive et une autre réactive d'ordonnement des trains, qui tient compte de l'expertise et des connaissances des opérateurs humains. Les deux approches sont comparées selon l'utilisation combinée des données et des connaissances, et aussi selon les niveaux d'incertitude. L'objectif est d'éviter et de résoudre les conflits issus de l'occupation simultanée des voies.

[Aloulou 99] a présenté une approche génétique de régulation d'une ligne de bus en optimisant les critères de ponctualité et de régularité. Son objectif est de fournir au régulateur des décisions simples liées à la modification des horaires en vue de résorber un retard causé par un bus perturbé.

Vu la nature distribuée des systèmes de transport, [Balbo 00] et [Laïchour 02] ont construit des outils d'aide à la décision, pour la régulation d'un réseau d'autobus, basés sur une approche Agent. Les correspondances ne sont pas explicitement traitées par [Balbo, 00]. Par contre, le système d'aide à la décision de [Laïchour 02] ne concerne que la régulation au niveau des pôles d'échange.

D'autres systèmes interactifs d'aide à la décision ont été développés pour permettre des simulations et des tests des différents paramètres de décision. Ils ne procurent que des résultats synthétiques, qui doivent être analysés par le régulateur pour obtenir un diagnostic final. Nous présentons ici trois approches de régulation qui ont été développées par des chercheurs de notre laboratoire. La première est proposée par Soulhi : « algorithme flou » [Soulhi 00]. L'algorithme est basé sur l'expérience des régulateurs. La seconde, proposée par H. Laichour [Laichour 02], est basée sur un processus de contrôle et d'anticipation. La troisième est une approche hybride multi-agents évolutionnaire, elle a été proposée par B. Fayechech [Fayechech 03].

#### **D1. Algorithme flou :**

Cet algorithme fonctionne selon trois phases : la première et la deuxième phase servent pour l'apprentissage et l'évaluation des stratégies de régulation. La troisième phase consiste en l'implémentation réelle de ces stratégies dans le système de transport (fig.1.10). L'algorithme proposé procède comme suit :

1. Acquisition des connaissances : elle représente l'acquisition de l'expérience de régulation dont disposent les régulateurs et les responsables du service de régulation.
2. Déclaration des critères de décision et des règles de décision. Les règles représentent des consignes à respecter.

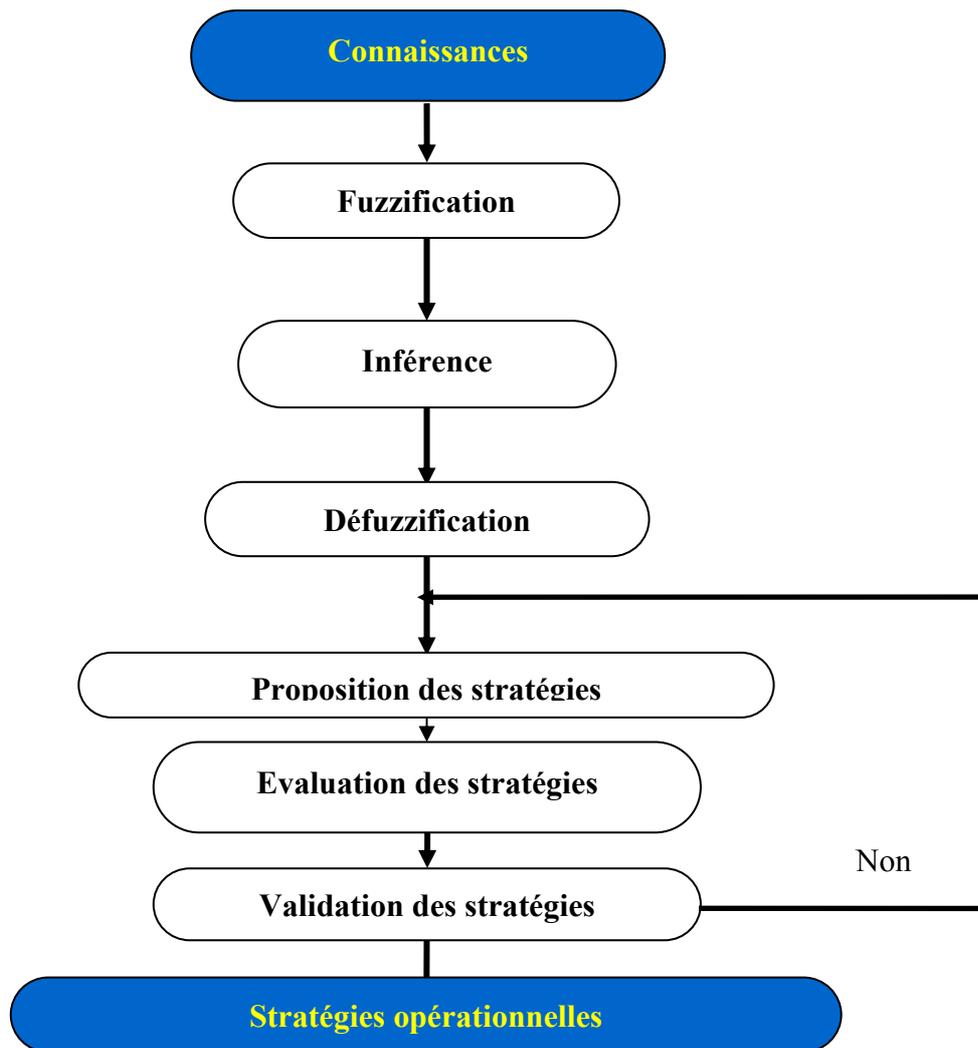
3. Modélisation des critères de décision, grâce à la théorie des sous-ensembles flous (phase de *fuzzification*) pour définir des classes de situations probables. Puis, un moteur d'inférence à base de règles floues (règles de décision pour la régulation) permet d'associer à chaque classe de situation une classe de décision. Enfin, une phase de *défuzzification* permet de déterminer la décision à prendre dans un cas précis, selon les valeurs des critères de décision et le respect des règles de décisions.
4. Proposition des stratégies de régulation en vue de leur validation par simulation. Dans le cas où une stratégie n'est pas acceptée par les régulateurs ou par les responsables de régulation, il faut proposer une autre stratégie, sinon aller à l'étape 5.
5. Implémentation des stratégies validées dans le système d'aide à la régulation sous forme d'une base de règles.

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

## **D2. Systèmes multi-agents**

Dans sa thèse de doctorat, H. Laïchour [Laïchour 02] a proposé un système multi-agent capable de réguler les correspondances en temps réel. A chaque nœud de correspondance et pour chaque correspondance prévue, l'algorithme décrit ci-dessous est utilisé :

1. Tout d'abord, une simulation de veille est déclenchée au niveau d'un nœud de correspondances, chaque fois qu'une correspondance est prévue. Cette simulation s'effectue quelques minutes avant l'horaire théorique de la correspondance prescrit dans le TM.
2. Dans la simulation de veille, les positions des véhicules par rapport au nœud de correspondances sont déterminées et calculées.
3. Puis, on teste si l'horaire des véhicules correspond aux horaires prescrits dans le TM grâce à leurs positions calculées précédemment. Si une perturbation est détectée, alors une simulation des départs est effectuée (étape 4). Sinon, il faut attendre le déclenchement d'une autre simulation de veille, avant une autre correspondance (étape 1).



**Fig. 1.10. Système d'inférence flou proposé par Souhli.**

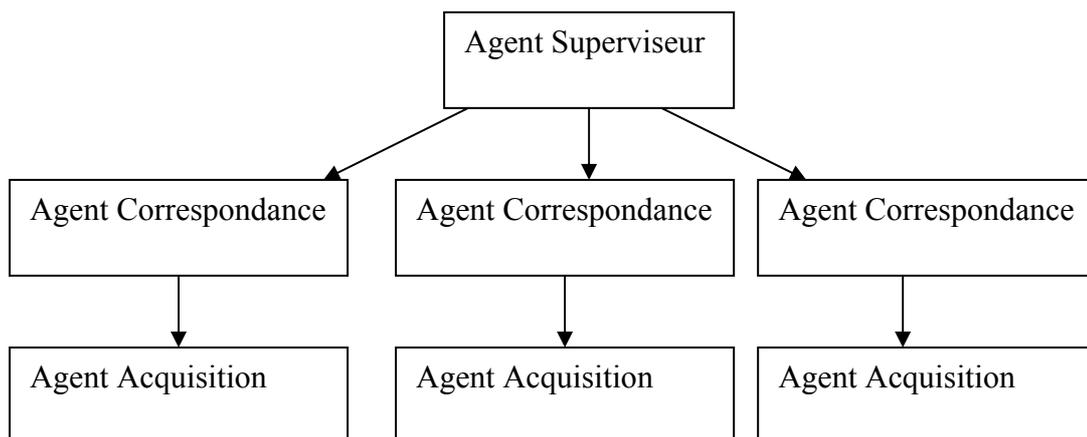
4. Déclenchement de la simulation de départ : dans ce cas, les positions des véhicules sont calculées au moment de la réalisation effective de la correspondance. Ces positions indiquent les horaires simulés des véhicules. Dans le cas où la correspondance risque de ne pas être assurée à cause d'éventuelles perturbations (des véhicules en retard), alors le module de décision doit proposer des actions, afin d'assurer la correspondance (l'étape 5). Sinon, il faut attendre le déclenchement d'une autre simulation de veille, avant une autre correspondance (étape 1).
5. La correspondance ne sera pas assurée, alors le système de décision est mis en route afin de trouver des solutions pertinentes, pour éviter le non-respect de la correspondance.
6. Après avoir déterminé les décisions susceptibles d'assurer la correspondance, la simulation de ces décisions est lancée. Cette dernière consiste à déterminer les effets des décisions proposées par le module de décision. Les effets sont calculés à partir des

positions de véhicules, avant l'horaire réel de la correspondance, en appliquant les décisions sur ces véhicules. Une simulation de départ est alors effectuée pour déterminer l'état du nœud à l'horaire théorique de la correspondance.

7. Les décisions avec leurs effets sont présentées au régulateur qui sélectionne celle qui lui convient. Puis, il faut attendre le déclenchement d'une simulation de veille, avant une autre correspondance.

Le modèle multi-agent proposé se base sur trois types d'agents (fig. 1.11) :

- agent « acquisition », qui effectue la gestion des données relatives aux passages des bus aux arrêts de régulation,
- agent « correspondance », qui s'occupe de la détection et du diagnostic des perturbations, au niveau des correspondances, ainsi que de la proposition de décisions,
- agent « superviseur », qui est l'interface entre le régulateur et le système d'aide à la régulation des correspondances.

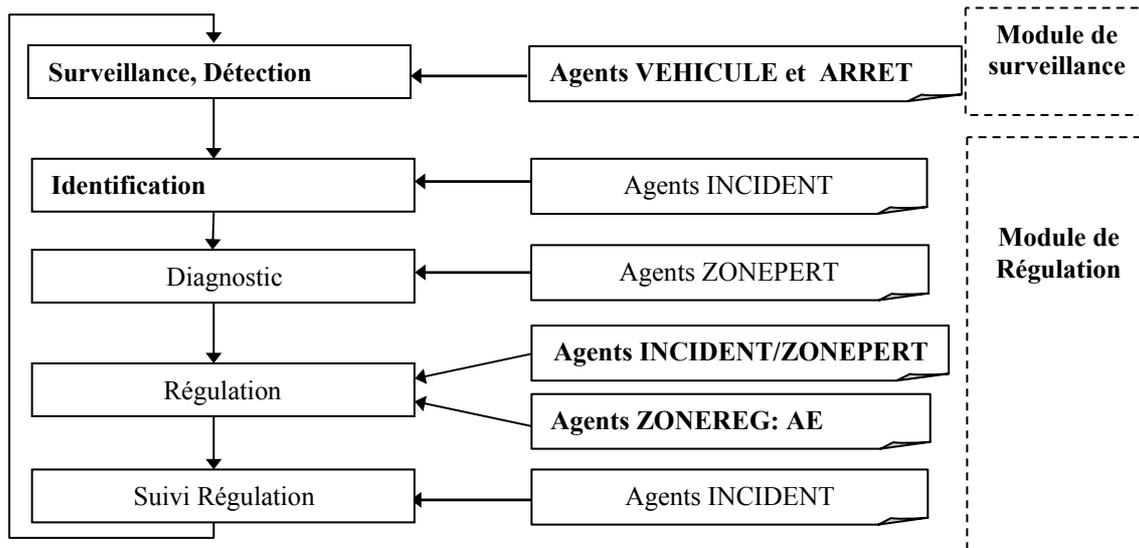


**Fig. 1.11 Système multi-agents proposé par Laichour.**

### **D3. Approche multi-agents évolutionnaire**

B. Fayeche dans sa thèse de doctorat a proposé un système multi-agent d'aide à la décision (SMAAD), qui utilise un algorithme génétique pour la régulation en ligne. Le modèle multi-agent proposé se divise en deux modules : le premier est dédié à la surveillance, et le second à la régulation. Les agents qui composent ces deux modules sont : agent « véhicule », agent « arrêt », agent « incident », agent « zonepert » et agent « zonereg ». Ils coopèrent entre eux pour traiter les incidents. Les solutions de régulation sont proposées par les agents « zonepert », et sont transmises à l'agent « zonereg », qui utilise un algorithme génétique pour les améliorer (cf. Fig.1.12). Bien que cette approche soit parmi les meilleures existantes, elle a

quelques points faibles, dont par exemple le fait qu'elle ne permet pas le traitement de plusieurs perturbations simultanées. L'utilisation des systèmes multi-agents n'était pas tout à fait optimale, car le SMAAD associe un agent à presque toute information, quelle que soit sa pertinence, ce qui rend son temps de réponse plus important. Il n'est d'ailleurs pas capable de gérer un grand nombre d'agents, et ceci malgré le nombre qui en génère au début. Un autre inconvénient est relatif à l'algorithme évolutionnaire utilisé, qui n'est pas du tout performant et qui est très classique.



**Fig. 1.12** Système multi-agents proposé par Fayech

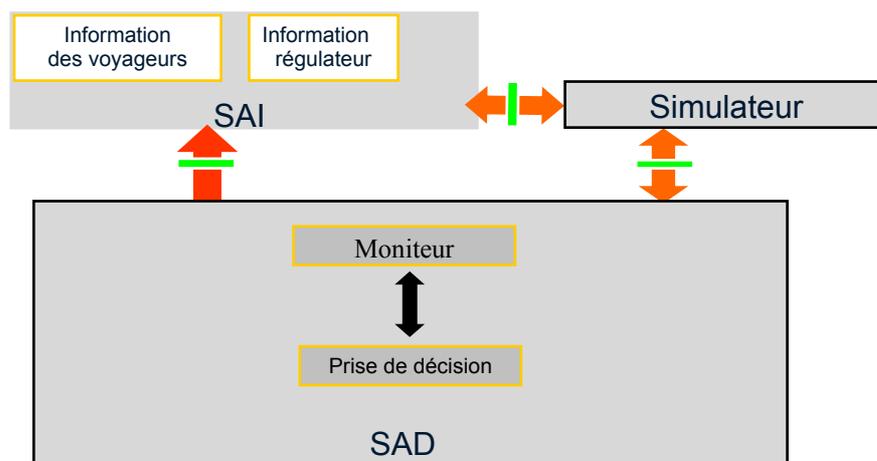
## 1.6 Projet de recherche coopérative

Comme nous l'avons déjà signalé, ce travail de recherche rentre dans le cadre d'un projet coopératif du Groupement Régional de Recherche en Transport de la région Nord Pas-de-Calais, intitulé : Amélioration de la qualité des correspondances dans les transports urbains. Ce projet fait intervenir plusieurs laboratoires de la région et la société du réseau de transports valenciennois, SEMURVAL. Ce dernier réseau est actuellement en phase de transformation et l'arrivée nouvelle de deux lignes de tramway oblige l'exploitant à réorganiser le trafic de façon générale. Dans cette nouvelle organisation du réseau, il y a eu création d'un certain nombre de pôles d'échanges, dont quelques uns contiennent plus de deux modes de transport : bus, tramway et TER. Les régulateurs de trafic sont confrontés au déficit permanent de rétablir le fonctionnement normal du réseau de transport lorsqu'il y a des perturbations. Ils sont submergés d'informations provenant du SAE et ils doivent les traiter rapidement et prendre des décisions efficaces, afin de rétablir le fonctionnement normal du réseau. L'objectif du dit projet est alors de réaliser un système d'aide à la décision permettant

d'assister ces régulateurs et de faciliter leur tâche de régulation. Ce module doit être intégré dans le poste de travail des régulateurs et d'utilisation facile. L'impact de ce système sur les voyageurs est de minimiser leur temps d'attente, en mode dégradé, dans les pôles d'échanges et d'assurer, dans la mesure du possible, la continuité de leurs déplacements dans un réseau de transport multimodal. Il s'agit donc d'améliorer la qualité de service rendu aux usagers et de les maintenir informés.

### 1.6.1 Cahier des charges et architecture retenue

Dans un premier temps, les partenaires du dit projet ont partagé les tâches de la façon suivante : régulation du trafic en interstations en fonction du flux de passagers, régulation du trafic aux nœuds de correspondances, passagers, informations voyageurs et simulation du trafic sur le réseau. Chaque partenaire doit rendre sa partie sous forme d'un module élémentaire, en utilisant ses méthodes propres. Ainsi, l'architecture de la figure a été retenue après plusieurs réunions de travail :



**Fig. 1.13 architecture retenue**

#### a) Module de gestion des correspondances

La gestion des correspondances est de plus en plus difficile, pour des raisons liées à l'accroissement des tailles de réseaux de transport et de la demande en milieu urbain et suburbain. Pour cela, les exploitants de ces réseaux cherchent à développer des outils performants pour les aider à assurer les correspondances prévues sur tout le réseau à toute heure de la journée. Ils doivent organiser les correspondances entre tous les modes de transport de façon optimale, c'est-à-dire en minimisant les temps d'attente aux nœuds de

correspondances. Ce module du projet a été confié à l'unité de recherche ESTAS de l'INRETS et à l'équipe ingénierie de décision (ID) du LAGIS.

b) Module de régulation en interstations

Il s'agit ici du module qui doit traiter les perturbations produites entre deux stations et qui ne sont pas prises en compte par le module de correspondances. Il vise à proposer des décisions permettant d'absorber au maximum les flux de passagers s'accumulant dans les stations touchées.

c) Module d'information des voyageurs

La contribution de ce module est l'analyse, la spécification, le maquettage et l'évaluation du système d'aide à l'information voyageurs dans les différentes stations du réseau et à bord de véhicules. Ce module est la part du travail de l'équipe de C. Kolski du LAMIH de Valenciennes.

d) Simulateur

Cette partie du projet coopératif est prise en charge par l'équipe du professeur C. Tahon du LAMIH. Elle consiste en l'intégration des trois modules précédents et en la validation de la coopération entre les différents agents lors de la simulation du fonctionnement du trafic en chaque point du réseau de transport. La plate-forme de simulation doit alors refléter la réalité des lignes de transport urbain.

### **1.6.2 Communications et échanges entre les modules**

Durant le fonctionnement réel du réseau de transport, les différentes entités qui le composent doivent communiquer entre elles pour un suivi permanent de l'état réel du trafic. De la même façon, pour procéder à la simulation, les modules de régulation doivent être capables de communiquer entre eux, afin de bien refléter l'état du réseau. Ainsi, dans l'architecture retenue, nous avons prévu un certain nombre d'échanges d'informations entre les différents modules. En fait, le simulateur doit transmettre au système d'aide à l'information (SAI) toutes les informations relatives au réseau, selon les circonstances rencontrées. Par exemple, à la sortie d'un véhicule d'un dépôt, il lui transmet une description complète du véhicule (nom de la ligne, numéro de service, numéro de véhicule, type de véhicule, conducteur) ou, suite à une prise de décision, il lui transmet le descriptif de la décision. Aussi, le SAI peut transmettre au simulateur, suite à un événement déclencheur (à la demande du régulateur par exemple), des données, comme l'identifiant du véhicule, ou de la station.

Suite à l'occurrence d'un incident, le module d'interstations peut transmettre au module correspondances des données relatives au nœud de correspondance (horaires de passage perturbés, charges perturbées des véhicules, numéros des véhicules, numéros des lignes, sens des circulations). Il peut l'informer aussi quand une décision de régulation est prise, en lui envoyant une estimation des horaires de passage des véhicules aux nœuds. Quand une décision de régulation est prise par le SAD, le module correspondances transmet au simulateur un descriptif de la décision, pour qu'il la mette en application (numéros des lignes concernées, véhicules et stations, et valeurs des avances ou retards à imposer).

## **1.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique nous permettant de faire un tour d'horizon sur l'existant concernant l'aide à l'exploitation d'un réseau de transport, pour bien préciser le contexte de cette thèse. Ainsi nous avons traité les différentes problématiques liées aux réseaux de transport multimodaux, avant d'aborder les problèmes liés aux processus de planification et de régulation. La plupart des approches de régulation existantes ne traitent pas le cas multimodal des réseaux de transport public, elles limitent le degré d'intervention du régulateur et ne concernent pas la régulation, dans le cas de l'apparition de plusieurs incidents simultanés. De plus, les correspondances sont souvent traitées par des approches spécifiques, qui ne considèrent pas les autres critères de ponctualité, de régularité, etc.

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à la recherche d'un outil d'aide à la décision qui suscite de propositions de régulation, mais qui effectue surtout les différentes étapes du processus en question, tout en s'adaptant aux natures des incidents et aux divers critères appropriés.

## **Chapitre II. Modélisation, formulation mathématique et méthodologies de résolution du problème de régulation**

## **2.1 Introduction**

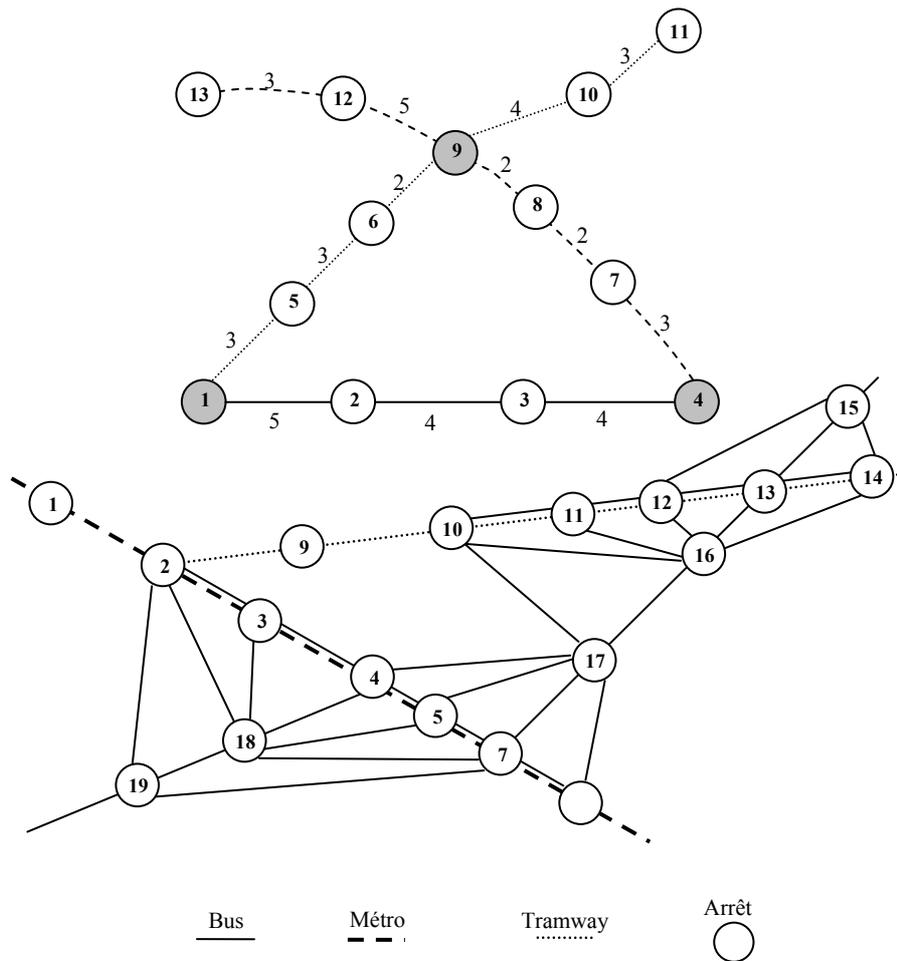
La modélisation est une étape primordiale, dans un processus d'aide à la décision, à laquelle on doit accorder une importance particulière. En effet, avant toute démarche de résolution du problème traité, il faut tout d'abord bien formuler celui-ci en le traduisant en un modèle mathématique bien conçu, et qui doit être le plus complet et précis possible, sans pour autant le rendre inutilisable. Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord faire une présentation des principaux outils de modélisation dédiés aux réseaux de transport en général et à la régulation du trafic en particulier. Ainsi, nous présentons entre autres les modèles basés sur la théorie des graphes, sur les réseaux de Petri et sur les systèmes multi-agents ou les modèles hybrides (agents et graphes par exemple). Nous mettons l'accent vers la fin de cette première partie sur le rôle de ces outils pour faciliter la tâche de prise de décision. La deuxième section de ce chapitre est consacrée au modèle mathématique proposé. Nous y présentons alors de façon détaillée les variables de décision, les critères et les contraintes liés au problème de régulation du trafic. Avant de présenter le module d'aide à la décision proposé, nous évoquons les problèmes de décision multicritère, leurs contextes d'application et les principales approches de résolution existantes.

## **2.2 Modélisation et représentation des réseaux de transport**

### **2.2.1 Modélisation par graphes**

La théorie des graphes est l'un des outils les plus utilisés pour la représentation d'un réseau de transport. La modélisation par graphes consiste à décrire les arrêts par des nœuds et les déplacements entre les stations par des arcs orientés et pondérés (fig. 2.1 : extrait de la thèse de B. Fayeche). Le poids de chaque arc est égal à la distance entre les deux stations représentées par ses deux sommets. Chaque ligne est alors représentée par une suite de nœuds/arcs/nœuds, reliant les terminus de départ et d'arrivée des véhicules dédiés à la desserte de cette ligne. La modélisation par les courses est surtout appliquée aux problèmes de planification du trafic des réseaux de transport public. Elle est aussi adaptée aux problèmes d'ordonnancement dynamique des véhicules, grâce à la considération d'une fenêtre temporelle, qui peut être ajustée pour converger vers un fonctionnement en temps réel [Fayeche 3]. Le principal avantage d'une modélisation par courses est la réduction considérable de la taille du graphe. Mais, en partie contre, cette représentation ne considère

que la configuration horaire du réseau et ne tient pas compte des flux de passagers dans le choix et la modification des courses de chaque véhicule. Elle est en fait appropriée à un ordonnancement réalisé pour une période assez longue à l'échelle d'une journée, où les courses représentent une ligne entière du réseau. Elle est alors plus utile pour une régulation en terminus qu'en ligne. En fait, le raisonnement en terme de courses ne profite pas de l'avantage de flexibilité des itinéraires, surtout dans le cas d'un réseau de bus perturbé [Fayech 03].



**Fig. 2.1 Modélisation d'un réseau de transport par graphes (source : B. Fayech).**

### 2.2.2 Modélisation par réseaux de Pétri

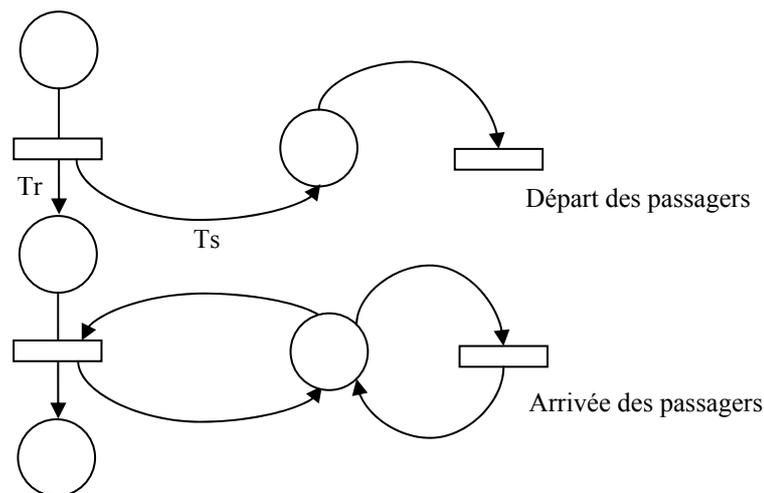
Les réseaux de Petri ont fait preuve de leurs qualités comme outil de modélisation graphique très performant. Ils ont été employés principalement pour des applications relevant des systèmes à événements discrets. Ils servent à la spécification, à la simulation, à l'analyse, à la mise en œuvre et à la surveillance d'un certain nombre de systèmes de degrés de complexité

très variés, comme par exemple : les systèmes de production automatisés, le contrôle du trafic terrestre ou aérien et les systèmes à événements discrets en général. Un réseau de Petri est un graphe biparti qui comporte deux types de nœuds : les places et les transitions, qui sont en nombre fini et non nul. Généralement, les places sont représentées par des cercles et les transitions par des traits ou des rectangles. Les nœuds sont reliés par des arcs orientés reliant une place à une transition ou l'inverse [Dridi 04] [Fayech 03].

La dynamique d'un réseau de Petri (Rdp) est décrite par un marquage associé à chaque état de ce réseau, ou plus précisément à chaque état du système modélisé par celui-ci. L'évolution de l'état correspond alors à une évolution du marquage, qui se traduit par le franchissement des transitions. Le franchissement (ou tir) d'une transition permet de passer d'un marquage à un autre par une règle très simple : une transition est validée si toutes ses places en entrée ont au moins un jeton, et le marquage résultant est obtenu en retirant un jeton de chacune des places d'entrée et en ajoutant un jeton à chacune des places de sortie. Ainsi, les RdP permettent d'appréhender et d'évaluer le comportement dynamique des systèmes. Ils sont capables d'exprimer et de visualiser l'occurrence d'événements, la mise en parallèle et la synchronisation, le partage des ressources, le non déterminisme, etc.

Plusieurs applications des réseaux de Petri relatives à la régulation et à la planification du trafic de transport ont été développées. Ainsi, nous pouvons citer les travaux de Abbas-Turki [Abbas-Turki 02] qui a modélisé les correspondances par les RdP stochastiques et de Nait-Sidi [Nait-Sidi 02] qui, lui aussi, a proposé un modèle RdP pour la gestion des correspondances où 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 basé sur l'algèbre Max-Plus. D'autre part, Ghaffari a utilisé les Rdp pour la modélisation du flux des voyageurs [Ghaffari, 99]. Comme les réseaux de Petri permettent d'avoir une simulation du comportement des systèmes de transport, les auteurs de [Castelain 02] ont présenté un modèle de RdP stochastique représentant à la fois les lignes et les flux de passagers d'un réseau de transport par bus (fig. 2.2). Cette modélisation a permis de représenter d'une manière assez fine et très simple le déplacement des passagers dans le réseau et la relation entre la variation du flux et le passage des véhicules aux stations. Elle a permis aussi de calculer sans difficulté la charge courante de chaque véhicule à chaque station du réseau, garantissant ainsi la mise à jour des charges de véhicules au fur et à mesure de leurs parcours. Cependant, la précision de ce modèle est inversement proportionnelle à sa taille, qui est considérable, pour une seule ligne du réseau. S'agissant d'un réseau, ce modèle serait

tellement important en taille qu'il serait ingérable. Pour pallier à cet inconvénient et gagner plus de concision, des modèles basés sur les Rdp colorés ont été construits, mais ce type de modèles se prête difficilement à l'analyse formelle [Dridi 04] [Fayech 03]. Ainsi, Mesghouni a proposé un modèle générique de réseaux de transport, qui tient compte du flux de passagers, avec pour objectif de mesurer l'impact des décisions de régulation sur ce flux. Le modèle proposé est basé sur les réseaux de Petri prédicat-transition T-temporisés, il peut être adapté sans difficulté à l'ensemble des modes de transport [Mesghouni, 98]. Par ailleurs, la mise en œuvre des Rdp colorés reste difficile, malgré les outils spécifiques d'analyse qui y sont dédiés. Partant de ce constat, Dridi [Dridi 04] a développé un modèle de surveillance d'un réseau de transport basé sur les réseaux de Petri colorés et temporisés. Le but d'une telle représentation est de représenter les différentes courses de l'ensemble des véhicules du réseau et de repérer les véhicules perturbés concernés par les perturbations le plus rapidement possible, afin de procéder à la régulation en un minimum de temps.



Tr : Taux de passagers qui restent dans le bus  
Ts : Taux de passagers qui descendent du bus

**Fig. 2.2 Modélisation par RdP d'un arrêt de bus (source : B. Fayech).**

### 2.2.3 Modélisation par systèmes multi-agents

**Définition :** « Un agent est une entité interactive qui existe en tant que partie d'un environnement partagé par d'autres agents. C'est une entité conceptuelle qui perçoit et agit avec initiative ou en réaction, dans un environnement où d'autres agents existent et

interagissent les uns avec les autres sur la base de connaissances partagées de communication et de représentation » [Fayech 03].

Selon la définition donnée par Green et Sycara [Green 1997] [Sycara 1998], un système multi-agent est un réseau d'agents faiblement couplés qui coopèrent pour résoudre les problèmes qui dépassent les capacités ou les connaissances individuelles de chaque agent. Les agents sont autonomes et peuvent être de natures hétérogènes [Fayech 03]. Les systèmes multi-agents, sont utilisés dans la résolution des problèmes liés à des systèmes ouverts, distribués et complexes. Ils consistent à modéliser le problème à l'aide d'un ensemble d'agents intelligents fonctionnant en commun à partir d'un contrôle centralisé. Le raisonnement individuel des agents peut améliorer la cohérence des systèmes multi-agents car chaque agent réfléchit sur les effets non locaux que peuvent avoir les actions locales, essaie de prévoir le comportement des autres agents et explique ou répare les conflits et les mauvaises interactions. Suivant sa conception et son rôle, un agent peut être de type cognitif, réactif ou hybride [Dridi 04].

Si le domaine d'un problème est particulièrement complexe, large ou imprévisible, la seule manière raisonnable de le traiter est de développer un nombre de composants fonctionnels, spécifiques et modulaires (agents) qui sont chacun spécialisés dans la résolution d'un aspect particulier du problème. En effet, les problèmes réels impliquent des systèmes ouverts distribués. Un système ouvert est celui dont la structure est capable de changer de façon dynamique. Les composants d'un tel système ne sont pas connus d'avance, peuvent changer au cours du temps et peuvent être constitués d'agents hétérogènes implémentés par des personnes différentes, à des instants différents et avec des techniques et outils différents. Quand des problèmes interdépendants surgissent, les agents doivent être capables d'interagir et de se coordonner pour gérer cette interdépendance, en se munissant de techniques basées sur la négociation ou la coopération, ce qui relève du domaine des systèmes multi-agents [Jennings et al. 98] [Sycara 98] [Fayech 03].

L'application des Systèmes Multi-Agents (SMA) a récemment connu une importante évolution, grâce au développement technologique et à l'Internet. En effet, grâce à la modularité qu'ils offrent et la coopération sur laquelle ils se basent pour résoudre des problèmes, les SMA ont déjà été appliqués avec succès au domaine du transport et notamment dans les SAD pour la régulation du trafic des bus d'un réseau urbain [Balbo, 00] [Laïchour 01] [Gruer 01] [Fayech 03].

Dans [Ljunberg 92], Ljunberg propose un système multi-agents pour le contrôle du trafic aérien de la ville de Sydney en Australie. Le but est de maximiser l'utilisation des pistes en

ordonnançant les atterrissages. Dans [Saussol 00], Saussol a modélisé un réseau de transport urbain par un système multi-agents pour gérer les correspondances. Les agents de son système sont les bus, les stations, les sections de lignes et les dépôts.

Laïchour [Laïchour 2002] a proposé une modélisation multi-agents hiérarchique qui comporte l'agent « acquisition » pour la gestion des passagers des bus aux stations, l'agent « correspondance » pour la détection et diagnostic des perturbations et l'agent « superviseur » de l'ensemble. D'autres auteurs ont utilisé les systèmes multi-agents pour la modélisation des réseaux de transport, on peut citer par exemple Balbo [Balbo 00], Bomarius [Bomarius 92], Champion [Champion 01]. Les systèmes multi-agents ont été utilisés aussi pour concevoir des systèmes d'aide à l'information des voyageurs [Zidi 05] [Trabdlsi 04].

## 2.3 Formulation mathématique

### 2.3.1 Détermination de l'horizon spatio-temporel de la régulation

Dans le but de contrôler l'évolution et l'impact (propagation) des perturbations, il est nécessaire de déterminer l'horizon spatio-temporel correspondant à chacune d'entre elles. Autrement dit, nous devons déterminer l'ensemble des stations et des véhicules concernés par une perturbation ou par une régulation. Ainsi, l'horizon de la régulation sera établi selon un axe spatial représenté par les arrêts intervenant dans la perturbation ou la régulation et un axe temporel représenté par les véhicules.

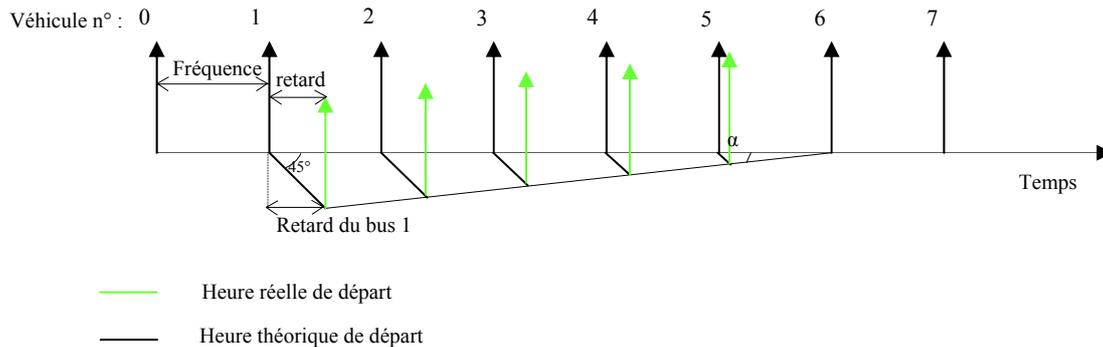
Nous désignons l'ensemble des stations considérées par  $S^H$  et celui des véhicules par  $V^H$ . Nous représentons alors l'horizon spatio-temporel de régulation par :

$$H = \{S^H \cup V^H\} \tag{2.1}$$

Notons  $S_k^r$  la  $k^{\text{ème}}$  station de la ligne  $r$ . De même,  $V_i^l$  représente le  $i^{\text{ème}}$  véhicule de la ligne  $l$ . Les décisions de régulation concernent alors tout véhicule  $V_i^l \in V^H$  et toute station  $S_k^r \in S^H$ .

Nous avons développé une méthode pour la détermination de l'horizon spatio-temporel de régulation de façon dynamique et en fonction des paramètres caractéristiques de chaque perturbation (véhicule et station concernés, retard constaté, fréquence de la ligne touchée, correspondances menacées ... etc.). Cette méthode géométrique est inspirée de l'algorithme de régulation au terminus bien connu. Cet algorithme commence dès qu'un véhicule arrive à son terminus avec un retard de valeur supérieure à son temps de battement (temps de pause entre deux services). Il opère en retardant les véhicules suivant le véhicule perturbé à leur passage

au terminus, dans le but de conserver les intervalles de temps séparant ceux-ci aussi réguliers que possible. Le régulateur doit fournir à l'algorithme l'heure de retour à la normale souhaitée (tableau de marche théorique), ainsi l'algorithme détermine le nombre de véhicules qui passeront au terminus avant cette date, et il calcule aussi les retards à imposer aux différents véhicules, en utilisant une simple méthode géométrique (théorème de Thalès : voir figure 2.4).



**Fig. 2.4 Principe de la régulation en terminus.**

Nous avons remarqué que la détermination du nombre de véhicules à considérer revient à la détermination de l'angle  $\alpha$  et, après l'analyse de cet algorithme, nous avons pu établir une relation entre  $\tan(\alpha)$  et la décélération  $\frac{V_2}{V_1} < 1$  du véhicule perturbé, où  $V_1$  et  $V_2$  sont respectivement les vitesses moyennes de ce véhicule avant et après la détection de la perturbation. Nous avons choisi  $\alpha$  tel que :

$$\tan(\alpha) = 1 - \frac{V_2}{V_1} \quad \text{et} \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{t_1}{t_2} = \frac{t_1}{t_1 + r} \quad 2.2$$

où  $t_1$  et  $t_2$  sont respectivement les temps de parcours du véhicule perturbé avant et après la détection de la perturbation entre la station courante et la station perturbée.

A partir de ce constat, connaissant le retard du véhicule perturbé, en considérant la station perturbée comme terminus partiel, nous pouvons calculer facilement le nombre de véhicules en amont à inclure dans la zone perturbée, par la formule suivante :

$$n_0 = \frac{r(1 - \tan(\alpha))}{f \tan(\alpha)} \quad \text{et} \quad N_{up} = (E(n_0) + 1) + 1 \quad 2.3$$

où  $r$  est le retard du véhicule perturbé, et  $f$  est la fréquence de la ligne et  $E(n_0)$  désigne la partie entière de  $n_0$ . Pour déterminer le nombre de véhicules en aval du véhicule perturbé à considérer, nous nous référons à la méthode utilisée par les régulateurs. En effet, selon l'expérience des régulateurs et leur savoir-faire, nous devons agir sur plus de véhicules en amont qu'en aval du véhicule perturbé. Nous proposons donc de calculer le nombre de véhicules en aval  $N_{down}$  par la formule suivante :

$$N_{down} = \begin{cases} N_{up} - 1, & \text{if } 0 < N_{up} \leq 3 \\ N_{up} - 2, & \text{if } N_{up} > 3 \end{cases} \quad 2.4$$

Finalement, le nombre total de véhicules de la ligne perturbée à inclure dans l'horizon de régulation est :

$$N_T = N_{up} + N_{down} + 1 \quad 2.5$$

La deuxième étape de notre méthode consiste en la détermination des arrêts de la ligne perturbée qui doivent être inclus dans l'horizon de la régulation. Notons  $S_{up}$  la première station desservie par le véhicule ( $V_{distr} + N_{up}$ ) après la détection de la perturbation  $t_{pert}$ , et  $S_{down}$  la première station desservie par le véhicule ( $V_{distr} - N_{down}$ ). Tous les arrêts situés entre ces deux stations doivent être pris en compte et ils appartiennent donc à l'horizon de régulation.

L'étape suivante consiste à déterminer, parmi les arrêts de la ligne perturbée, ceux qui correspondent à des nœuds de correspondance. Si un nœud de correspondance est inclus dans cette zone et si une correspondance risque de ne pas avoir lieu à cause de l'incident, il est alors nécessaire d'élargir la zone de régulation, pour y inclure des véhicules et des stations de la ligne avec laquelle la correspondance est prévue. Pour déterminer l'ensemble de ces entités, nous utilisons la même méthode, la seule modification à faire est de remplacer la fréquence de la ligne perturbée par celle de l'autre ligne.

Notre méthode a deux avantages : elle nous permet de traiter plusieurs perturbations simultanées et nous aide à réduire l'espace de recherche et, par conséquent, le temps de calcul en phase d'optimisation.

### 2.3.2 Variables de décision

Les variables de décision que nous considérons pour le problème de régulation du trafic d'un réseau de transport perturbé sont énumérées ci-dessous. Elles concernent l'affectation des véhicules aux différentes lignes, l'ordre dans lequel les arrêts sont desservis, les horaires d'arrivées et de départs, les durées de stationnement et les durées de parcours des véhicules.

#### a) Les variables de passage et de destination

Il s'agit ici de déterminer l'itinéraire à suivre pour chaque véhicule, qui se traduit par le choix des stations par lesquelles les véhicules vont passer. Nous décrivons ce choix par la variable de passage,  $a_{ij}^l$ , associée au véhicule  $V_i^l$  et à l'arrêt  $S_j^l$ . La variable  $a_{ij}^l$  est égale à 1 si le véhicule  $V_i^l$  passe par  $S_j^l$  et à 0 sinon.

Le choix de l'ordre de passage des véhicules aux arrêts sera décrit par la variable de destination,  $x_{ijk}^l$ , pour  $V_i^l$  entre  $S_j^l$  et  $S_k^l$ . On a donc  $x_{ijk}^l$ , qui est égale à 1 quand  $V_i^l$  va directement de  $S_j^l$  à  $S_k^l$  (c'est-à-dire  $k = j + 1$ ) et à 0 sinon.

#### b) Les horaires de passage

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

Pour ne pas traiter directement les horaires, nous proposons d'introduire des variables de décision liées au temps de parcours et au temps d'arrêt aux stations, tout en sachant qu'elles servent au calcul des horaires par des relations récursives que nous présentons par la suite.

#### c) Les durées de parcours

En se basant sur la durée initiale,  $t_{ijk}^l$ , du trajet direct du véhicule  $V_i^l$  de la station  $S_j^l$  à la station  $S_k^l$ , nous illustrons la modification du temps de parcours entre ces deux arrêts par  $\delta_{ijk}^l$ .

Cette variable de décision est donc de type réel. Elle est :

- positive, quand il s'agit d'un ralentissement du véhicule, en vue d'un allongement du parcours,
- négative, quand il s'agit d'une légère accélération, afin de gagner du temps sur le parcours.

L'intervalle dans lequel se situe la valeur de cette variable est fixé selon la nature du véhicule, sa vitesse, les conditions de circulation et les objectifs de régulation. Nous considérons :

$$\delta_{\min}^l \leq \delta_{ijk}^l \leq \delta_{\max}^l \quad 2.6$$

En supposant que les limites inférieures et supérieures,  $\delta_{\min}^l$  et  $\delta_{\max}^l$ , de la modification des durées de parcours sont associés à la nature de la ligne  $l$  du réseau.

En fait, la durée initiale du parcours entre deux stations dépend aussi de la nature du véhicule, de sa vitesse, des conditions de circulation, de la période de la journée, de la distance entre les arrêts, etc. Nous supposons que les temps de parcours liés aux chemins directs entre les différentes stations sont connus pour chaque véhicule. Il est à noter que, même si le chemin n'est pas inclus dans une des lignes du réseau, nous disposons quand même de sa longueur et de la durée du trajet qui lui correspond.

#### d) Durées de stationnement

Il est nécessaire de considérer aussi les durées des stationnements des véhicules aux différents arrêts. La modification de ces durées est illustrée par la variable  $\varepsilon_{ij}^l$  représentant le temps supplémentaire de stationnement imposé au véhicule  $V_i^l$  à l'arrêt  $S_j^l$ .

Cette décision possède une limite supérieure,  $\varepsilon_{\max}$ , préalablement fixée, qui dépend des différentes contraintes d'exploitation. Nous posons alors :

$$0 \leq \varepsilon_{ij}^l \leq \varepsilon_{\max} \quad 2.7$$

En fait, la durée de stationnement est associée généralement à celles des montées et descentes des personnes. Nous notons le temps d'arrêt de  $V_i^l$  à la station  $S_j^l$  par  $ts_{ij}^l$ .

Li et al. [Li & al, 91] ont proposé de calculer la durée d'arrêt des bus en utilisant l'expression suivante :

$$ts_{ij}^l = t_{mont} N_{mont_{ij}^l} + t_{desc} N_{desc_{ij}^l} \quad 2.8$$

où :

- $t_{mont}$  : le temps moyen que prend une personne pour monter dans le véhicule
- $N_{mont_{ij}^l}$  : le nombre de personnes qui montent à bord de  $V_i^l$  à la station  $S_j^l$
- $t_{desc}$  : le temps moyen que prend une personne pour descendre d'un véhicule
- $N_{desc_{ij}^l}$  : le nombre de personnes qui descendent de  $V_i^l$  à la station  $S_j^l$

Cependant, étant donné que la plupart des bus des réseaux de transport collectif possèdent au moins deux portes, une pour la montée et une autre pour la descente, l'expression ci-dessus est applicable seulement pour le cas des métros et tramways. Pour le cas des bus, la durée des

arrêts est représentée alors par le maximum entre la durée de la montée et celle de la descente, comme cela est formulé dans l'expression suivante.

$$ts_{ij}^l = MAX(t_{mont} \times Nmont_{ij}^l, t_{desc} \times Ndesc_{ij}^l) \quad 2.9$$

Par ailleurs, les temps initiaux d'arrêt aux différentes stations sont, en général, fixés par les tableaux de marches théoriques, selon la nature du véhicule, de la course et de l'arrêt (correspondance, relève, terminus, repos, etc.). Nous pouvons aussi autoriser des valeurs négatives aux  $\varepsilon_{ij}^l$ , afin de réduire les temps de repos ou d'attente dans les cas perturbés.

### e) Relation entre les variables de décision

Le calcul récursif des horaires de départ et d'arrivée se base sur :

- les décisions de modification des durées de parcours et des temps d'arrêt,
- les durées prévues de l'arrêt et du parcours.

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

$$td_{ij}^l = ta_{ij}^l + a_{ij}^l \times (ts_{ij}^l + \varepsilon_{ij}^l). \quad 2.10$$

C'est en fait la somme de l'horaire d'arrivée, du temps d'arrêt normal et de la modification imposée sur ce dernier.

L'horaire d'arrivée de  $V_i^l$  à la station  $S_j^l$  est la somme de :

- l'horaire de départ de la dernière station desservie avant  $S_j^l$ , notée  $Arrêt\_Prec(V_i^l, S_j^l)$ ,
- la durée normale de parcours,  $t_{ikj}^l$ , correspondant aux conditions réelles d'exploitation, entre  $S_k^l$  et  $S_j^l$ ,
- la modification apportée à cette durée.

$$ta_{ij}^l = td_{ik}^l + x_{ikj}^l \times (t_{ikj}^l + \delta_{ikj}^l) \quad 2.11$$

avec  $S_k^l = Arrêt\_Prec(V_i^l, S_j^l)$ .

### 2.3.3 Les critères

La modélisation des préférences est une étape nécessaire de l'aide à la décision. Lorsque l'on choisit de spécifier les préférences des décideurs en comparant les actions entre elles, il convient de déterminer le mode de comparaison de celles-ci. Toute action se caractérise par les conséquences de son éventuelle mise en exécution. Dans la plupart des contextes réels de décision, ces conséquences sont multiples et variées dans leurs natures. Elles reflètent la diversité des caractéristiques des actions et des points de vue jouant un rôle dans leur comparaison. Certaines conséquences permettent une comparaison directe des actions ;

lorsque le « mieux » et le « moins bien » ne sont pas implicitement déterminés par la conséquence elle-même, il est nécessaire d'effectuer un codage. Nous appellerons « critère » une fonction à valeur réelle définie et permettant de déterminer le résultat de la comparaison de toute paire d'actions, relativement à un axe de signification associé.

Nous considérons cinq critères de régulation, qui englobent en effet les objectifs du projet SART qui sont, rappelons-le : la minimisation du temps d'attente des voyageurs, de la durée de correspondances, de la durée des trajets dans le réseau, afin d'améliorer le confort des clients et par conséquent augmenter l'attractivité vers les transports collectifs. Ces critères sont :

### 2.3.3.1 Critère de régularité

Ce critère correspond à la régularité des intervalles de temps qui séparent les passages successifs des véhicules à une même station. Il est relatif à la minimisation de l'attente des voyageurs aux arrêts du réseau. L'attente considérée dans ce critère ne concerne que les voyageurs qui sont venus « à pied » aux arrêts. Autrement dit, nous ne traitons pas, dans ce critère, l'attente des passagers qui sont descendus d'autres véhicules afin d'effectuer des correspondances. Il s'agit alors des voyageurs qui ne sont pas en transfert dans le réseau.

#### a- Calcul de l'attente à un arrêt

Le calcul de l'attente des voyageurs à une station  $S_j^l \in S^H$  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  $S_j^l$ . L'intervalle de temps séparant leurs deux passages s'écrit sous la forme suivante :

$$\Delta t = ta_{i,j}^l - td_{ij}^l \quad 2.12$$

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

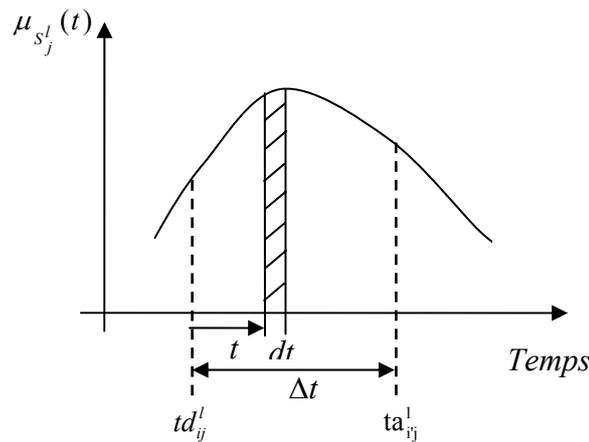
Considérons le taux des arrivées des voyageurs,  $\mu_{S_j^l}(t)$ , à l'arrêt  $S_j^l$  (fig.2.5). Nous pouvons alors calculer l'attente des passagers pendant  $\Delta t$  [Aloulou. 99] [Riz, 88] :

$$\text{attente}(\Delta t, S_j^l) = \int_0^{\Delta t} \mu_{S_j^l}(t)(\Delta t - t)dt \quad 2.13$$

L'arrivée des voyageurs aux arrêts est souvent considérée comme un processus de Poisson non stationnaire [Li 91]. Par ailleurs, si nous traitons des intervalles réduits ou situés dans des

périodes homogènes, nous pouvons considérer un flux constant de passagers,  $\mu_{S_j^l}$ . Par conséquent, le nombre de personnes arrivant à  $S_j^l$  pendant  $\Delta t$  est  $\mu_{S_j^l} \times \Delta t$  et l'attente moyenne devient alors le flux multiplié par  $\Delta t^2 / 2$  :

$$\text{attente}(\Delta t, S_j^l) = \mu_{S_j^l} \times \frac{\Delta t^2}{2}. \quad 2.14$$



**Fig.2.5 Distribution des arrivées de passagers à un arrêt.**

### **b- Calcul de l'attente totale sur l'horizon de régulation**

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. Dans ce but, le calcul de l'attente des voyageurs à une station n'est plus fondé sur le flux total d'arrivée, mais sur les flux spécifiés 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  $S_j^l$ , supposons que  $V_i^l$  part à  $td_{ij}^l$  et que l'arrêt  $S_k^l$  se trouve sur sa route. Notons alors  $Veh^+(V_i^l, S_j^l, S_k^l)$  le premier véhicule successeur de  $V_i^l$  à  $S_j^l$  et qui passe également par  $S_k^l$  après  $S_j^l$  (mais pas nécessairement immédiatement après).

Posons  $\mu(\Delta t_l, S_j^l, S_k^l)$  le taux constant d'arrivée pendant  $\Delta t_l$  à la station  $S_k^l$  et en destination de  $S_k^l \in S^H$ . Pour les passagers qui montent à  $S_j^l$  et qui vont effectuer une correspondance à une autre station située sur la route de  $V_i^l$ , nous considérons comme leur destination immédiate le nœud de correspondance qui est associé à leur trajet.

Notons  $V_i^l = Veh^+(V_i^l, S_j^l, S_k^l)$ , nous pouvons maintenant formuler l'attente, à l'arrêt  $S_j^l$ , des voyageurs allant à  $S_k^l$  pendant l'intervalle  $\Delta t$  qui sépare les passages successifs des deux véhicules,  $V_i^l$  et  $V_{i'}^l$ , sous la forme suivante :

$$attente(\Delta t, S_j^l, S_k^l) = \sum_{l=1}^{IN} \mu(\Delta t_l, S_j^l, S_k^l) \times \Delta t_l \times \left( \frac{\Delta t_l}{2} + \sum_{l'=l+1}^{IN} \Delta t_{l'} \right) \quad 2.15$$

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

$$N_{i'jk}^l = \sum_{l=1}^{IN} \mu(\Delta t_l, S_j^l, S_k^l) \times \Delta t_l. \quad 2.16$$

Avant de calculer l'attente totale, nous supposons que pour, chaque véhicule  $V_i^l$  passant par  $S_j^l$ , l'expression  $S_k^l > S_j^l$  représente les arrêts  $S_k^l \in S^H$  inclus dans sa route après  $S_j^l$ . La durée de l'attente de tous les passagers à  $S_j^l$  est alors la somme des attentes pour tous les véhicules  $V_i^l$  qui y passent, comme décrit ci-dessous :

$$attente(S_j^l) = \sum_{V_i^l \in V^H} (a_{ij}^l \times \sum_{S_k^l > S_j^l} attente(ta_{ij}^l - td_{ij}^l, S_j^l, S_k^l)). \quad 2.17$$

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

Finalement, puisque le critère de régularité est relatif à l'attente des voyageurs,  $AT$ , aux arrêts dans l'horizon de la régulation, cette dernière est calculée en sommant les temps d'attente aux différentes stations concernées.

$$AT = \sum_{S_j^l \in S^H} attente(S_j^l)$$

$$AT = \sum_{S_j^l \in S^H} \sum_{V_i^l \in V^H} (a_{ij}^l \times \sum_{S_k^l > S_j^l} attente(ta_{ij}^l - td_{ij}^l, S_j^l, S_k^l)) \quad 2.18$$

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

### 2.3.3.2 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 l'horizon  $H$ .

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

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

$$\omega_{ii'j}^{ll'} = \rho_{ii'j}^{ll'} \times Ndesc_{ij}^l \quad 2.19$$

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

Nous déduisons ainsi 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 en fait égale à  $td_{i'j}^{l'} - ta_{ij}^l$ , d'où :

$$TT = \sum_{V_i^l \in V^H} \sum_{V_{i'}^{l'} \in V^H} \sum_{S_j^l \in S^H} y_{ii'j}^{ll'} \times \omega_{ii'j}^{ll'} \times (td_{i'j}^{l'} - ta_{ij}^l) \quad 2.20$$

### 2.3.3.3 Critère de la 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). Dans ce but, et en se basant sur l'hypothèse 1, calculons tout d'abord le nombre de personnes qui montent et qui descendent de chaque véhicule à chaque station.

#### a- Calcul du nombre de passagers montant

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

$$Nmont_{ij}^{lm} = \sum_{S_k^r > S_j^l} N_{ijk}^{lmr} + \sum_{V_{i'}^{l'} \in V^H} y_{i'ij}^{l'lm} \times \omega_{i'ij}^{l'lm}. \quad 2.21$$

avec :

$N_{ijk}^l$  : le nombre de personnes montant à bord du véhicule allant de  $S_k^r$  à  $S_k^r$ ,

$\omega_{i'ij}^{l'lm}$  : le nombre de personnes en correspondance de  $V_{i'}^{l'}$  à  $V_i^l$ .

### b- Calcul du nombre de passagers descendant

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

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

$$Ndesc_{ij}^l = \sum_{S_k^l < S_j^l} (N_{ikj}^l + \sum_{V_{i'}^{l'} \in V^H} y_{i'ik}^{l'} \times \lambda_{i'ik}^{l'} \times \omega_{i'ik}^{l'}). \quad 2.22$$

### c- Calcul de la charge

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

$$C_{ij}^l = C_{ij}^l - Ndesc_{ij}^l + Nmont_{ij}^l. \quad 2.23$$

Le calcul de la charge des véhicules, des nombres de personnes montant, descendant ou en correspondance se fait d'une manière récursive.

### d - Calcul de la durée totale du passager

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

$$RT = \sum_{V_i^m \in V^H} \sum_{S_j^m \in S^H} a_{ij}^m \times C_{ij}^m \times (td_{ij}^m - td_{ij'}^m) \quad 2.24$$

### 2.3.3.4 Les kilomètres commerciaux:

Il s'agit de minimiser l'écart entre les distances théorique et réelle parcourues par les différents véhicules, ce critère est très important au cas où l'on décide de changer l'itinéraire d'un véhicule et en cas de reconfiguration du réseau. Il a été formulé comme suit :

$$KM = \sum_{V_i^l \in V^H} \sum_{S_j^l \in S^H} a_{ij}^H \times a_{ij}^l \times d_i^l(S_j^l, S_j^l) \quad 2.25$$

où  $d_i^l(S_j^l, S_j^l)$  est la distance parcourue par le véhicule  $V_i^l$  entre ces deux stations successives de la même ligne.

### 2.3.3.5 La qualité de service :

La mesure de la qualité de service peut être différente d'une compagnie de transport à une autre mais elles sont toutes d'accord sur l'importance de ce critère [Laurenço 01]. Nous avons choisi en consentement avec notre partenaire industriel de mesurer la qualité de service par le nombre de stations non desservies, le nombre d'échanges de véhicules et de conducteurs et le nombre de transbordements. Nous voulons minimiser le maximum de ces trois termes :

$$QS = \max_{V_i^l \in V^H} (n\_change(V_i^l), n\_trans(V_i^l), n\_stat(V_i^l)) \quad 2.26$$

où  $n\_change(V_i^l)$ ,  $n\_trans(V_i^l)$ ,  $n\_stat(V_i^l)$  sont respectivement les nombres d'échanges de véhicules et de conducteurs, de transbordements et de stations non desservies.

### 2.3.4 Les contraintes

Plusieurs contraintes sont à prendre en compte lors de la régulation en ligne du trafic dans un réseau. Elles peuvent être liées à la configuration temporelle ou spatiale du système.

Concernant les itinéraires des véhicules, il est nécessaire d'avoir une conformité entre les variables de passage et les variables de destination. Ainsi, le véhicule  $V_i^l$  doit avoir une seule destination immédiate après  $S_j^l$ .

$$\sum_{k>j} x_{ijk}^l = a_{ij}^l \quad 2.27$$

De même, nous imposons qu'un seul arrêt soit desservi juste avant  $S_j^l$  par  $V_i^l$ . Autrement dit, ce véhicule possède une unique origine immédiate.

$$\sum_{k<r} x_{ikj}^l = a_{ij}^l \quad 2.28$$

Il est important également d'imposer une contrainte sur les intervalles de passage successifs de deux véhicules d'une même ligne à un arrêt. En effet, pour le cas du tramway ou des rames de métro, et à cause du partage des voies, il faut fixer un intervalle minimal de sécurité entre

les passages des véhicules pour éviter les accidents. Nous supposons que, si deux véhicules appartiennent à une même ligne, alors ils partagent une même voie. Nous définissons alors, pour chaque ligne  $l$ , une borne inférieure  $Inter_{\min}^l$  pour les intervalles de passage entre les véhicules. D'où, pour  $V_i^l \in V^H$ , ayant  $V_i^l$  comme premier successeur à l'arrêt  $S_j^l \in S^H$ ,  $V_i^l$  doit arriver au moins  $Inter_{\min}^l$  minutes après le départ de  $V_i^l$ .

$$ta_{i,j}^l - td_{ij}^l \geq Inter_{\min}^l \quad \mathbf{2.29}$$

Cette contrainte peut également être appliquée sur les bus, elle ne concernerait donc pas la sécurité, mais plutôt la régularité. Dans ce cas, une limite supérieure pour les intervalles pourrait aussi être fixée.

Pour le même problème de partage des voies de métro ou de tramway, il est nécessaire d'imposer une limite pour la durée de stationnement des véhicules aux différentes stations du réseau. Cette limite,  $ts \max_{ij}^l$ , peut dépendre du véhicule ( $V_i^l$ ) et de la station ( $S_j^l$ ) concernés, comme illustré ci-dessous.

$$td_{ij}^l - ta_{ij}^l \leq ts \max_{ij}^l \quad \mathbf{2.30}$$

La correspondance étant un critère très important pour les usagers du transport public, il est possible d'imposer des limites sur les durées des transferts entre les différentes lignes du réseau, afin d'éviter la dégradation de la qualité de service. Ainsi, pour une correspondance de  $V_i^l$  vers  $V_{i'}^l$  à la station  $S_j^l$ , des limites inférieures  $Trans_{\min}$  et supérieures  $Trans_{\max}$ , sont imposées par les exploitants du réseau, sur la durée de transfert :

$$Trans_{\min} \leq (td_{i',j}^l - ta_{ij}^l) \times y_{ii',j}^l \leq Trans_{\max} \quad \mathbf{2.31}$$

La dernière contrainte concerne la capacité des véhicules du réseau. Cette capacité dépend du mode de transport et du type du véhicule (nombre de wagons, bus articulés, etc.). La charge de chaque véhicule  $V_i^l$  au départ de  $S_j^l$  doit être alors inférieure à  $C \max_{ij}^l$ .

$$C_{ij}^l \leq C \max_{ij}^l \quad \mathbf{2.32}$$

Nous pouvons formuler le problème de régulation du trafic d'un réseau de transport comme suit :

$$\begin{cases} \min \Delta AT(x), \Delta TT(x), \Delta RT(x), \Delta KM(x), \Delta QS(x) \\ \text{sous: 2.27, ..... 2.32.} \end{cases} \quad \mathbf{2.33}$$

où  $\Delta AT(x), \Delta TT(x), \Delta RT(x), \Delta KM(x), \Delta QS(x)$  sont les variations des cinq critères considérés entre les états régulé et théorique du réseau perturbé.

### 2.3.5 Caractéristiques du modèle mathématique

Le problème de la régulation du trafic d'un réseau de transport collectif est un problème difficile à résoudre avec des méthodes classiques. Il est caractérisé par un espace de recherche discret et de dimension importante et par la non linéarité des fonctions objectif et des contraintes [Fayech 03]. Le modèle mathématique du problème de régulation proposé au paragraphe précédent comporte plusieurs types de variables de décision : variable de passage,  $a_{ij}^l$ , variable de destination,  $x_{ijk}^l$ , modification de la durée du trajet interstations,  $\delta_{ijk}^l$ , et modification imposée sur la durée de stationnement aux arrêts,  $\varepsilon_{ij}^l$ . Les deux premiers types sont en fait binaires, égaux à 0 ou 1, ce qui rend l'espace de recherche discret. Les deux autres variables sont exprimées en nombres entiers en minutes, mais sont restreints dans des intervalles fixes, ce qui leur donne aussi un caractère discret.

Pour illustrer la dimension de l'espace de recherche, les nombres de variables de décisions pour un horizon de  $v$  véhicules et  $s$  stations, calculés par B. Fayech sont récapitulés alors dans le tableau 2.1. Le nombre total de variables est alors de  $v \times s \times (s+1)$ , ce qui est de l'ordre de  $O(v \times s^2)$  [Fayech 03].

Variable	$a_{ij}^l$	$\varepsilon_{ij}^l$	$x_{ijk}^l$	$\delta_{ijk}^l$
Nombre	$v \times s$	$v \times s$	$v \times s \times (s-1) / 2$	$v \times s \times (s-1) / 2$

**Tableau 2.1. Nombre de variables de décision**

Dans [Fayech 03], l'auteur a calculé aussi le nombre de solutions possibles que peut contenir l'espace de recherche. Pour les variables binaires, elle ne peuvent avoir que 0 ou 1 comme valeur, on aurait ainsi  $2^{v \times s} \times 2^{v \times s \times (s-1)/2}$  solutions possibles. De plus, si nous tenons compte des deux autres variables, le nombre de solutions possibles définissant la taille de l'espace de recherche serait alors de :

$$2^{v \times s} \times 2^{v \times s \times (s-1)/2} \times (\varepsilon_{\max} + 1)^{v \times s} \times (\delta_{\max} + \delta_{\min} + 1)^{v \times s \times (s-1)/2} \quad \mathbf{2.34}$$

puisque les  $\varepsilon_{ij}^l$  sont entre 0 et  $\varepsilon_{\max}$  et nous prenons les  $\delta_{ijk}^l$  entre  $-\delta_{\min}$  et  $\delta_{\max}$ . Supposons alors que  $\varepsilon = \varepsilon_{\max} + 1$  et que  $\delta = 1 + \delta_{\min} + \delta_{\max}$ . La taille de l'espace de recherche devient de :

$$[2 \times \varepsilon \times (2\delta)^{(s-1)/2}]^{v \times s}$$

Pour un horizon relativement réduit avec  $v=5$  et  $s=10$ , le modèle comporterait 550 variables. En prenant  $\delta = \varepsilon = 3$ , la taille de l'espace de recherche obtenue est alors de  $10^{214}$ , ce qui représente une dimension extrêmement importante [Fayech 03].

La dimension de l'espace de recherche évolue exponentiellement avec les paramètres définissant la taille de l'horizon,  $v$  et  $s$ . Pour choisir une solution, nous devons tester la performance de chaque possibilité en parcourant l'intégralité de l'espace. Puisque la durée de traitement du problème par un processeur est supposée évoluer considérablement avec ces mêmes paramètres, la dimension de l'espace impliquerait alors un énorme coût en temps de calcul.

Par ailleurs, le problème de régulation du trafic est associée au domaine global des tournées des véhicules, et le modèle mathématique que nous avons proposé a beaucoup de similitudes avec les modèles associés aux problèmes POMDV, qui sont considérés NP-difficiles [Tan 01].

Finalement, le caractère discret de l'espace de recherche, la non linéarité des critères et des contraintes et le nombre important de contraintes et de variables rendent le problème de régulation très difficile à gérer avec des techniques classiques, telles que celle de séparation et d'évaluation progressive [Fayech 03] [Deb 98]. De plus, la présence de plusieurs critères antagonistes à optimiser implique une recherche multicritère des solutions, ce qui rend la tâche encore plus compliquée. Par conséquent, afin de mieux traiter les difficultés précédemment citées, nous choisissons de résoudre la problématique de la régulation du trafic dans un réseau de transport collectif perturbé par des techniques d'optimisation, basées sur les algorithmes évolutionnaires que nous allons détailler dans le chapitre suivant.

## **2.4 Aide à la décision multicritère**

B. Roy [Roy 85] a défini l'aide à la décision comme « l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponses aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, élément concourant à éclairer la décision et normalement à prescrire, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part ».

M. Grabish [Grabish 03] a défini la décision multicritère comme « l'action de synthétiser des informations reflétant des points de vue ou aspects différents concernant un ensemble d'objets, afin de choisir un ou plusieurs objets parmi cet ensemble » [Grabish, 95].

L'ensemble des objets désigne, selon les cas, l'ensemble des solutions potentielles d'intérêt pour le décideur, que l'on appelle encore alternatives ou actions. Cet ensemble d'objets peut être énuméré sous forme d'une liste, généralement de petite taille, ou décrit de façon implicite, en général de grande taille, et éventuellement infini. Chaque objet est décrit par un ensemble d'attributs, qui sont des caractéristiques mesurables de l'objet en question. Un critère est l'association d'un point de vue et d'une préférence. Ainsi, le décideur exprime ses préférences sur les différentes valeurs possibles de l'attribut [Grabish 03].

M. Grabish [Grabish 03] a cité deux contextes d'applications différents de la décision multicritère :

- a) L'aide à la décision, où le décideur cherche à prendre une décision en interrogeant un système. Ce dialogue vise à construire étape par étape un modèle de décision capable à refléter les préférences et la stratégie de décision du décideur. Signalons ici, que le temps nécessaire pour mettre ce modèle en place, peut varier de l'heure à plusieurs jours. En tout état de cause c'est le décideur qui a le dernier mot et qui prend la décision finale. Parmi les exemples de ce cas de figure, nous pouvons citer : le choix d'emplacement d'une autoroute, ou d'une centrale nucléaire ou d'une ligne de TGV, l'évaluation des élèves, l'achat d'un véhicule ou d'un nouveau appartement [Grabish 03].
- b) La décision automatique, où, cette fois, c'est le système qui prend lui-même la décision en un temps très court. Ce qui est fréquent dans les situations où la complexité du problème et les contraintes temporelles dépassent largement les capacités de l'être humain. L'allocation dynamique des ressources, la planification, la régulation du trafic aérien et terrestre, sont des exemples parmi d'autres pour la décision automatique.

#### **2.4.1 Complexité des problèmes réels d'aide à la décision**

Dans le domaine de l'aide à la décision, le décideur est souvent confronté à un problème difficile, à part le caractère conflictuel des critères qu'il veut prendre en compte. La nature complexe des situations décisionnelles montre combien il peut être précieux, pour ce décideur, de bénéficier du support d'une méthode pouvant représenter et formaliser les critères et l'aider à différencier les décisions candidates, en proposant un classement de celles-ci respectant ses préférences [Soulhi 00]. En outre, la pratique réelle de l'aide à la décision peut engendrer des limitations quant au caractère objectif ou scientifique de l'intervention de l'homme d'étude. Ainsi, Roy [Roy 89] a énuméré à ce sujet cinq causes qui peuvent altérer, à son avis, l'objectivité d'une décision. Ces causes sont :

- L'évolution de l'ensemble des actions, même si défini de manière très stable, suivant l'étude dont il est l'objet.
- L'identification du décideur, qui n'est pas toujours bien connu. Il est donc difficile de connaître clairement ses objectifs et les enjeux qui lui préoccupent.
- L'imprécision et la subjectivité des données : même si le décideur est bien identifié, ses préférences revêtent toujours un caractère arbitraire et incertain, hésitant et parfois conflictuel, voir même contradictoire.
- L'insuffisance des modèles mathématiques : en effet, on ne peut pas différencier entre une bonne et une mauvaise décision sur la seule base d'un modèle mathématique. Il est très important, de prendre en compte les aspects organisationnels et culturels du processus décisionnel.

D'autre part, l'aide à la décision multicritère traite des modèles mathématiques, mais utilise également la modélisation de situations réelles fort complexes ; aussi le développement de modèles utiles ne peut être que le fruit du contact entre théoriciens et praticiens [OuldSidi 03].

#### **2.4.2 Démarches et méthodes de résolution d'un problème d'aide à la décision**

La méthodologie générale de résolution d'un problème de décision multicritère combine une opération de comparaison et d'agrégation. L'ordre dans lequel sont faites ces deux opérations va déterminer deux grands types d'approches possibles pour la décision multicritère. La première est l'approche « agréger puis comparer », dont la principale représentante est la théorie de l'utilité multi-attributs (MAUT) [Keeney 93]. La seconde approche est « comparer puis agréger » comme les méthodes dites de surclassement, et plus particulièrement les différentes versions de la méthode ELECTRE, fondée par Bernard Roy [Roy 93]. Ces deux méthodes sont plutôt dédiées à la modélisation des préférences du décideur [Siarry 02].

Il existe, cependant, un grand nombre de méthodes d'optimisation pour résoudre un problème d'aide à la décision multicritère. Ainsi, apparaît une autre difficulté relative à la résolution de ce type de problèmes, qui est le choix de la méthode d'optimisation à utiliser. En effet, on peut distinguer trois grandes familles des méthodes d'optimisation définies en fonction de l'instant où l'on prend la décision d'effectuer ou non un compromis entre les fonctions objectif. Il s'agit des méthodes d'optimisation a priori, progressives et a posteriori. Le lecteur intéressé peut consulter à ce titre le livre de Patrick Siarry [Collette 02].

Dans les paragraphes suivants, nous présentons quelques exemples des méthodes de résolution d'un problème de décision multicritère.

**Méthode exacte :** Une méthode exacte cherche à atteindre l'optimum global. Pour cela, elle effectue, souvent, une énumération des solutions de l'espace de recherche. L'exemple typique de ce genre de méthodes est la méthode « Branch and bound », qui procède comme suit : elle commence par diviser l'espace de recherche en sous-espaces, puis elle cherche une borne minimale en terme de fonction objectif associée à chacun de ces sous-espaces, ensuite elle élimine les mauvais sous-espaces, elle re-itére cette procédure jusqu'à l'obtention de l'optimum global. Notons que les méthodes exactes sont à éviter dans le cas où l'espace de recherche est de grande taille ou lorsqu'une contrainte de temps de calcul est imposée [Siary 02].

### **Méthodes approchées :**

Les méthodes approchées sont utilisées pour la résolution des problèmes d'aide à la décision pour lesquels on ne trouve pas de solution optimale faute de disponibilité d'algorithme de résolution. Les méthodes approchées ne garantissant pas l'obtention de l'optimum mais elles permettent de trouver une bonne solution accessible. Ces méthodes peuvent être classées en plusieurs grandes familles. On distingue :

- Les méthodes basées sur les heuristiques,
- Les méthodes basées sur les connaissances,
- Les méthodes inspirées par l'analogie avec des phénomènes biologiques,
- Les méthodes liées à l'intelligence artificielle.

#### **2.4.2.1 Les méthodes basées sur les heuristiques**

Elles sont développées pour résoudre un type de problèmes en particulier. Elles ne fonctionnent que sur le type de problème pour lequel elles ont été conçues, on peut citer par exemple l'algorithme de type « First Fit », dédié au problème de « Bin packing », ou problème de rangement [Siary 03].

Les heuristiques se présentent comme un ensemble de connaissances compilées, résultats de l'expérience, qui sont généralement vraies sans être démontrables. Elles offrent un excellent rapport entre la qualité de solutions obtenues et la facilité d'implémentation. Ces méthodes représentent les techniques avancées appliquées à l'aide à la décision.

#### **2.4.2.2 Méthodes basées sur les connaissances**

Dans cette catégorie, on applique les concepts de l'intelligence artificielle pour la résolution des problèmes d'aide à la décision. L'outil de manipulation est un système expert adapté au domaine d'étude. Le système expert exploite, d'une part, un ensemble de connaissances

intégrées dans une base de faits et un ensemble de règles intégré dans une base de règles, et d'autre part, un moteur d'inférence, qui traite les connaissances à travers l'ensemble de règles pour développer un ensemble de décisions.

#### **2.4.2.3 Les méthodes inspirées par l'analogie avec des phénomènes biologiques**

Nous assistons ces dernières années à l'émergence d'un certain nombre de méthodes dont la création a été inspirée par l'analogie avec des phénomènes biologiques, telles que les algorithmes génétiques et les réseaux de neurones. Ces méthodes forment une sorte de lien entre deux domaines de recherche différents : la recherche opérationnelle et l'intelligence artificielle, mais ayant le même besoin de genre d'approche.

#### **2.4.2.4 Les méthodes liées à l'intelligence artificielle**

Outre les méthodes du paragraphe précédent, des techniques de l'intelligence artificielle (IA) ont été utilisées pour résoudre des problèmes d'aide à la décision. Les systèmes de l'IA doivent constituer des outils adaptés permettant d'exprimer les stratégies des experts et celles des hommes d'étude, et de modifier automatiquement celles-ci en fonction des objectifs (nouvelles contraintes, pannes, incidents etc. ...). On rappelle que l'objectif de ces méthodes est l'obtention de solutions admissibles satisfaisant les critères. Ces méthodes utilisent les techniques de représentation des connaissances, de raisonnement à base de règles et d'apprentissage. Parmi les systèmes intégrant ces méthodes nous citons le système ORBAID (Ordonnancement d'Atelier Basé sur une Aide à la Décision) développé entre 1980 et 1988 par des chercheurs du Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes à Toulouse [Soulhi 00]. Le problème est posé dans ce cas comme un problème de prise de décision en temps réel. Constatant que la connaissance d'une seule solution du problème posé est de peu d'utilité dans un contexte réel, les auteurs ont préféré une approche par l'aide à la décision, qui vise à fournir aux décideurs un ensemble d'actions possibles, appelé « groupe admissible d'opérations permutables », compatible avec les contraintes à satisfaire, en leur laissant le soin de choisir celle qui paraît la meilleure. A cet effet les auteurs ont défini une procédure de raisonnement qui se décompose en deux étapes :

- **L'étape analyse** : dans cette première étape, on cherche, à l'aide d'un modèle prenant en compte les contraintes essentielles du problème, les caractéristiques d'un ensemble de solutions compatibles avec ces contraintes.

- **L'étape d'aide à la décision :** dans cette deuxième étape, ces informations sont exploitées en temps réel pour générer et proposer au décideur un choix d'actions possibles.

La littérature concernant l'aide à la décision est très riche et les problèmes traités touchent tous les domaines de la vie, ainsi on peut citer les travaux suivants.

Gandibleux [Gandibleux 95] a étudié l'activité décisionnelle développée par un opérateur de conduite durant la reprise d'un défaut. Cette activité soulève des problèmes comportant un caractère imprévisible, combinatoire et multicritère. Il a proposé quatre modèles de résolution. Ils sont basés conjointement sur les concepts de l'intelligence artificielle et de la recherche opérationnelle. Un premier modèle est dédié à l'organisation en un système à base de connaissance du savoir-faire de l'opérateur humain. Les résultats issus de ce modèle seront utilisés par les modèles d'aide à la décision. Les deux modèles suivants formalisent une conception orientée résultat. Le dernier modèle s'inscrit dans une conception orientée processus de l'aide à la décision et répond à une problématique de choix itéré sur un ensemble discret et évolutif d'actions.

Perny [Perny 92] s'est intéressé à l'analyse et la rationalisation de procédures d'aide multicritère à la décision et à l'élaboration de modèles mathématiques non conventionnels et d'outils informatiques permettant la représentation et l'exploitation de connaissances imparfaites. Plus précisément, comment les logiques multivalentes sous-jacentes aux théories de sous-ensembles flous permettent de généraliser les concepts et propriétés classiquement employées pour modéliser et traiter l'information ?

Les travaux de Moussou [Moussou 93] concernent les problèmes liés à l'évaluation de l'importance relative des critères en aide multicritère à la décision. Lorsque l'analyse d'un problème décisionnel est fondée sur l'explicitation d'un ensemble de critères, il est difficile de discriminer parmi les actions dont les évaluations sur certains critères confèrent à chacune d'elles des avantages et des inconvénients. Seule l'introduction des informations supplémentaires concernant les préférences du décideur permet de trancher entre ces actions conflictuelles. Ainsi, Moussou a tenté de donner des éléments de réponses au problème de l'évaluation des paramètres d'importance utilisés dans les modèles et de systèmes d'aide à l'acquisition d'informations préférentielles tout à la fois conviviaux et pertinents.

D'autres auteurs proposent des modèles flous pour l'agrégation des données et l'aide à la décision. L'optique de ces recherches est surtout orientée vers les deux étapes importantes de

la chaîne de raisonnement : synthèse des informations disponibles et prise de décision [Kelman 96].

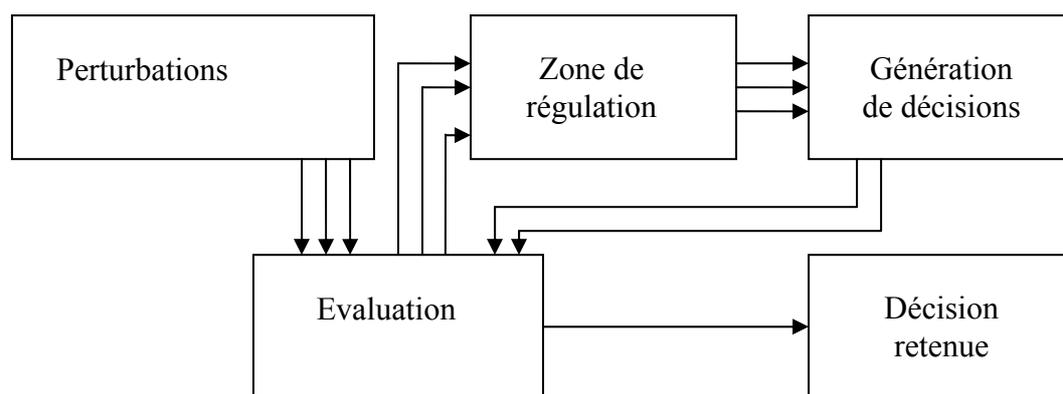
On peut aussi citer les travaux du département de génie mécanique de l'Ecole Polytechnique de Montréal (Canada) [Achiche 00], [Baron 01] ; les chercheurs utilisent un algorithme génétique pour générer (concevoir) automatiquement une base de connaissance pour un SAD et cela à partir de données quelconques.

Les chercheurs du pôle d'intelligence artificielle du Laboratoire d'Informatique de Paris 6 s'intéressent à la notion du contexte et travaillent en collaboration avec une équipe brésilienne sur un système d'aide à la régulation du trafic (SART) [Pasquier 02], [Brézillon 00].

Les chercheurs du laboratoire d'analyse et modélisation de systèmes pour l'aide à la décision de l'université Paris-Dauphine (LAMSADE), travaillent sur des problèmes d'aide à la décision allant de l'agro-environnement à la gestion des pôles d'échange en transport urbain, ils utilisent une approche multi-agents [Lebars 03] [Sommerlatt 02].

## 2.5 Module d'aide à la décision proposé

Comme nous l'avons déjà signalé, nous nous intéresserons essentiellement aux problèmes de construction et d'évaluation de décisions. Ceci n'est pas dû au hasard, dans la mesure où ces deux tâches sont les plus difficiles à réaliser dans le processus d'aide à la décision. Nous proposons donc le module d'aide à la génération et l'évaluation de décision présenté sur la figure 2.6.



**Fig. 2.6. Architecture du module d'aide à la régulation proposé**

### **2.5.1 Génération de décisions**

Dès la détection d'une perturbation, le système d'aide à l'exploitation doit envoyer toutes les informations relatives à cette perturbation au système d'aide à la décision. Ces informations concernent le moment et l'endroit où la perturbation s'est produite, le véhicule concerné, la prochaine station, la ligne et sa fréquence...etc. A partir de ces informations et en fonction des circonstances, notre module de génération et de construction de décisions, utilisant une base de règles, génère toutes les décisions réalisables. Si, par exemple, le véhicule perturbé s'approche de son terminus, le générateur de décisions génère en premier lieu une régulation au terminus plutôt que les autres. De même si ce véhicule vient de quitter son terminus. Par contre, si le véhicule est en pleine course, une régulation en ligne sera prioritaire. Nous signalons ici que la base de règle utilisée a été conçue à partir des conditions préalables nécessaires pour la mise en œuvre de chaque classe de décision. En outre, comme la régulation en ligne est la plus utilisée à cause de son efficacité et la facilité de sa mise en œuvre, vu que cette classe de décision est la plus difficile à construire et à évaluer, et comme la régulation en ligne est un problème d'optimisation multiobjectif NP- difficile [Borne 03], nous avons accordé une importance particulière à cette classe de décision et nous proposons de la générer par une approche évolutionnaire.

### **2.5.2 Evaluation des décisions**

Après la construction de toutes les décisions réalisables vient l'étape de l'évaluation, qui sert à attribuer un score global calculé en fonction des performances partielles de chaque décision. Ce score est calculé en utilisant les méthodes d'évaluation décrites au chapitre suivant, en particulier une intégrale de Choquet.

## **2.6 Conclusion**

Nous avons traité dans ce chapitre la modélisation de la problématique de régulation du trafic dans les systèmes de transport collectif. En effet, nous avons présenté un état de l'art des différents modèles possibles des réseaux de transport, basés sur la théorie des graphes, sur les réseaux de Pétri, sur la notion de débit dans le trafic routier, sur les itinéraires et sur la notion d'agent. Cependant, aucun des modèles existants ne satisfait pleinement les conditions requises pour une régulation en ligne efficace. En effet, il est primordial, pour un outil d'aide à la décision, de représenter la multimodalité du réseau, de tenir compte de la demande, d'opérer en temps réel et de proposer des décisions qui adaptent les horaires et les itinéraires des véhicules. Nous tenons à signaler ici que nous n'avons pas proposé un modèle particulier

pour ce problème, car nous avons opté pour l'utilisation du logiciel *Quest* dédié à la modélisation et à la simulation des systèmes à événements discrets en général et que nous allons présenter dans le chapitre consacré aux résultats de simulation. Nous avons aussi proposé d'introduire deux nouveaux critères par rapport aux modèles mathématiques existants, ces deux critères que nous jugeons très importants pour la prise de décision sont la distance parcourue et la qualité de service. Les caractéristiques liées à la dimension de l'espace discret de recherche, la non-linéarité et l'aspect multicritère du modèle mathématique exposé nous ont incités à l'utilisation d'une technique d'optimisation, les algorithmes évolutionnaires que nous présentons au chapitre 3.

### **Chapitre III. Approches évolutives de résolution proposées pour la régulation en ligne du trafic**

### 3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré aux approches évolutionnaires de régulation proposées principalement pour la génération de décisions de type « régulation en ligne » du trafic d'un réseau de transport collectif perturbé. Nous y présentons quatre approches de résolution différentes. La première approche agrégative est basée sur un calcul dynamique des poids attribués aux divers critères. La seconde approche utilise une intégrale de Choquet pour agréger les critères de régulation. Les deux autres approches non agrégatives reposent sur le principe de Pareto dominance. Avant de présenter ces approches, nous rappelons les principes généraux des métaheuristiques et nous mettons plus l'accent sur les algorithmes évolutionnaires en particulier.

La régulation en ligne est la plus utilisée à cause de son efficacité et la facilité de sa mise en œuvre. Vu que cette classe de décision est la plus difficile à construire et à évaluer, et comme il a été prouvé que la régulation en ligne appartient à la classe des problèmes d'optimisation multiobjectif NP- difficile [Deb 98] [Borne 03], nous avons accordé une importance particulière à cette classe de décision et nous proposons de la générer par une approche évolutionnaire. Les approches que nous proposons dans ce chapitre visent donc à aider le régulateur à déterminer les valeurs des retards à imposer aux différents véhicules de la zone de régulation.

Par ailleurs, la résolution d'un problème d'optimisation consiste à trouver la ou les meilleures solutions vérifiant un ensemble d'objectifs et de contraintes défini par l'utilisateur. Pour déterminer si une solution est meilleure qu'une autre, il est nécessaire que le problème à traiter introduise un ou plusieurs critère(s) de comparaison. Ainsi, la meilleure solution est celle ayant obtenu le meilleur score, au regard du ou des critère(s) défini(s) par le décideur.

Comme nous l'avons dit au chapitre 2, les méthodes exactes explorent la totalité de l'espace de recherche et elles peuvent produire une solution optimale, lorsque cet espace est de petite taille et aucune contrainte de temps n'est imposée. Cependant, le temps de calcul nécessaire pour atteindre une solution optimale peut être important, malgré les nombreuses techniques qui ont été conçues pour accélérer l'énumération. Dans ce cas de figure, les méthodes approchées représentent une bonne alternative indispensable et complémentaire. Ces méthodes ne cherchent pas à obtenir la solution optimale du problème traité, mais elles peuvent donner une solution *proche* de l'optimum, en un temps de calcul relativement court. Cet avantage vient du fait que ces méthodes, contrairement aux méthodes exactes, examinent

seulement une partie de l'espace de recherche et, qu'elles sont souvent guidées par des heuristiques dans le choix des zones visitées.

## **3.2 Les métaheuristiques**

Les métaheuristiques sont des méthodes de résolution approchées pour les problèmes d'optimisation difficile. Le recuit simulé, la recherche tabou, les algorithmes évolutionnaires et les algorithmes de colonies de fourmis sont, entre autres, les exemples les plus connus de métaheuristiques. Généralement, on fait appel à une métaheuristique quand les méthodes exactes deviennent inefficaces. Les métaheuristiques sont fondées sur une idée générale inspirée par analogie avec un processus, comme le recuit d'un métal dans le cas du recuit simulé. Elles sont d'origine combinatoire, mais elles peuvent s'adapter à n'importe quel type de problème et donnent de bons résultats sans garantir l'optimalité de la solution.

D'après Y. Collette [Collette 03], les métaheuristiques se répartissent en trois grandes familles. Il s'agit des méthodes déterministes de recherche d'optimum local, des méthodes déterministes de recherche d'optimum global et des méthodes stochastiques de recherche de l'optimum global. Les méthodes que nous présentons dans ce chapitre font partie de cette dernière catégorie.

### **3.2.1 Recuit simulé**

La méthode du recuit simulé a été développée en 1982 par Kirkpatrick et ses collègues, chercheurs chez IBM, qui étudiaient les verres de spin. Elle s'inspire du processus naturel de recuit d'un métal [Kirkpatrick 83]. En effet, ce processus métallurgique vise à fabriquer des métaux dont la structure atomique approche l'état d'un cristal parfait, c'est-à-dire dont l'énergie est minimale. Pour atteindre cet objectif, les physiciens jouent sur la température du métal et l'utilisent comme paramètre de commande de ce processus. Ils portent ainsi le métal en question à une très haute température, puis ils le refroidissent lentement de manière à ce que les atomes aient le temps de s'ordonner régulièrement. L'adaptation de ce processus métallurgique et sa transposition en optimisation ont donné naissance à une méthode simple et efficace [Collette 02]. L'algorithme du recuit part d'une solution initiale et explore son voisinage à la recherche d'une autre solution de façon aléatoire. Le point original du recuit simulé est qu'il n'exige pas que la solution à visiter soit de meilleure qualité que la solution courante. Ce qui permet d'échapper aux optima locaux. Au début de l'algorithme, un paramètre  $T$ , représentant la température, est initialisé et décroît tout au long de l'algorithme

pour tendre vers 0. De la valeur de ce paramètre dépendra la probabilité d'acceptation des solutions dégradantes, en fait plus la température est élevée, plus cette probabilité sera forte.

### **3.2.2 Recherche tabou**

Cette méthode a été développée et proposée par Glover [Glover 86] et a montré ses performances sur un grand nombre de problèmes d'optimisation multiobjectif. Cependant, les grandes lignes de la recherche Tabou ont été avancées dans [Hansen 86]. Cette méthode utilise la notion de mémoire humaine pour éviter de tomber dans un optimum local et peut être utilisée sans faire appel à un processus stochastique [Basseur 05].

A chaque itération, l'algorithme examine le voisinage de la solution courante et sélectionne la meilleure solution obtenue, même si elle dégrade la qualité. L'algorithme tabou ne tolère pas les mouvements conduisant à une solution déjà visitée. Il utilise pour cela, une liste tabou contenant les des dernières solutions visitées qui sera actualisée au fur et à mesure des itérations. Chaque nouvelle solution obtenue enlève de cette liste la solution la plus ancienne (FIFO). La recherche de toute nouvelle solution sera faite dans le voisinage de la solution courante sans visiter les solutions de la liste tabou. Ainsi, la méthode tabou permet de dégrader la qualité des solutions afin d'échapper aux optimums locaux de la fonction objectif. Pour augmenter l'efficacité de cette méthode, on l'utilise souvent de manière complémentaire avec des mécanismes de diversification, d'intensification ou d'aspiration [Barichard 03].

### **3.2.3 Algorithmes évolutionnaires**

Les algorithmes évolutionnaires sont des algorithmes itératifs de recherche globale, fondés sur une analogie avec le monde biologique. En effet, pour un problème d'optimisation donné, une solution est un individu et un ensemble de solutions correspond à une population. Chaque individu possède une empreinte génétique, appelée chromosome, et chaque chromosome est constitué d'un ensemble de caractéristiques, les gènes. Un algorithme évolutionnaire simule un processus d'évolution sur une population d'individus, dans le but de les faire évoluer vers les optimums globaux du problème d'optimisation considéré.

La classe des algorithmes évolutionnaires regroupe les algorithmes génétiques [Goldberg, 89] [Davis 91] [Michalewicz 94], les stratégies d'évolution [Schwefel 97], la programmation génétique [Koza 98] et la programmation évolutionnaire [Fogel 94], [Bounsaythip 98].

### 3.2.3.1 Principe

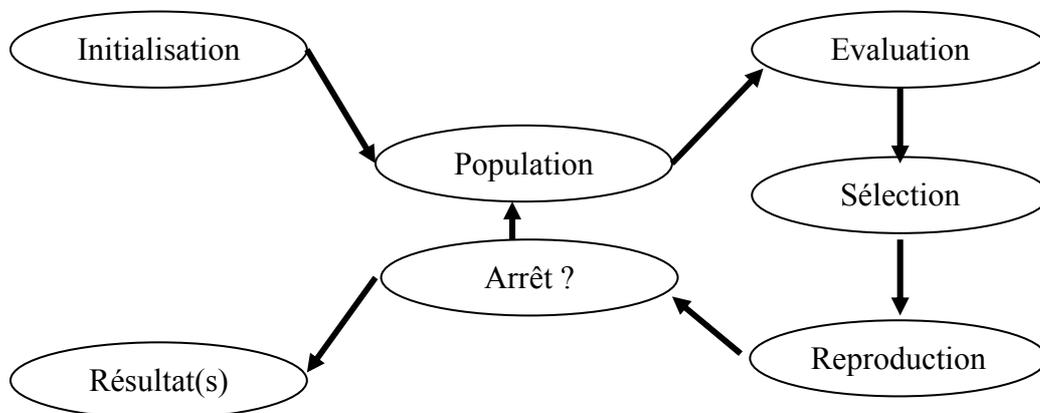
Les algorithmes évolutionnaires sont des techniques d'optimisation itérative et stochastique, inspirées par des concepts issus de la théorie de l'évolution Darwinienne. Le principe de ces algorithmes est de reproduire l'évolution naturelle d'individus, génération après génération, en respectant les lois de l'hérédité et le concept de sélection naturelle, autrement dit, la survie de l'individu le plus fort ou le mieux adapté à l'environnement [Fayech 03].

Dans [Holland 75], Holland a exposé les principes de ces algorithmes pour permettre aux ordinateurs d'imiter les êtres vivants en évoluant pour rechercher la solution à un problème. Il a expliqué d'abord comment ajouter de l'intelligence dans un programme informatique avec les croisements (échange du matériel génétique) et la mutation (source de diversité génétique). Cette évolution se fait avec un échange structuré mais aussi aléatoire d'informations entre les individus, en vue de reproduire de nouveaux éléments qui sont meilleurs au sens du critère choisi, c'est-à-dire, au sens de la fonction objectif à optimiser, appelée fonction coût, fonction d'adéquation ou « fitness » [Goldberg 89]. Ainsi, un certain nombre de paramètres sont nécessaires pour la définition d'un algorithme génétique : un opérateur d'initialisation, pour définir la population d'individus qui va permettre de lancer l'évolution ; un opérateur de sélection, qui tend à augmenter la chance et l'importance des bonnes solutions par rapport aux mauvaises ; deux opérateurs de croisement et de mutation, afin de permettre la génération de nouveaux individus. Ces opérateurs constituent la base d'un algorithme génétique, et peuvent être complétés par d'autres opérateurs, notamment par un opérateur de diversification, introduit dans le but de maintenir une certaine diversité dans la population, qui tend à s'uniformiser avec le temps [Barichard 03]. L'algorithme vise alors à chercher la meilleure combinaison des individus de la population selon la fonction de *fitness* choisie. On crée ainsi à chaque itération une nouvelle population qui est généralement formée des meilleurs éléments. La création des nouvelles populations se fait par combinaison de certains individus à l'aide d'opérateurs de croisement et aussi par modification aléatoire de leurs empreintes génétiques via l'opérateur de mutation. Au fur et à mesure des générations, les individus vont tendre, en principe, vers l'optimum de la fonction de coût [Renders 95] [Mesghouni 99] [Fayech 03].

### 3.2.3.2 Architecture et mise en œuvre des algorithmes évolutionnaires

Afin de résoudre un problème d'optimisation, un algorithme évolutionnaire procède par plusieurs étapes qui sont énumérées dans la figure 3.1 [Schwefel 97].

- **Initialisation** : Cette première étape de l'algorithme évolutionnaire consiste à générer la population initiale d'une manière aléatoire ou à travers des résultats issus d'autres techniques d'optimisation, telles que des heuristiques par exemple.
- **Evaluation** : Ici on calcule la valeur de la fonction de coût ou les valeurs de tous les objectifs pour chaque individu de la population.
- **Sélection** : Cette étape consiste à choisir les individus les plus adaptés pour la création de la future génération.
- **Recombinaison et mutation** : phase de reproduction, dans laquelle une nouvelle population est construite à partir des individus sélectionnés, via des opérateurs de croisement et de mutation.
- **Arrêt** : il s'agit d'un test de l'efficacité de l'algorithme à travers une valeur de la fonction objectif à atteindre, le nombre d'itérations à effectuer ou le temps d'exécution ou l'ordre d'arrêt donné par l'utilisateur. La solution courante est prise quand ce test est vérifié ; sinon, les étapes sont recommencées à partir de l'évaluation.



**Fig. 3.1 Architecture d'un algorithme génétique**

Nous pouvons schématiser un algorithme génétique par le pseudo-code de la figure 3.2.

---

**Algorithme : Un algorithme génétique**

---

Initialisation : génération de la population initiale  
Evaluation des individus  
Pour  $i=1$  jusqu'à nombre d'itérations maximal  
    Sélection aléatoire ou selon l'efficacité des individus  
    Croisement  
    Mutation  
    Evaluation  
Fin Pour.

---

**Fig.3.2 Pseudo-code d'un algorithme génétique générique**

L'utilisation d'un algorithme évolutionnaire demande divers choix, comme par exemple le codage et les opérateurs de sélection, croisement et mutation. Nous détaillons ces opérateurs plus loin.

**a) Codage des solutions**

Le codage est la représentation d'une solution d'un problème quelconque par un chromosome ou une séquence de gènes. Cette représentation doit être de préférence complète, c'est-à-dire que toutes les solutions possibles du problème doivent pouvoir être codées à l'aide de cette représentation. En effet, si une solution ne peut être représentée, l'algorithme évolutionnaire ne pourra jamais l'atteindre. De même, il est préférable d'éviter la redondance de codage d'une même solution, ainsi que le codage des solutions non réalisables [Basseur 05]. Cependant, on utilise ce type de codage, dans certains cas, surtout lorsqu'il est difficile d'obtenir des solutions réalisables. Le codage peut être direct, quand il y a une correspondance biunivoque entre l'ensemble des chromosomes et celui des solutions qui leur correspond. Il peut être indirect, quand un générateur doit être utilisé pour définir la solution associée à un chromosome. Aussi, il peut être mixte, lorsqu'il combine les deux codages [Aloulou 02] [Fayech 03]. Le codage classique correspond au codage binaire, le chromosome est représenté par un vecteur dont les éléments appartiennent à l'ensemble  $\{0,1\}$ , comme le montre la figure 3.3 :

1	0	1	1	1	0	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---

**Fig.3.3 Exemple de codage d'un chromosome.**

## b) Opérateur de sélection

Le mécanisme de sélection dans les algorithmes génétiques consiste essentiellement à choisir les individus de la population courante qui vont survivre et se reproduire. Autrement dit, favoriser les solutions les plus intéressantes en terme de convergence et éventuellement en terme de diversité, si un mécanisme de diversification est utilisé [Basseur 05]. La sélection est réalisée en fonction de la *fitness* qui évalue les solutions. Elle joue ainsi un rôle primordial dans la détermination de la performance des nouvelles générations et donc dans l'amélioration de la qualité des solutions [Fayech 03]. Il existe de nombreuses techniques de sélection, dont nous présentons ici trois parmi les plus connues :

- **La technique de classement :** Elle consiste à classer les individus de la population selon leurs performances et à ne retenir que les meilleurs individus dont le nombre est préalablement fixé par l'utilisateur. Ce sont ces individus qui servent à la phase de reproduction. L'inconvénient de cette technique est le seuil de sélection qui prive des individus relativement moins bons, mais contenant de bonnes configurations, de participer à la construction de la nouvelle population.
- **La technique de la roulette :** une sélection stochastique peut être réalisée par la technique de la roulette pondérée [Goldberg 89], où chaque individu occupe une surface de la roue proportionnelle à sa performance. En supposant que  $f_i$  est la valeur de la fonction de coût associée au  $i$ -ème individu, la probabilité de sélection de ce dernier est en fait égale à  $\frac{f_i}{f}$ , avec  $f = \sum_i f_i$ . L'inconvénient de cette méthode apparaît dans le cas d'un « super héros », car, dans ce cas, le meilleur individu (le super héros) se distingue par une probabilité prépondérante de survie lui permettant ainsi d'être toujours sélectionné.
- **La technique par tournoi :** Elle consiste à choisir aléatoirement deux ou plusieurs et à permettre au plus fort de survivre. L'avantage de cette méthode est d'éviter le problème du « super héros », mais en revanche, on peut avoir le problème qu'un bon individu ne soit jamais sélectionné, ce qui limite l'exploration de l'espace de recherche.

Pour avoir une bonne exploration de l'espace de recherche, des opérateurs de croisement et de mutation sont appliqués aux individus sélectionnés pour en créer des nouveaux.

## c) Opérateur de croisement

Le croisement permet de produire deux nouveaux individus, appelés enfants, à partir de deux individus, appelés les parents. Ceci est dans le but d'explorer l'espace de recherche et de

chercher des nouvelles zones plus prometteuses. L'opérateur de croisement est généralement stochastique, dans la mesure où, à partir d'un même couple de parents distincts, le croisement répété donnera des descendants différents. Le croisement des algorithmes évolutionnaires ne connaissant pas les contraintes biologiques, plus de deux parents, à la limite la population entière peut participer à un croisement [Dréo 03]. L'opérateur de croisement opère avec une probabilité  $p_c$ , fixée selon le problème traité. Le taux de croisement détermine la proportion des individus qui sont croisés parmi ceux qui remplaceront l'ancienne génération. Dans la version la plus simple d'un algorithme évolutionnaire, les couples sont formés au hasard parmi les enfants engendrés par la sélection sans tenir compte des caractéristiques des individus. Cette stratégie peut s'avérer néfaste lorsque la fonction de performance possède plusieurs optima. En effet, il est généralement peu probable que le croisement de bons individus situés sur des pics différents donne des individus de bonne qualité [Dréo 03]. Les méthodes de croisement les plus utilisées sont le croisement à un point, le croisement multipoints et le croisement uniforme ou par masque.

- **Croisement à un point** : il s'agit de choisir, au hasard, un point de croisement pour chaque couple de chromosomes et d'effectuer un échange des ensembles d'allèles se trouvant de part et d'autre de ce point entre les deux parents (fig. 3.4).

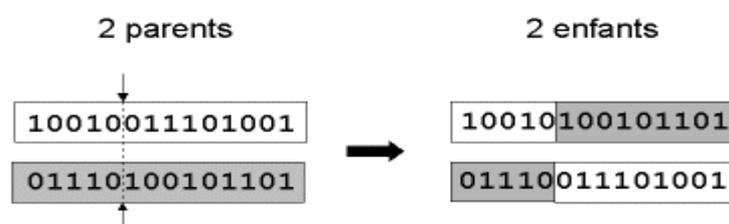


Fig.3.4 Exemple d'un croisement à un point.

- **Croisement multipoints** : dans ce cas, plusieurs points de croisement sont sélectionnés et il y a un échange des différentes parties d'allèles cernées par ces points, entre les parents. La figure 3.5 illustre un croisement à deux points.

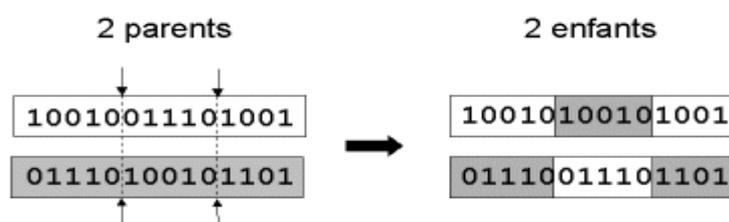


Fig.3.5 Exemple de croisement à deux points.

- **Croisement uniforme** : il opère à l'aide d'un masque qui représente les tirages aléatoires pour décider de la transmission de la valeur de l'allèle à l'un ou l'autre des descendants. Si, à la même position que l'allèle, la valeur du masque est égale à 1, l'allèle du parent 1 passe à celui de l'enfant 1 et l'allèle du parent 2 passe à l'enfant 2. Sinon, c'est l'inverse qui se produit (fig.3.6).

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

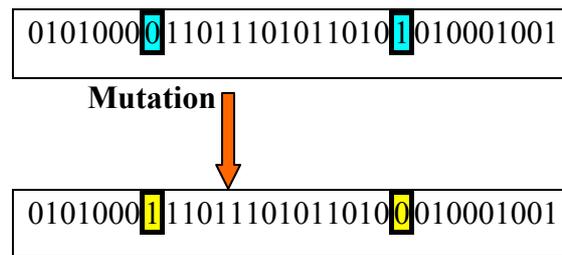
**Fig.3.6 Exemple de croisement uniforme.**

#### d) Opérateur de mutation

La mutation consiste à changer la valeur de certaines variables du chromosome pour en former un autre qui le remplacera. Les variables à modifier sont souvent choisies aléatoirement. La mutation joue le rôle de bruit et empêche l'évolution de se figer et garantit que l'optimum global peut être atteint. Cet opérateur évite donc une convergence prématurée vers les optimums locaux. Il est appliqué avec une probabilité fixée,  $p_m$ , dont l'ordre de grandeur peut varier notablement selon le modèle d'évolution choisi. Pour les algorithmes évolutionnaires, la mutation est vue comme un opérateur mineur, chargé de maintenir un minimum de diversité dans la population, ce que le croisement ne peut pas assurer. La plupart des mutations modifient un individu de telle façon que le résultat de la transformation lui soit proche. De cette façon, l'opérateur assure une recherche locale aléatoire autour de chaque individu. Ainsi, la mutation peut améliorer considérablement la qualité des solutions découvertes. La mutation, avec un taux suffisamment élevé, participe au maintien de la diversité, utile à une bonne exploration de l'espace de recherche. Par contre, si le taux de mutation est élevé et que, de plus, la mutation est si forte que l'individu produit est quasiment indépendant de celui qui l'a engendré, l'évolution des individus de la population équivaut à une marche au hasard dans l'espace de recherche, et l'algorithme évolutionnaire convergera très lentement [Dréo 03]. Il est aussi possible d'associer une probabilité de mutation différente à chaque gène, selon le principe de l'auto-adaptation, où chaque variable est soumise au

processus d'évolution. L'individu possède ainsi un second chromosome codant ces probabilités [Basseur 05]. Il existe plusieurs façons d'effectuer des mutations :

- changement de la valeur d'un gène (notre exemple de la figure 3.7),
- transposition de deux allèles consécutifs,
- transposition d'allèles dans un chromosome,
- inversion de l'ordre des allèles présents entre deux coupes.



**Fig.3.7 Exemple de mutation**

### **3.2.3.3 Adaptabilité et application des algorithmes évolutionnaires aux problèmes de transport**

Face à la complexité des problèmes de transport, qui exige le développement de techniques efficaces et appropriées pour produire des solutions robustes en un temps limité, et constatant l'efficacité des algorithmes évolutionnaires pour la résolution des problèmes d'optimisation combinatoire, plusieurs chercheurs ont eu recours à ces algorithmes. Ainsi, dans [Deb 1998] et [Deb 2001], Deb a présenté une approche génétique pour l'ordonnancement d'un système de transit de bus. L'approche a pour objectif de minimiser la durée totale d'attente des passagers. Les variables de décision illustrées dans le codage correspondent aux temps de parcours et aux temps d'arrêt.

D'autres auteurs ont utilisé les algorithmes génétiques dans l'optimisation des réseaux de bus [Bielli 00][Kwan 97][Tan 01][Xiong 92][Mohan 98], ou encore dans l'optimisation des réseaux de chemin de fer [Nachtigall 97][Salim 97].

Dans [Kolonko 00], l'auteur présente une méthode basée sur les algorithmes évolutionnaires pour montrer l'effet du coût d'investissement sur la qualité du réseau mesurée par le temps d'attente des passagers. Dans [Krishna 98][Ngamchai 00][Chakraborty 95][Hall 01], les auteurs utilisent les algorithmes évolutionnaires dans la recherche de l'itinéraire optimal, qui

optimise à la fois les temps de transfert dans les nœuds et la demande des voyageurs entre les différents nœuds.

Dans [Aloulou 99], l'auteur a présenté une approche de régulation d'une ligne de bus. Cette approche est basée sur les algorithmes génétiques et la fonction objectif est la minimisation de deux critères, qui sont le temps total d'attente des voyageurs dans les stations ainsi que le temps total de trajet dans les véhicules. Le but est de proposer aux régulateurs des décisions qu'ils peuvent ensuite appliquer pour réguler le trafic. Fayeche a défini dans sa thèse [Fayeche 03], en plus de deux critères, un troisième qui concerne la minimisation de la durée de transfert dans les pôles d'échanges.

En ce qui concerne le contrôle du trafic aérien, les auteurs de [Hansen 03] et [Delahaye 96] ont abordé ce domaine par des approches évolutionnaires. En effet, dans [Delahaye 96], à travers des approches génétiques, trois problématiques liées ont été étudiées. Il s'agit de :

- La résolution des conflits des trajectoires entre les avions par le respect des trajectoires optimales en vue de garder une distance de séparation conforme à une norme fixée.
- La division du réseau aérien, considéré comme un espace bidimensionnel, en des secteurs équilibrés, en terme de charge de travail liée au nombre d'avions et de conflits, tout en minimisant le travail de coordination.
- L'affectation du trafic entre les secteurs en minimisant les augmentations des distances parcourues et la charge de travail des responsables des secteurs.

[Ciesielski 98] et [Stevens 95] présentent une approche évolutionnaire pour l'ordonnement des temps d'atterrissage des avions sur un nombre limité de pistes. Selon [Ciesielski 98], le codage correspondant illustre pour chaque avion, la piste sur laquelle il devrait atterrir et le temps de l'atterrissage (en nombre de périodes de 30 secondes) suivant l'heure courante. La particularité de l'approche proposée par Ciesielski réside dans le caractère « anytime » de l'algorithme évolutionnaire. En effet, l'ordonnement des horaires d'atterrissage est effectué en temps réel.

[Salim 97] aborde le problème NP-difficile d'ordonnement de trains de marchandises avec une approche basée sur un algorithme génétique. Le but de cette approche est de trouver les routes et les horaires de passage des trains aux différentes stations et surtout aux boucles de passage. En fait, pour éviter les collisions, un train doit s'arrêter au niveau de ces boucles de passage afin de laisser un autre passer. Le chromosome représentatif des solutions est décrit sous la forme d'une matrice avec des valeurs binaires (0 ou 1) correspondant aux passages des trains aux boucles en question.

### 3.3 Approches évolutives proposées pour la régulation en ligne

#### 3.3.1 Objectif

Nous présentons dans cette partie les approches évolutives que nous avons développées pour la « régulation en ligne ». En effet, nous proposons de traiter la régulation en ligne d'un réseau de transport perturbé comme un problème d'optimisation multiobjectif NP-difficile. Il est bien connu qu'une méthode d'optimisation multiobjectif doit donner des résultats tenant compte des préférences des décideurs [Kacem 02]. Elle doit donc résoudre le problème de l'évaluation des solutions et explorer intelligemment l'espace de recherche, pour construire des solutions réalisables et satisfaisantes. Pour atteindre ces deux objectifs, nous proposons des approches hybrides, qui tiennent compte de ces deux problèmes. Avant d'aborder ces différentes approches proprement dites, nous allons présenter le codage des décisions choisi.

#### 3.3.2 Codage proposé

Le choix de la représentation de la solution est une étape importante pour garantir le succès de l'application des algorithmes génétiques. Nous utilisons le codage proposé par Aloulou [Aloulou 99], qui consiste à illustrer les chromosomes de régulation par un tableau dont les cellules contiennent les décisions à appliquer aux différents véhicules de la zone de régulation. Pour calculer le nombre de véhicules et stations de chaque ligne, nous utilisons la méthode de détermination de la zone de régulation que nous avons présentée au paragraphe dédié à la formulation mathématique (cf. paragraphe 2.3). Le chromosome résultant est décrit par la figure 3.8 :

		stations j							
Véhicules i		.	.	.	..	.	..	..	.
		.	.	.	.	.	.	.	.
		.	.	.	.	.	.	.	.
		..	...	.	.	.	$D_{ij}$	.	.
		.	.	.	.	.	.	.	.
		.	.	..	.	..	.	.	.

**Fig.3.8 Codage de décisions.**

Chaque case contient la décision à prendre lorsque le véhicule  $V_i^l$  atteint la station  $S_j^l$  ou lorsqu'il est en route vers celle-ci. Par exemple, une décision peut consister à retarder le

véhicule d'une unité de temps ou à inciter le chauffeur à accélérer jusqu'à  $S_j^l$ . Les cases ombrées traduisent les contraintes temporelles. Elles contiennent la décision « continuer le trajet sans rien faire ». En effet, la perturbation étant détectée à un instant  $t_{per}$ , on ne peut pas agir sur les véhicules qui sont déjà passés par les stations à des instants antérieurs à  $t_{per}$ . Ce codage permet de représenter l'ensemble des décisions que le régulateur peut prendre, à savoir : ne rien faire ; arrêter un bus  $n$  unités de temps dans la station ; accélérer : passer de la vitesse initiale à une vitesse plus grande, si c'est possible ; sauter la station ; « injecter » un bus...etc. Cependant, nous allons nous limiter pour le moment au cas de la régulation en ligne, qui est l'objet de ce chapitre. Cette décision consiste, comme nous l'avons déjà dit, à retarder un ensemble de véhicules en amont et en aval d'un véhicule perturbé, afin de maintenir les intervalles de passages aussi réguliers que possible et aussi afin d'aider le véhicule perturbé à garder un retard limité. En effet, dans la plupart des cas réels, il est très improbable que, dans des conditions perturbées, les véhicules puissent accélérer. Nous considérons ainsi seulement les décisions de ralentissement des véhicules et par conséquent les valeurs positives de  $\delta_{ijk}^l$ . D'autre part, la décision de ralentir  $V_i^l$  de  $x$  minutes lors de son parcours de  $S_j^l$  vers  $S_k^l$  est équivalente à celle de l'ajout de  $x$  minutes au temps d'arrêt initial à  $S_k^l$ . En effet, suite à la première décision, le temps d'arrivée de  $V_i^l$  à  $S_k^l$  est retardé de  $x$  minutes par rapport à celui résultant de la deuxième décision. Les temps de départ de  $S_k^l$  sont égaux pour les deux décisions. Néanmoins, pour la première décision, les passagers en attente de  $V_i^l$  à  $S_k^l$  doivent attendre  $x$  minutes supplémentaires dans la station, alors qu'ils percevraient moins cette durée s'ils étaient à bord du véhicule, comme pour la deuxième décision. Par conséquent, nous ne traitons dans cette approche que la durée de l'arrêt aux stations. Il revient alors de ne chercher que les variables de décision  $\varepsilon_{ij}^l$ , comprises entre 0 et  $\varepsilon_{max}$ . Cette variable de décision a été décrite dans le paragraphe dédié à la formulation mathématique. Nous construisons alors le chromosome illustré par la figure 3.9. Les lignes de la matrice du chromosome représentent les modifications des temps d'arrêt des  $v$  véhicules et les colonnes représentent les  $s$  arrêts.

		stations j							
Véhicules i		.	.	.	..	.	0	0	0
		.	.	.	.	1	1	0	0
		.	.	.	1	2	0	0	0
		1	2	0	0	0	0	0	0
		0	0	.	1	0	1	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0

**Fig. 3.9 Codage d'une solution de type « régulation en ligne ».**

### 3.3.3 Opérateur de sélection choisi

Nous utilisons dans notre approche une version avancée de la sélection par la roulette de Goldberg. En effet, cette dernière souffre de l'inconvénient lié à une large différence entre le nombre réel et le nombre prévu de copies réalisées pour un individu. Pour remédier à ce problème, l'opérateur stochastique de « sélection par les restes sans remplacement » a été développé [Goldberg 98] [Fukuyama 96]. En fait, selon le principe de sélection de la roulette, chaque individu  $i$  de *fitness*  $f_i$  est sélectionné avec une probabilité  $p_i$  :

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_j f_j}. \quad 3.1$$

La sélection par les restes opère en deux phases. Dans la première phase, il s'agit de sélectionner l'individu  $i$  autant de fois que la partie entière du nombre  $e_i$  qui est calculé ci-dessous, en ayant le nombre total d'individus dans la population égal à  $N$ .

$$e_i = N \cdot p_i \quad 3.2$$

La population intermédiaire n'étant pas totalement complète, dans la deuxième phase de la sélection, la probabilité de sélection de l'individu  $i$  plus de  $E(e_i)$  fois est égale à la différence ou « reste »  $r_i$  :

$$r_i = e_i - E(e_i) \quad 3.3$$

où  $E(e_i)$  est la partie entière de  $e_i$ .

L'avantage de cet opérateur de sélection réside dans la chance qui est attribuée aux moins bons individus d'être sélectionnés, ce qui procure une meilleure diversité dans la population intermédiaire.

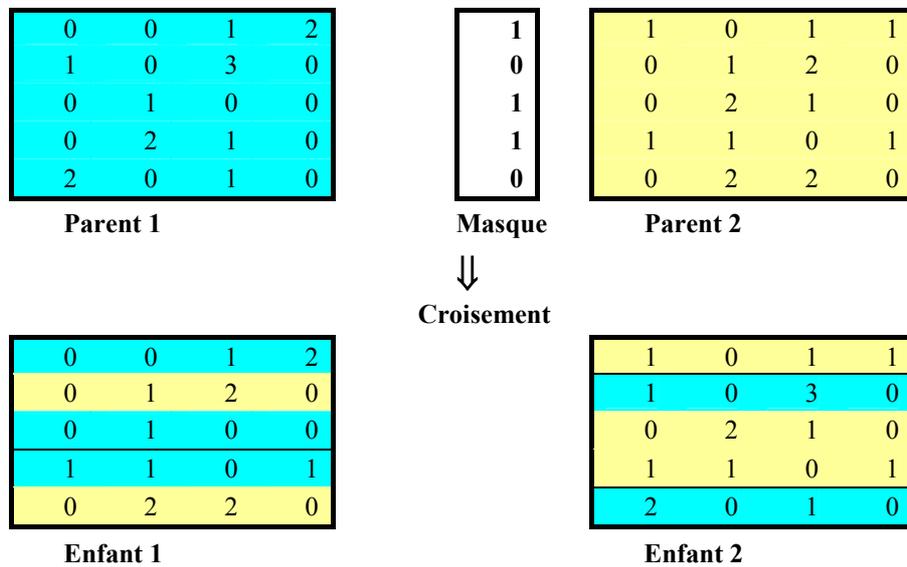
**Exemple:** Supposons que l'individu 0 ait une probabilité de sélection  $p_0 = 0,033$ . Dans une population de 100 individus,  $e_0$  devient égal à 3,3. Nous faisons alors 3 copies de cet individu dans la population intermédiaire. Aussi, il peut être sélectionné plus de 3 fois avec une probabilité de  $r_0 = 0,3$ .

### 3.3.4 Opérateur de croisement choisi

Le chromosome de régulation étant sous la forme d'une matrice, nous pouvons effectuer un croisement sur les lignes ou sur les colonnes. En effet, puisque les lignes de la matrice représentent les décisions sur les véhicules, un croisement sur les lignes consiste à échanger ces décisions entre deux individus, pour former deux enfants. De même, les colonnes du chromosome étant des décisions sur les arrêts, un croisement sur les colonnes représente l'échange de ces décisions entre les individus. Nous pouvons toutefois effectuer des croisements des décisions sur des véhicules ou arrêts différents. Tous les véhicules ne pouvant pas passer par les mêmes arrêts, il est nécessaire dans ce cas de corriger les décisions inutiles. Puisque le résultat est le même, nous choisissons alors de faire des croisements entre décisions qui concernent les mêmes véhicules ou les mêmes stations.

Après plusieurs simulations avec différents types de croisement, nous avons choisi l'opérateur de croisement uniforme sur les lignes. Les masques relatifs à cet opérateur sont générés d'une manière aléatoire à chaque croisement entre deux individus. La figure 3.10 présente un exemple de croisement uniforme entre deux individus illustrant les décisions concernant 5 véhicules et 4 stations. L'utilisation de l'opérateur stochastique de sélection par les restes implique une identité entre certains individus adjacents dans la population, puisqu'un individu est sélectionné plusieurs fois à la suite. Ainsi, afin d'améliorer l'exploration de l'espace de recherche en évitant au maximum des croisements entre des individus identiques, nous essayons d'empêcher les croisements entre les individus adjacents. Nous proposons alors de les choisir aléatoirement ou de croiser le premier individu avec le dernier, le second avec l'avant-dernier, etc. Par ailleurs, nous avons aussi imposé un contrôle à cet opérateur, pour éviter les grands écarts provoqués par les décisions de retardement entre les horaires théoriques et les horaires régulés de passage des véhicules non perturbés. Nous transformons ainsi notre opérateur de croisement uniforme en un opérateur contrôlé, qui ne peut qu'améliorer les coûts des individus, surtout par rapport au critère de ponctualité, en limitant le nombre de décisions sur les véhicules. En effet, nous imposons une limite sur le retard cumulé des véhicules à la sortie de la zone perturbé, ou en dehors de l'horizon spatio-

temporel. Pour chaque véhicule, si le retard cumulé atteint la limite, il faut réduire les décisions non nulles jusqu'à ce que leur somme soit tolérable. Cet opérateur a pour but d'éviter que les décisions ne se transforment elles-mêmes en perturbations. L'algorithme de croisement uniforme contrôlé est illustré par la figure 3.11.



**Fig.3.10 Exemple de croisement uniforme.**

### 3.3.5 Opérateur de mutation choisi

L'opérateur de mutation est nécessaire pour la diversification des solutions au cours des générations. Il opère selon une modification des allèles des individus. Ces derniers subissent une mutation avec une probabilité de  $p_{mut}$ . Le nombre des allèles du chromosome qui sont mutés ainsi que les cellules elles-mêmes sont choisis de manière aléatoire pour chaque individu. Par ailleurs, comme le croisement, l'opérateur de mutation est aussi contrôlé pour éviter que les retards cumulés dépassent les limites tolérées.

---

**Pseudo-code du croisement uniforme utilisé**

---

Choisir deux individus  $p_1$  et  $p_2$  pour produire deux enfants  $e_1$  et  $e_2$  ;

Générer aléatoirement un masque M de taille  $s$  ;

**Pour**  $i = 0$  jusqu'à  $v - 1$

**Pour**  $j = 0$  jusqu'à  $s - 1$

        Si  $M[j] = 1$ , alors :

$$e_1[i][j] = p_1[i][j]$$

$$e_2[i][j] = p_2[i][j]$$

        Sinon

$$e_1[i][j] = p_2[i][j]$$

$$e_2[i][j] = p_1[i][j]$$

**Fin pour** ;

**Pour**  $e_1$  calculer pour le véhicule  $i$  la somme des retards  $SR[i]$  ;

    Tant que  $SR[i] >$  limite du retard toléré pour le véhicule  $i$ , alors

        Choisir aléatoirement une station  $j$  ;

        Si décision à  $j > 0$ , la décrémenter de 1 et décrémenter  $SR[i]$  ;

**Fin tant que** ;

**Idem pour**  $e_2$  ;

**Fin pour.**

---

**Fig. 3.11** Algorithme de croisement uniforme utilisé.

### 3.3.6 Approche agrégative classique

Comme pour l'ensemble des approches proposées, celle-ci traite séparément les deux problèmes de l'évaluation des solutions et de la recherche des nouvelles solutions dans des zones de l'espace de recherche non encore visitées. Elle procède comme suit :

#### 3.3.6.1 Résolution du problème d'évaluation multicritère

Dans cette partie, nous cherchons à évaluer et comparer les solutions selon les trois critères considérés. Pour ce faire, nous utilisons une méthode d'évaluation floue basée sur les étapes suivantes :

### 1<sup>ère</sup> étape : détermination des bornes inférieures

Afin de réduire l'espace de recherche et de caractériser les limites des solutions réalisables, nous avons déterminé pour chaque critère  $f_q(x)$  une borne inférieure  $f_q^*$  telle que :

$$\forall x \in \Omega, f_q(x) \geq f_q^*, \text{ où } \Omega \text{ est l'espace des solutions réalisables et } 1 \leq q \leq 5.$$

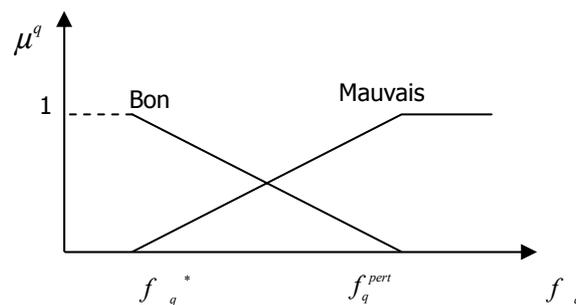
Les valeurs de ces bornes inférieures correspondent à celles des critères en régime normal (état théorique du réseau).

L'utilisation de ces bornes va nous permettre aussi d'évaluer et de juger les solutions obtenues avec précision.

### 2<sup>ème</sup> étape : homogénéisation des objectifs

Pour pouvoir gommer l'influence de la différence entre les unités de mesure des différentes fonctions objectif, et aussi minimiser les effets dus aux différences de plages de variation entre les fonctions objectifs, nous utilisons une application simple de la logique floue basée sur les étapes suivantes :

A chaque solution réalisable  $x$ , nous associons  $f(x) \in [f_1^*, +\infty[ \times \dots \times [f_5^*, +\infty[$ , où  $f(x) = (f_1(x), \dots, f_5(x))^T$ . Soit  $f_q^{pert}$  la valeur du  $q^{\text{ième}}$  critère juste après la détection de la perturbation. Pour chaque vecteur  $f(x)$ , nous proposons une *fuzzification* de ses composantes  $f_q(x)$ , selon leurs positions dans les intervalles  $[f_q^*, f_q^{pert}]$ . Les deux sous-ensembles flous considérés sont :  $B^q$  : sous-ensembles des bonnes solutions selon le  $q^{\text{ième}}$  objectif,  $M^q$  : sous-ensembles des mauvaises solutions selon le  $q^{\text{ième}}$  objectif. La *fuzzification* est appliquée en utilisant la fonction d'appartenance, comme le montre la figure 3.12 :



**Fig. 3.12 Application floue dans la résolution du problème d'échelle.**

Par la suite, à chaque vecteur  $f(x)$ , nous associons deux vecteurs  $\tilde{f}_B(x)$  et  $\tilde{f}_M(x)$  tels que :

$$\tilde{f}_B(x) = (\mu_1^B(f_1(x)), \dots, \mu_5^B(f_5(x)))^T$$

$$\tilde{f}_M(x) = (\mu_1^M(f_1(x)), \dots, \mu_5^M(f_5(x)))^T \quad \mathbf{3.4}$$

$$\mu_q^B(f_q(x)) = \frac{f_q^{pert} - f_q(x)}{f_q^{pert} - f_q^*}, \text{ si } f_q(x) \in [f_q^*, f_q^{pert}]$$

$$\mu_q^B(f_q(x)) = 0, \text{ si } f_q(x) \geq f_q^{pert} \quad 3.5$$

Ensuite, la qualité de chaque solution  $x$  est caractérisée par le vecteur  $\tilde{f}_B(x)$  dont toutes les composantes sont homogènes, puisqu'elles appartiennent toutes au même intervalle  $[0,1]$  et sont toutes sans dimension.

**Remarque :** Notons que, pour la régulation en ligne, seules les valeurs des trois critères de régularité, de correspondance et de ponctualité varient. En effet, vu que cette action de régulation ne change pas les itinéraires des véhicules et qu'elle n'impose pas de sauts de stations ni de transbordements, elle est toujours optimale vis-à-vis de deux autres critères qui sont : les kilomètres commerciaux et la qualité de service. Nous avons alors, pour toute la suite :

$$\mu_q^B(f_4(x))=1 \text{ et } \mu_q^B(f_5(x))=1 \quad 3.6$$

### **3<sup>ème</sup> étape : formulation de la fonction d'évaluation globale**

La fonction globale d'évaluation utilisée est une agrégation de toutes les fonctions objectifs et peut être formulée comme suit :

$$F(x) = \sum_{q=1}^{q=5} w_q \cdot f_q(x) \quad 3.7$$

où  $w_q \in [0,1], \forall 1 \leq q \leq 5$  est le poids de la  $q^{ième}$  fonction objectif et est tel que:  $\sum_{q=1}^{q=5} w_q = 1$ .

En combinant les équations, nous pouvons maintenant ramener l'optimisation multiobjectif à la maximisation du critère global suivant :

$$F(x) = \sum_{q=1}^{q=5} w_q \cdot \mu_q^B(f_q(x)) \quad 3.8$$

Suivant la méthode de détermination des différentes valeurs de poids de la fonction floue proposée, deux approches ont été utilisées [Kacem 03].

La première est une approche agrégative utilisant l'expression de la fonction globale pour trouver une solution selon les préférences du régulateur. La seconde (cf. § 3.3.9) est une approche basée sur la notion de Pareto dominance, dans laquelle nous utilisons une règle floue, pour calculer dynamiquement les poids des différentes fonctions objectifs, quand le régulateur ne peut pas exprimer ces préférences.

#### 4<sup>ème</sup> étape : détermination de la direction de recherche

Dans ce paragraphe, nous traitons le cas où le régulateur peut exprimer ses préférences. De telles préférences sont généralement à caractère subjectif et pourraient être bien représentées en utilisant la logique floue. Dans cette optique, nous utilisons une application simple de la logique floue pour calculer les différents poids des fonctions objectifs, selon les choix évoqués par le régulateur. Deux cas sont considérés :

**1<sup>er</sup> cas :** le régulateur donne ses préférences en attribuant une note  $N_q$  à chaque fonction objectif  $f_q$ . Nous calculons le poids correspondant, selon la formule suivante :

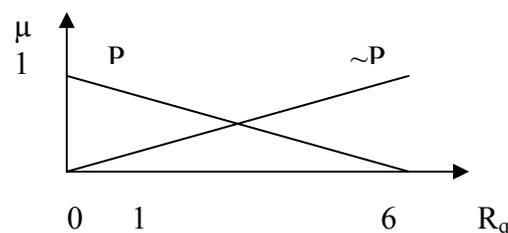
$$w_q = N_q / \sum_{q=1}^{q=5} N_q, \forall 1 \leq q \leq 5 \quad 3.9$$

**2<sup>ème</sup> cas :** le régulateur évoque ses préférences par un classement relatif des critères. Dans ce cas, à chaque critère, nous associons un nombre  $R_q \in \{1, \dots, 5\}$  qui représente le rang de  $f_q$  selon le régulateur. Nous proposons une application simple de la logique floue pour calculer les différents poids des fonctions objectifs selon leurs rangs.

Considérons la proposition primaire présentée dans la figure 3.13. Suivant son rang, un critère peut être dans l'un des sous-ensembles flous : P (le sous-ensemble des critères prioritaires) et  $\sim P$  (le sous-ensemble des critères non prioritaires), selon la fonction d'appartenance suivante :

$$\mu^P(R_q) = (1 - \frac{R_q}{6}), \forall 1 \leq q \leq 5 \quad 3.10$$

Cependant, nous pouvons facilement noter que cette priorité n'est pas uniforme dans tous les cas. En effet, nous pouvons être confrontés aux situations où une urgence intensifie la priorité de certains critères.



**Fig. 3.13 Fonctions d'appartenance pour les critères à optimiser.**

Pour intégrer ce concept d'intensification, nous proposons une petite modification de la fonction précédente. Ainsi, elle sera remplacée par la fonction décrite dans l'équation suivante :

$$\mu^{\sim P}(R_q) = (1 - \frac{R_q}{6})^\rho, \quad \forall 1 \leq q \leq 5 \quad 3.11$$

en désignant par  $\rho$  le degré d'intensité prioritaire.

Si  $\rho$  augmente, les valeurs de la fonction d'appartenance aux critères non prioritaires chutent pour tous les  $R_q$  et particulièrement pour les critères mal classés. Ce coefficient est également appelé « coefficient de pression de sélection ». En conséquence, nous pouvons affecter une note à chaque critère en tenant compte de ces priorités et de leurs intensités, comme l'indique l'équation :

$$N_q = \mu^{\sim P}(R_q) = (1 - \frac{R_q}{6})^\rho, \quad \forall 1 \leq q \leq 5 \quad 3.12$$

Par conséquent, le calcul des poids  $w_q$  devient possible en employant la formule de base :

$$w_q = N_q / \sum_{q=1}^{q=5} N_q, \quad \forall 1 \leq q \leq 5 \quad 3.13$$

### 3.3.6.2 Résolution du problème d'optimisation multicritère

L'algorithme commence par une étape d'initialisation dans laquelle il y a la construction de la population initiale P (étape 0), comme cela est décrit dans la figure 3.14. Cette dernière peut être formée, le cas échéant, à partir des décisions primaires recommandées après le diagnostic et avec des mesures de duplication. Faute de solutions primaires, l'algorithme en effectue aléatoirement la genèse. Dans la même étape, les individus de la population initiale sont évalués pour commencer directement la sélection dans l'étape suivante (étape 1). Cette sélection conduit à une population intermédiaire,  $P^*$ , formée des meilleurs individus. Dans les étapes 2 et 3, les individus de  $P^*$  subissent des croisements et des mutations avec des probabilités de  $p_{\text{crois}}$  et  $p_{\text{mut}}$ , pour former une nouvelle population P. L'étape de l'évaluation est ensuite réalisée pour calculer les coûts des individus. Dans ce but, il est nécessaire de calculer, pour chaque solution, les horaires régulés et l'impact des décisions sur la charge des véhicules (nombre de personnes montant et descendant). L'étape 5 consiste en une comparaison partielle entre les parents et les enfants, pour en garder les meilleurs. Par exemple, si parent 1 et parent 2, de la population  $P^*$ , ont subi un croisement pour générer enfant 1 et enfant 2 dans P : si le coût de parent 1 est meilleur que celui de enfant 1, parent 1 remplace enfant 1 dans P. De même, nous effectuons une comparaison entre parent 2 et enfant 2. Puisque c'est une comparaison partielle, nous ne prenons effectivement pas les deux meilleurs des quatre individus pour ne pas risquer de perdre la diversité des solutions. De même, dans le cas d'une mutation, nous prenons le meilleur entre l'individu et sa réplique

mutée. Le processus de comparaison partielle sert alors à contrôler l'évolution des individus, tout en respectant la diversité des populations.

---

***Algorithme évolutionnaire de régulation : approche agrégative***

---

Etape 0 : Initialisation

Générer population initiale P à la génération  $g=0$ .

Evaluer les individus de la population initiale.

Etape 1 : Sélection

Sélectionner les n meilleurs individus de P à la génération g pour construire population intermédiaire P\*.

Etape 2 : Croisement

Choisir aléatoirement deux parents de P\*.

Effectuer croisement avec une probabilité de  $p_{\text{crois}}$ .

Mettre les enfants et les parents non croisés dans P.

Etape 3 : Mutation

Effectuer une mutation des individus de P avec une probabilité de  $p_{\text{mut}}$ .

Etape 4 : Evaluation

Calculer, pour chaque individu de P, selon la solution qui lui est associée :

- le Tableau de Marche Régulé résultant,
- la charge résultante des véhicules au départ de chaque arrêt.

Calculer le coût de chaque individu et sauvegarder les n meilleurs.

Etape 5 : Comparaison

Comparaison partielle, à la génération g, entre P et P\* pour choisir les meilleurs individus et les mettre dans P.

Etape 6 : Test Arrêt

Si (le nombre spécifié de générations est atteint) ou si (un ordre d'arrêt a été imposé), terminer l'algorithme et donner les solutions atteintes.

Sinon, passer à la génération  $g+1$  et répéter à partir de Etape 1.

---

**Fig. 3.14 Algorithme évolutionnaire de régulation.**

La dernière étape consiste en un test de la condition d'arrêt. Cette condition est pour l'instant liée au nombre de générations de l'algorithme. Elle peut cependant être liée à la durée

d'exécution de l'algorithme, fixée par le régulateur selon l'urgence de la régulation. Toutefois, l'algorithme peut être interrompu s'il reçoit du régulateur, un ordre à ce propos. Dans ce cas, les meilleures solutions atteintes lui seront fournies. Si le test n'aboutit pas, l'algorithme reprend, pour la génération suivante, à partir de l'étape de sélection.

### 3.3.7 Agrégation par intégrale de Choquet

Cette approche est similaire à celle que l'on vient de décrire, la seule différence est en fait au niveau de l'évaluation des solutions, et concerne donc le problème d'évaluation multicritère. En effet, nous essayons d'améliorer notre opérateur d'agrégation en utilisant l'intégrale de Choquet, qui a des propriétés beaucoup plus intéressantes que la somme pondérée, surtout quand on l'utilise dans un contexte d'aide à la décision. Dans ce qui suit nous allons introduire cette intégrale avant de l'utiliser pour notre application.

#### 3.3.7.1 Problème d'évaluation multicritère

Dans cette partie, nous visons à évaluer et comparer les solutions selon les valeurs des critères considérés. Pour ce faire, nous utilisons une méthode d'évaluation floue similaire à celle que nous avons proposée pour l'approche précédente. La seule modification que nous apportons est relative à l'opérateur d'agrégation. Nous allons donc intervenir seulement à partir de la troisième étape de la méthode d'évaluation.

#### *3<sup>ème</sup> étape : formulation de la fonction d'évaluation globale*

Exemple introductif : limitations de la somme pondérée (**Extrait d'un article de Grabish**)

Le directeur d'une école d'ingénieurs veut évaluer ses étudiants à partir de leurs notes en Mathématiques (M), Statistiques (S) et Langues (L). Comme cette école est de type scientifique, le directeur ne voudra pas admettre un étudiant faible dans les deux premières matières (M, S), et il désire si possible des étudiants également bons en langues. Ainsi, le directeur a décidé d'attribuer le coefficient 3 aux M, 3 aux S et 2 aux L. Calculant l'évaluation moyenne des étudiants par une somme pondérée simple, il considère les trois étudiants de la figure 3.15 (notes données sur une échelle de 0 à 20) :

	M	S	L	Score
Etudiant A	18	16	10	15.25
Etudiant B	10	12	18	12.75
Etudiant C	14	15	15	14.62

**Fig. 3.15 Résultats de l'agrégation par une somme pondérée.**

Le directeur n'est pas du tout satisfait du résultat, car d'après lui, l'étudiant C est bon en sciences comme en langues, et il est meilleur que l'étudiant A, qui est excellent en maths et statistiques, mais qui est faible en langues. Alors, le directeur tente de changer les coefficients des matières, mais sans succès : attribuant les mêmes coefficients aux trois matières, A et C auront les mêmes scores et par conséquent le même rang (ce qui ne lui plaît pas), et il ne peut pas donner un coefficient plus important aux langues, donc il n'a pas de solution. Comment peut-on l'aider ? Simplement par l'utilisation des intégrales floues. En effet, les préférences de ce directeur peuvent être formalisées par les trois règles suivantes :

1. Les matières scientifiques (M, S) sont plus importantes
  2. Les matières scientifiques sont plus ou moins similaires, et les étudiants bons en mathématiques (respectivement statistiques) sont en général aussi bons en statistiques (respectivement mathématiques), et donc les étudiants qui sont bons en ces deux matières ne doivent pas être beaucoup favorisés.
  3. Les étudiants bons en maths (resp. S) et en langues sont très rares et doivent être favorisés.
- Ce comportement est un exemple typique de l'interaction entre les critères. L'opérateur d'agrégation à utiliser doit tenir compte de l'importance de chaque critère à part mais aussi de l'interaction entre les critères. Les intégrales floues en général et celle de Choquet en particulier permettent parfaitement de représenter ce genre de comportements.

Nous définissons quelques notions très importantes pour la compréhension de cet opérateur et nous donnons le matériel mathématique nécessaire [Grabish 95].

**Définition 3.1 :** Une mesure floue sur  $N$  (ensemble de critères de cardinal  $n$ ) est une fonction  $\mu : P(N) \rightarrow [0, 1]$ , vérifiant les propriétés suivantes :

1.  $\mu(\emptyset) = 0$
2.  $A \subset B \subset N \Rightarrow \mu(A) \leq \mu(B)$  **3.14**

$\mu(A)$  représente l'importance ou le pouvoir de la coalition (groupe de critères)  $A$  pour le problème d'agrégation en question. Une mesure floue sur  $N$  (ensemble de critères de cardinal  $n$ ) nécessite  $2^n - 2$  coefficients pour être définie, devant vérifier les contraintes de monotonie.

**Définition 3.2 :** Soit  $\mu$  une mesure floue sur  $N$ . L'intégrale de Choquet de  $a_1, \dots, a_n$  par rapport à  $\mu$  est définie par :

$$C_\mu(a_1, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^n (a_{(i)} - a_{(i-1)}) \mu(\{(i), \dots, (n)\}), \quad \mathbf{3.15}$$

où  $(.)$  est une permutation telle que  $a_{(0)} = 0$  et  $a_{(1)} \leq \dots \leq a_{(n)}$ ,  $a_i$  est le score du critère  $i$ .

L'intégrale de Choquet est idempotente, continue, monotone et stable par le changement d'échelle linéaire.

**Définition 3.3 :** Soit  $\mu$  une fonction d'ensemble (pas nécessairement une mesure floue) sur  $N$ .

La transformée de Möbius de  $\mu$  est la fonction d'ensemble définie par :

$$m(A) = \sum_{B \subset A} (-1)^{|A \setminus B|} \mu(B), \quad \forall A \subset N \quad 3.16$$

où  $A \setminus B$  est l'ensemble d'éléments de  $A$  n'appartenant pas à  $B$ , c'est-à-dire le complément de  $B$  dans  $A$ .

**Définition 3.4 :** La mesure floue  $\mu$  est dite  $k$ -additive si sa transformée de Möbius satisfait les deux conditions suivantes :  $m(A) = 0$ ,  $\forall A$  tel que  $|A| > k$  et s'il existe au moins un sous-ensemble de cardinal  $k$  tel que :  $m(A) \neq 0$ .

Nous rappelons deux notions qui sont importantes pour une analyse sémantique de l'intégrale de Choquet et des opérateurs couverts par celle-ci. Ce sont l'importance globale d'un critère et l'interaction entre critères.

- **Importance globale d'un critère :** peut se définir par analogie avec la théorie des jeux coopératifs, où le joueur tient le rôle du critère. Nous avons vu que, par définition,  $\mu(\{i\})$  traduit l'importance du critère  $i$ . Cependant, il se pourrait que cette valeur soit quasiment nulle, et pourtant que chaque fois que  $i$  se joint à une coalition  $A \subset N$ , l'importance de cette coalition s'en trouve sensiblement augmentée, ce qui tendrait à vouloir dire que  $i$  est un critère important. Cette idée se trouve parfaitement modélisée par la notion d'indice de Shapley ou valeur de Shapley issue de la théorie des jeux coopératifs. Pour tout critère  $i$ , son indice de Shapley est défini par :

$$I_i = \sum_{K \subset N \setminus \{i\}} \frac{(n - |K| - 1)! |K|!}{n!} (\mu(K \cup \{i\}) - \mu(K)) \quad 3.17$$

où  $n$  est le cardinal de  $N$  (ensemble de critères).

- **Interaction entre deux critères.** On peut imaginer les trois situations suivantes, pour deux critères  $i, j$  :
  - a) l'importance de  $i$  et  $j$  pris ensemble, soit  $\mu(\{i, j\})$ , est plus grande que la somme des importances individuelles  $\mu(\{i\}) + \mu(\{j\})$ . Dans ce cas il y a une synergie de complémentarité entre ces deux critères.
  - b)  $\mu(\{i, j\})$  est plus petite que la somme des importances individuelles. Cela signifie qu'il y a une redondance, ou une synergie négative entre ces deux critères.

c)  $\mu(\{i, j\}) = \mu(\{i\}) + \mu(\{j\})$ . Dans ce cas, on dit que les critères sont indépendants.

En considérant comme importance globale toutes les coalitions possibles, on obtient la définition suivante pour l'indice d'interaction :

$$I_{ij} = \sum_{K \subset N \setminus \{i, j\}} \frac{(n - |K| - 2)! |K|!}{(n-1)!} (\mu(K \cup \{i, j\}) - \mu(K \cup \{i\}) - \mu(K \cup \{j\}) + \mu(K)) \quad 3.18$$

L'expression de l'intégrale de Choquet en fonction des indices de Shapley  $I_i$  et d'interaction  $I_{ij}$  est possible pour une mesure floue 2-additive :

$$C_\mu(a) = \sum_{I_{ij} > 0} (a_i \wedge a_j) I_{ij} + \sum_{I_{ij} < 0} (a_i \vee a_j) |I_{ij}| + \sum_{i=1}^n a_i \left( I_i - \frac{1}{2} \sum_{j \neq i} |I_{ij}| \right) \quad 3.19$$

où  $\wedge$  et  $\vee$  sont respectivement les symboles du minimum et maximum.

**Propriété :** Soit  $\mu$  une mesure floue  $k$ -additive sur  $N$ . Alors :

- $I(A) = 0$  pour tout  $A \subset N$  tel que :  $|A| > k$
- $I(A) = m(A)$  pour tout  $A \subset N$  tel que :  $|A| = k$

Revenons maintenant à notre exemple introductif, et voyons comment les préférences de notre directeur peuvent être traduites en terme de mesures floues :

1.  $\mu(\{M\}) = \mu(\{S\}) = 0.45, \mu(\{L\}) = 0.3$  (importances relatives des critères)
2.  $\mu(\{M, S\}) = 0.5 < \mu(\{M\}) + \mu(\{S\})$  (redondance)
3.  $\mu(\{M, L\}) = \mu(\{S, L\}) = 0.9 > 0.45 + 0.3$  (complémentarité)

L'application de l'intégrale de Choquet avec les mesures floues ci-dessus donne les résultats du tableau de la figure 3.16.

	M	S	L	Score
Etudiant A	18	16	10	13.9
Etudiant B	10	12	18	13.6
Etudiant C	14	15	15	14.9

**Fig. 3.16 Agrégation par intégrale de Choquet.**

Ici, les étudiants ont été correctement ordonnés en concordance avec les préférences du directeur. Nous signalons que l'étudiant B est toujours en dernier rang, comme voulait la tendance scientifique de cette école.

#### ***4<sup>ème</sup> étape : détermination de la direction de recherche***

Cette étape consiste à déterminer les indices de Shapley et d'interaction entre critères (coefficients de l'intégrale de Choquet), afin de pouvoir calculer le score global de chaque décision. Plusieurs méthodes ont été proposées pour la détermination de ces indices (voir les travaux de recherche de M. Grabish pour plus de détails sur ces méthodes [Grabish 03] [Grabish 98]). Cependant, en général, le décideur est supposé capable de donner les valeurs de Shapley sans problème en ordonnant les critères ou en accordant une note à chacun d'entre eux. Il en est de même pour les interactions entre paires de critères (mesure floue 2-additive). Pour des raisons de simplification, nous nous mettons dans ce cas de figure et nous supposons que le régulateur peut exprimer ses préférences soit quantitativement, soit qualitativement, et qu'il peut donner les indices d'interaction une fois pour toutes, indépendamment de la situation courante.

#### **3.3.7.2 Problème d'optimisation multicritère**

---

#### ***Algorithme évolutionnaire de régulation : agrégation par intégrale de Choquet***

---

Etape 0 : Initialisation

Générer population initiale P à la génération  $g=0$ .

Evaluer les individus de la population initiale en utilisant l'intégrale de Choquet

Etape 1 : Sélection

Sélectionner les meilleurs individus de P à la génération g pour construire population intermédiaire P\*.

Etape 2 : Croisement

Choisir aléatoirement deux parents de P\*.

Effectuer un croisement avec une probabilité de  $p_{\text{crois}}$ .

Mettre les enfants et les parents non croisés dans P.

Etape 3 : Mutation

Effectuer une mutation des individus de P avec une probabilité de  $p_{\text{mut}}$ .

Etape 4 : Evaluation

Calculer pour chaque individu de P, selon la solution qui lui est associée :

- le Tableau de Marche Régulé résultant,
- la charge résultante des véhicules au départ de chaque arrêt.

Calculer le coût de chaque individu et sauvegarder les n meilleurs.

Etape 5 : Comparaison

Comparaison partielle, à la génération  $g$ , entre  $P$  et  $P^*$  pour choisir les meilleurs individus et les mettre dans  $P$ .

Etape 6 : Test Arrêt

Si (le nombre spécifié de générations est atteint) ou si (un ordre d'arrêt a été imposé), terminer l'algorithme et donner les solutions atteintes.

Sinon, passer à la génération  $g+1$  et répéter à partir de Etape 1.

---

**Fig. 3.17 Algorithme évolutionnaire de régulation.**

### 3.3.8 Approche basée sur l'épsilon dominance

Ici, nous traitons le problème d'optimisation multicritère proprement dit. En effet, nous traitons le problème d'exploration de l'espace de recherche pour retrouver des solutions réalisables de notre problème d'optimisation multiobjectif [Kacem 03] [Ouldsidi 05]. La question qui se pose à ce stade de notre travail est la suivante : comment peut-on obtenir en un temps de calcul raisonnable des solutions proches de l'optimale les plus dispersées possible sur le front de Pareto ? Pour résoudre ce problème, nous utilisons un algorithme évolutionnaire élitiste inspiré des travaux proposés par Deb dans [Deb 03]. Avant de décrire le fonctionnement général de cet algorithme, nous donnons deux définitions très utiles pour la suite.

**Définition 3.5 :** Soient  $f, g \in \mathbb{R}^m$ . Alors,  $f$  domine  $g$  si et seulement si :  
 $\forall i \in \{1, \dots, m\} : f_i \geq g_i$  et  $\exists j \in \{1, \dots, m\} : f_j > g_j$ . **3.20**

**Définition 3.6:** Soient  $f, g \in \mathbb{R}^m$ . Alors  $f$   $\varepsilon$ -domine  $g$  si et seulement si :  
 $\forall i \in \{1, \dots, m\}, (1 + \varepsilon)f_i \geq g_i$  **3.21**

**Fonctionnement général :** Pour assurer son élitisme, l'algorithme utilise deux populations évoluant en même temps : population  $P(t)$  et une archive  $A(t)$ , où  $t$  est le compteur de générations. La première étape consiste à construire une population initiale par une recherche locale ou aléatoire. L'archive est initialisée par les individus non  $\varepsilon$ -dominés de cette population. A chaque itération de l'algorithme, nous retrouvons les étapes classiques : sélection, croisement et mutation, la seule différence c'est que l'on génère un seul enfant. Le nouveau né sera comparé aux individus de deux populations pour son éventuelle inclusion, comme le montre la figure 3.18. Le pseudo code de l'algorithme est donné fig. 3.18.

---

### Pseudo code de $\varepsilon$ -AEMC

---

Initialiser la population  $P(0)$  et créer l'archive  $A$  vide

Mise à jour de  $A$  à partir des individus non  $\varepsilon$ -dominés de  $P(0)$

**Tant que** critère\_d'arrêt\_non\_rencontré **faire**

- Evaluation de tous les individus de  $P(t)$  et de  $A(t)$
- Sélection
  - Choisir aléatoirement deux individus de  $P(t)$
  - Si l'un des deux domine l'autre, choisir le dominant
  - Sinon en choisir aléatoirement un parmi eux
  - Soit  $p$  l'individu sélectionné
  - Choisir aléatoirement un individu  $a$  de  $A(t)$
- Croisement uniforme de  $p$  et  $a$  pour créer deux enfants  $e_1$  et  $e_2$  et choisir aléatoirement l'un des deux, soit  $e$ .
- Mutation
- **Mise à jour de la population courante :**
  - Si  $e$  domine un ou plusieurs individus de la population, alors  $e$  remplace un de ces individus choisi aléatoirement
  - Sinon
    - Si tous les individus de la population dominent  $e$ ,
    - Alors  $e$  est rejeté.
- **Mise à jour de l'archive :**
  - Si  $e$  est  $\varepsilon$ -dominé par tous les membres de l'archive alors  $e$  est rejeté
  - Sinon
    - Si l'enfant  $e$   $\varepsilon$ -domine un ou plusieurs individus, alors  $e$  le(s) remplacera dans l'archive
    - Sinon
      - Si  $e$  n'est pas  $\varepsilon$ -dominé par aucun membre de l'archive,  $e$  est accepté.
      - Sinon  $e$  est refusé.

**Fin Tant que**

---

**Fig. 3.18** Algorithme de régulation utilisant l'épsilon dominance.

### 3.3.9 Approche basée sur la Pareto dominance

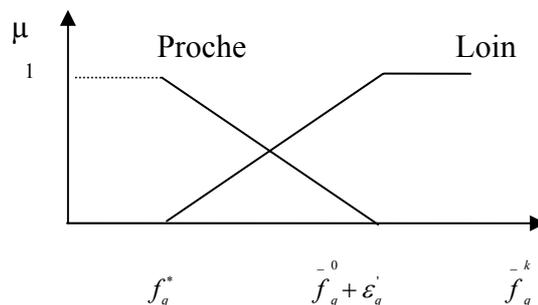
Ici, nous essayons d'aider le régulateur quand il ne peut pas clairement donner une préférence particulière à quelques fonctions objectif. Dans un état si douteux, nous proposons de construire un ensemble de solutions Pareto optimales sans accorder aucun privilège à une direction particulière de recherche. Cette approche sera basée sur un algorithme évolutionnaire dans lequel nous employons la fonction globale  $F(x)$  dans la phase de sélection. Les pondérations seront dynamiquement calculées en utilisant une règle floue spécifique. L'idée est de mesurer la qualité moyenne des solutions selon chaque critère et à chaque itération et de calculer les différents poids suivant le degré de cette qualité [Kacem 03].

Soit  $\bar{f}_q^k$  la moyenne des valeurs de la  $q^{\text{ième}}$  fonction objectif des solutions à la  $k^{\text{ième}}$  itération de

l'algorithme évolutionnaire :  $\bar{f}_q^k = \frac{\sum_{P_k} f_q^k(x)}{\text{cardinal}(P_k)}$  où  $P_k$  est la population des solutions à la

$k^{\text{ième}}$  itération de l'algorithme. A la  $k^{\text{ième}}$  itération, nous évaluons la qualité selon la  $q^{\text{ième}}$  fonction objectif. L'évaluation est faite en utilisant les fonctions d'appartenance illustrées dans la figure 3.19. Ainsi, deux sous-ensembles flous ont pu être distingués :

- Proche<sub>q</sub> : le sous-ensemble des solutions proches de la valeur de la borne inférieure  $f_q^*$ , selon le  $q^{\text{ième}}$  objectif.
- Loin<sub>q</sub> : le sous-ensemble des solutions lointaines de la valeur de la borne inférieure  $f_q^*$ , selon le  $q^{\text{ième}}$  objectif



**Fig.3.19 Fonctions d'appartenance pour les critères à évaluer.**

Comme le montre la figure 3.19, les fonctions d'appartenance sont formulées par :

$$\mu_{q,k}^{loin}(\bar{f}_q^k) = \frac{\bar{f}_q^k - f_q^*}{\bar{f}_q^0 - f_q^* + \varepsilon'_q}, \text{ Si } \bar{f}_q^k \in \left[ f_q^*, f_q^0 + \varepsilon'_q \right] \text{ où } \varepsilon'_q = 0.01 \text{ si } \bar{f}_q^0 = f_q^* \text{ et } \varepsilon'_q = 0$$

sinon  $\mu_{q,k}^{loin}(\bar{f}_q^k) = 0$  **3.22**

Le calcul des différentes pondérations  $w_q^{k+1}$  est effectué en utilisant la règle floue suivante :

Si ( $\bar{f}_q^k$  proche de  $f_q^*$ ) alors ( $w_q^{k+1} \downarrow$ ), Si ( $\bar{f}_q^k$  loin de  $f_q^*$ ) alors ( $w_q^{k+1} \uparrow$ ).

Cette règle floue a été formulée comme suit :

$$w_q^1 = \frac{1}{3}, \forall 1 \leq q \leq 5 \quad w_q^{k+1} = (1 \pm \varepsilon) \cdot w_q^k, \quad \forall 1 \leq q \leq 5, \forall k \in [1, Q-1] \quad \mathbf{3.23}$$

Q est le nombre total d'itérations.

---

### Pseudo code de l'algorithme

---

**Etape 0 :** Générer la population initiale  $P_0$ .

Evaluer les individus de la population initiale (approche floue).

**Etape 1 :** Sélectionner les meilleurs individus de P à la génération g pour construire population intermédiaire  $P^*$ .

**Etape 2 :** Choisir aléatoirement deux parents de  $P^*$ .

Effectuer un croisement avec une probabilité de  $p_{\text{crois}}$ . Mettre les enfants et les parents non croisés dans P.

**Etape 3 :** Effectuer une mutation des individus de P avec une probabilité de  $p_{\text{mut}}$ .

**Etape 4 :** Calculer, pour chaque individu de P, selon la solution qui lui est associée :

- ✓ le tableau de marche régulé résultant,
- ✓ la charge résultante des véhicules au départ de chaque arrêt.

Calculer le coût de chaque individu et sauvegarder les n meilleurs.

**Etape 5 :** Comparaison partielle, à la génération g, entre P et  $P^*$  pour choisir les meilleurs individus et les mettre dans P (avec contrôle de diversité par distance).

**Etape 6 :** Si (le nombre spécifié de générations est atteint) ou si (un ordre d'arrêt a été imposé), terminer l'algorithme et donner les solutions atteintes. Sinon, passer à la génération g+1 et répéter à partir de l'étape 1.

---

**Fig. 3.20 Algorithme de régulation.**

Les différents vecteurs de pondérations  $(W^1, W^2, \dots, W^k, \dots, W^Q)$  seront dynamiquement calculés (en évoluant d'une génération à une autre), selon la distance entre les bornes inférieures et la moyenne des individus de la  $k^{\text{ième}}$  génération.

Le but est d'étudier les gains et les améliorations possibles des solutions en accordant la priorité à l'optimisation des fonctions objectifs dont la moyenne des valeurs est loin de la valeur optimale (ou de la borne inférieure). En utilisant la règle floue, on peut contrôler la direction de recherche, afin de construire un ensemble final avec des solutions s'approchant le plus possible des valeurs optimales. Cet ensemble final sera utilisé pour déterminer les solutions dominantes au sens de Pareto ; les autres solutions seront rejetées.

Nous utilisons l'algorithme évolutionnaire de la figure 3.20 pour optimiser les décisions proposées aux régulateurs.

### **3.4 Conclusion**

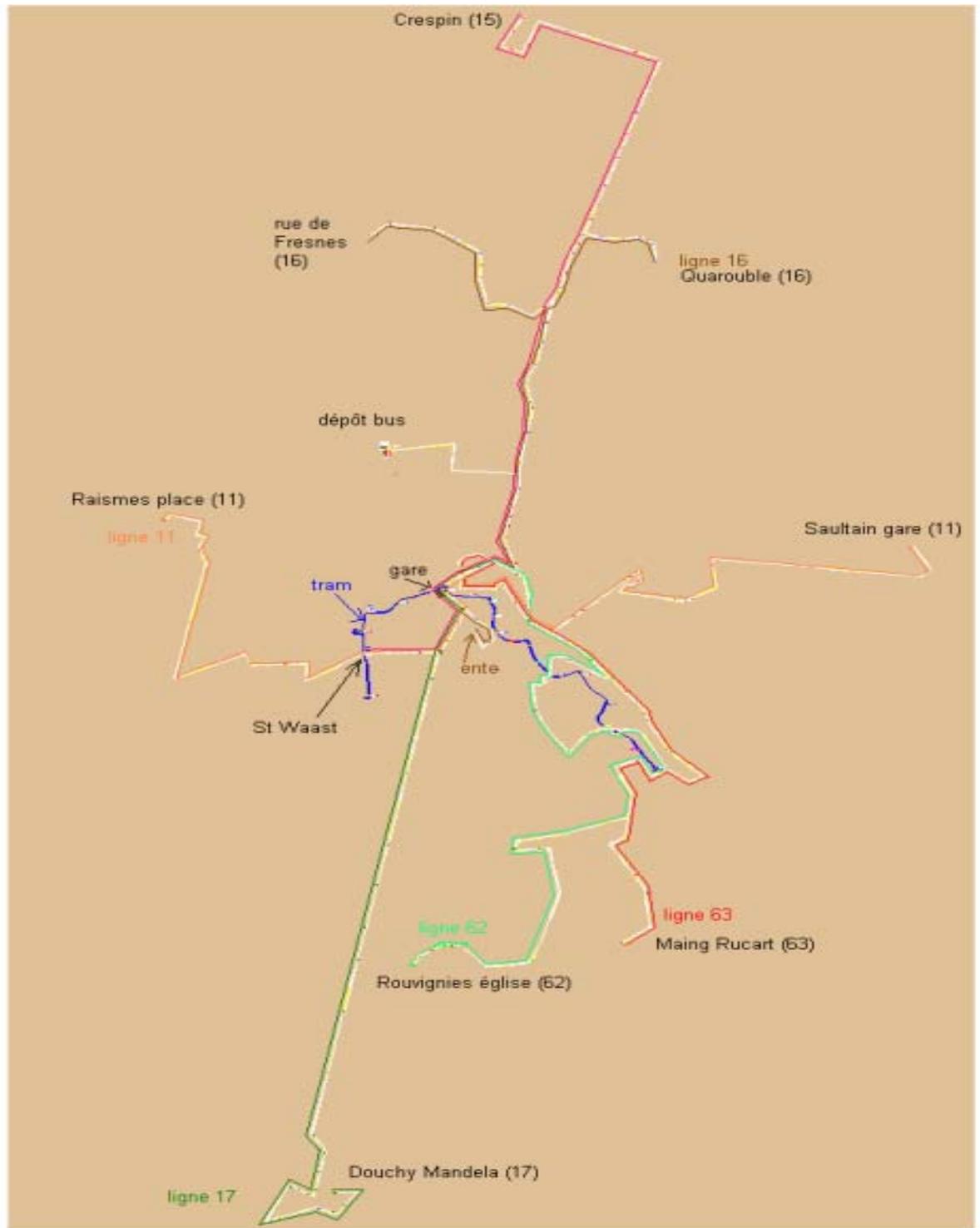
La première partie de ce chapitre a introduit les métaheuristiques d'une manière générale et en particulier les algorithmes évolutionnaires et leur adaptabilité au domaine de notre étude. Puis nous avons présenté le codage et les opérateurs génétiques choisis pour la résolution du problème traité et aussi les différentes approches proposées pour la génération des actions de régulation de type « régulation en ligne ». Nous avons ainsi présenté une approche agrégative utilisant une méthode d'évaluation basée sur la théorie des sous-ensembles flous. Cette approche a été par la suite améliorée en introduisant un nouvel opérateur d'agrégation au niveau de la fonction d'évaluation proprement dite. Ainsi nous avons testé l'apport de l'intégrale de Choquet dans l'aide à la régulation du trafic perturbé d'un réseau de transport collectif. La dernière partie du chapitre a été dédiée aux approches non agrégatives proposées : l'une est une approche du type Pareto dominance classique, mais utilise la méthode d'évaluation floue, afin de pouvoir comparer les objectifs un à un en respectant les préférences du régulateur. L'autre approche est l'une des dernières révélations du domaine des algorithmes évolutionnaires, elle utilise le concept de l'épsilon dominance pour contrôler la diversité des solutions proposées au décideur, afin de ne pas proposer deux solutions, sauf si elles sont significativement différentes aux yeux de celui-ci. L'efficacité des différentes méthodes de résolution sera testée en les appliquant à des scénarii de perturbations du réseau de transport valenciennois au chapitre suivant.

## **Chapitre IV. Applications et résultats**

## 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus par simulation de quelques scénarii de perturbations. En effet, dans le cadre du projet SART (Système d'Aide à la Régulation du Trafic), plusieurs équipes de recherche de la région Nord-Pas de Calais travaillent actuellement sur le développement d'un système d'aide à la régulation du trafic d'un réseau de transport perturbé. Le réseau simulé jusqu'à ce jour se limite à six lignes de bus (N° 11, 15, 16, 17, 62, 63) et la ligne de tramway T du réseau de transport valenciennois (Fig. 4.1), il inclut trois pôles d'échanges qui sont : St Waast, Gare et Université.

Nous avons donc essayé de valider nos méthodes et approches de construction et d'évaluation de décisions sur ce petit réseau. Nous présentons ici les scénarii de perturbations simulés qui ont été choisis parmi les plus connus. Ces perturbations sont décrites par les tableaux de marche (horaires de passages de véhicules aux stations concernés), les fréquences des lignes touchées, les flux de voyageurs, les retards causés...etc. Nous allons commencer le traitement de chaque scénario par déterminer sa zone de régulation, en utilisant notre méthode proposée au chapitre 2. Puis, nous générons l'ensemble des décisions réalisables en appelant la base de règles que nous avons pu établir à partir du guide des régulateurs que la SEMURVAL nous a fourni. L'ensemble des décisions réalisables sera contrôlé par le régulateur, qui peut ajouter ou supprimer une ou plusieurs décisions. Nous allons, par la suite, construire l'ensemble de décisions les plus adaptées en utilisant, les approches évolutionnaires floues proposées au chapitre 3 et les autres algorithmes de régulation. La décision finale proposée au régulateur sera choisie en classant les décisions candidates selon leurs efficacités. L'outil de simulation utilisé est Quest : *Queuing Event Simulation Tool*, qui est un logiciel de simulation général développé par DELMIA, filiale de Dassault Systèmes. Quest est un outil de simulation à événements discrets puissant, qui possède deux caractéristiques intéressantes : il permet la construction et le suivi réaliste 3D du modèle simulé et offre la possibilité de dialoguer à distance avec d'autres logiciels propriétaires, grâce au mécanisme de *sockets*. Il possède de plus un langage de programmation : SCL (*Simulation Control Language*) qui permet de définir le comportement des entités du modèle. Les possibilités de visualisation dynamique réaliste facilitent la compréhension du modèle, sa vérification et sa validation. Elles permettent également une utilisation pédagogique de l'outil : le système de simulation peut être utilisé par le personnel (régulateurs) sans nécessiter de compétences dans le domaine de la modélisation, de la programmation ou de la simulation.



**Fig. 4.1. Plan du réseau simulé (source: Thérèse Bonte, du LAMIH).**

Un modèle Quest est composé de deux sous-modèles :

- Le sous-modèle logique, qui est la représentation logique du comportement du système réel. Sa mise en œuvre nécessite d'abord de définir toutes les entités et leur comportement

selon le formalisme propre à Quest, puis de les intégrer en utilisant l'interface de Quest ou en programmant leur comportement avec le langage SCL,

- Le sous-modèle physique, qui est la représentation 3D du système logique. Les représentations peuvent être redéfinies grâce au système de CAO intégré à Quest. Ce système est basé sur une modélisation 3D et permet de définir des formes complexes, qui seront les représentations physiques des entités du modèle.

## 4.2 Scénario 1 : Perturbation touchant une seule ligne

### 4.2.1 Exemple 1 :

#### ➤ Description de la perturbation

La ligne 15 sens 1 touchée par l'incident a une fréquence de 20 minutes. La perturbation, concerne le service  $V_6^{15}$ , elle a été signalée à  $t_{pert} = 7 :51$  (751 sur le Tableau de marche) par le conducteur par voie radio. L'incident consiste en un accident de circulation entre deux voitures, ce qui ralentit la circulation au point de la bloquer. Le retard causé par cette perturbation est estimé à 10 minutes. Les voyageurs qui attendent aux stations vont alors attendre longtemps avant que le véhicule perturbé  $V_6^{15}$  puisse atteindre la Gare SNCF :  $S_7^{15}$ . Le flux d'arrivée des passagers aux différentes stations de la ligne 15 dans le sens considéré est montré sur la figure 4.2. Les exploitants peuvent par ailleurs disposer des courbes de charges théoriques moyennes des véhicules à l'arrivée à chaque arrêt. Elles servent dans le calcul des charges perturbées et régulées par ajustement selon les retards et les décisions.

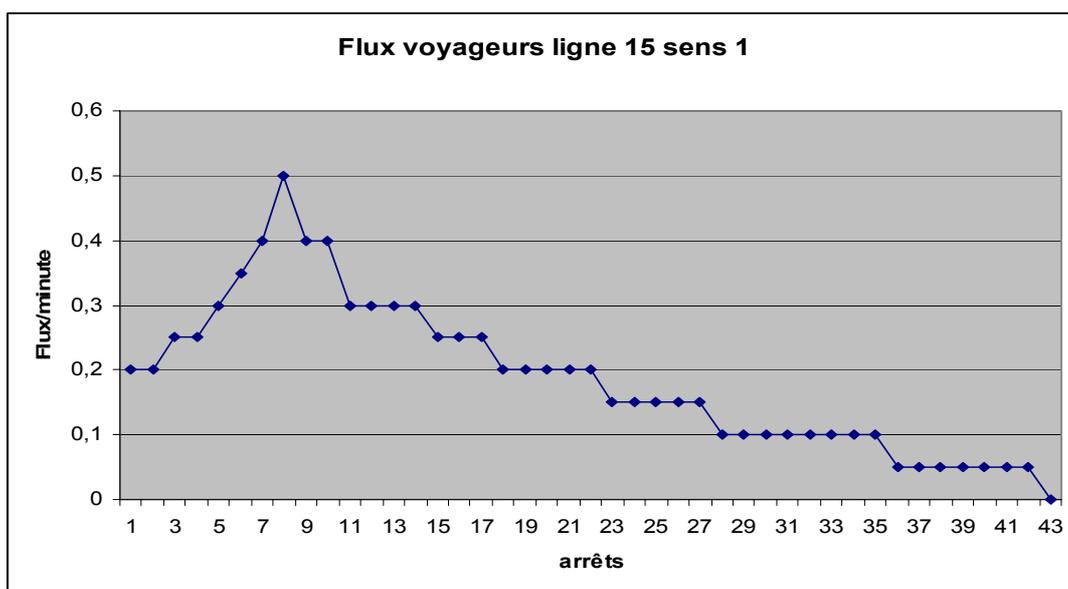


Fig. 4.2. Flux de voyageurs de la ligne 15 sens 1.

➤ **Détermination de la zone de régulation**

La ligne perturbée est une ligne « emportant », c'est-à-dire qu'elle n'effectue pas de correspondance vers les autres lignes du réseau. En effet, cette ligne a pour terminus de départ le pôle d'échange Saint Waast, et le seul nœud de correspondance présent sur son trajet est la Gare SNCF qui est desservie par la ligne de Tramway. Les voyageurs qui veulent se rendre à ce nœud de correspondance ont intérêt à prendre le tram, car il est plus fréquent et plus rapide. N'importe quelle perturbation touchant la ligne 15 sens 1 peut alors être traitée séparément du reste du réseau simulé.

La zone de régulation obtenue en utilisant l'algorithme de détermination de l'horizon spatio-temporel comprend quatre véhicules  $V_5^{15}$ ,  $V_6^{15}$ ,  $V_7^{15}$ ,  $V_8^{15}$  et dix stations  $S_0^{15}, \dots, S_9^{15}$ , qui appartiennent tous à la ligne 15, car aucune autre ligne n'est impliquée dans cette perturbation.

Afin de mettre en évidence l'importance de l'évaluation de l'impact d'une perturbation sur le trafic d'un réseau de transport avant toute prise de décision, nous donnons ci-après (fig. 4.3) la dégradation constatée en fonction du retard causé par l'incident. Cette évaluation est faite par comparaison des valeurs théoriques et perturbées de chaque critère. Pour les kilomètres commerciaux et la qualité de service, ce sont les actions de régulation qui en modifient les valeurs et par conséquent nous ne présentons ici que les trois autres critères.

	<i>at_per</i>	<i>tt_per</i>	<i>rt_per</i>
<i>r</i> = 0	5400	00	3699
<i>r</i> = 2	5436	00	3529
<i>r</i> = 5	5626	00	3259
<i>r</i> = 8	5976	00	2971
<i>r</i> = 10	6300	00	2769

**Fig. 4.3 Dégradation des valeurs de critères avec l'évolution du retard.**

	$V_5^{15}$	$V_6^{15}$	$V_7^{15}$	$V_8^{15}$		$V_5^{15}$	$V_6^{15}$	$V_7^{15}$	$V_8^{15}$
$S_0^{15}$	730	750	810	830	$S_0^{15}$	0	0	0	0
$S_1^{15}$	732	752	812	832	$S_1^{15}$	0	0	2	0
$S_2^{15}$	733	753	813	833	$S_2^{15}$	0	0	3	0
$S_3^{15}$	736	756	816	836	$S_3^{15}$	0	0	0	0
$S_4^{15}$	737	757	817	837	$S_4^{15}$	0	0	0	0
$S_5^{15}$	739	759	819	839	$S_5^{15}$	0	0	0	0
$S_6^{15}$	740	800	820	840	$S_6^{15}$	0	0	0	0
$S_7^{15}$	746	806	826	846	$S_7^{15}$	0	0	0	0
$S_8^{15}$	750	810	830	850	$S_8^{15}$	0	0	0	0
$S_9^{15}$	751	811	831	851	$S_9^{15}$	0	0	0	0

**Fig. 4.4 Tableau de marche théorique de la ligne 15 sens 1.**

**Remarque :** le tableau de gauche contient les horaires de passages théoriques aux différents arrêts. Ainsi, le chiffre 730 veut dire 7h : 30min et 806 représente 8h : 06. Le tableau de droite contient les retards à imposer aux différents véhicules dans la zone de régulation. Ainsi, la valeur 0 veut dire que le véhicule concerné ne doit pas être retardé, tandis que la valeur 2 signifie que ce véhicule doit attendre 2 minutes à l'arrêt concerné. Cette remarque est valable pour tout le reste de ce document.

#### ➤ Génération et évaluation des décisions réalisables

En appelant la base de règles construite à partir des conditions requises pour mise en œuvre de chaque classe de décision, nous pouvons déterminer l'ensemble de décisions réalisables pour résorber cette perturbation. Il nous faut juste bien identifier cette perturbation, en indiquant la ligne, le véhicule et la station concernés, l'heure, les conditions de circulation et les circonstances de la perturbation. Ainsi, comme nous pouvons voir sur la figure en Annexe, le module de génération de décisions nous propose deux classes de décisions, qui sont le « haut le pied hors ligne » et la « régulation en ligne ».

Le « haut le pied » sera appliqué entre la station courante et la station perturbée, c'est-à-dire la station 1 et la station 7 de la ligne perturbée.

Afin de trouver la meilleure action de type régulation en ligne, nous avons utilisé l'approche évolutionnaire agrégative classique et l'approche Pareto basée sur le calcul dynamique des poids. Nous supposons que le régulateur a exprimé ses préférences en attribuant les scores aux différents critères, le vecteur de poids est supposé le suivant :

$$W = (w_{at}, w_{tt}, w_{rt}, w_{km}, w_{qs})^T = (0.4, 0.1, 0.3, 0.1, 0.1)^T$$

Pour bien choisir les probabilités de mutation et de croisement, nous avons effectué plusieurs tests qui nous ont conduits à fixer la probabilité de croisement à 0,7 et la probabilité de mutation à 0,03. Nous avons travaillé avec une population de 30 individus et le critère d'arrêt utilisé est le nombre maximal de générations effectuées qui a été fixé à 1000.

La meilleure solution de type régulation en ligne obtenue est montrée par la figure 4.5, elle a été obtenue par l'approche agrégative classique. Nous montrons aussi la convergence en calculant la moyenne de la fonction coût à chaque génération (fig.4.6).

	$\mu(AT)$	$\mu(TT)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$	Score global
HLP	0,51	1	0	0,8	0,3	0,41
REL	0,19	1	0,18	1	1	0,43

Figure. 4.5. Évaluation de décisions réalisables pour l'exemple 1.

D'après le module d'évaluation, la régulation en ligne est mieux adaptée pour réagir à ce scénario de perturbation, car elle dégrade moins la qualité de service et les kilomètres commerciaux, même si elle n'aide pas à retrouver des intervalles réguliers entre les passages de bus.

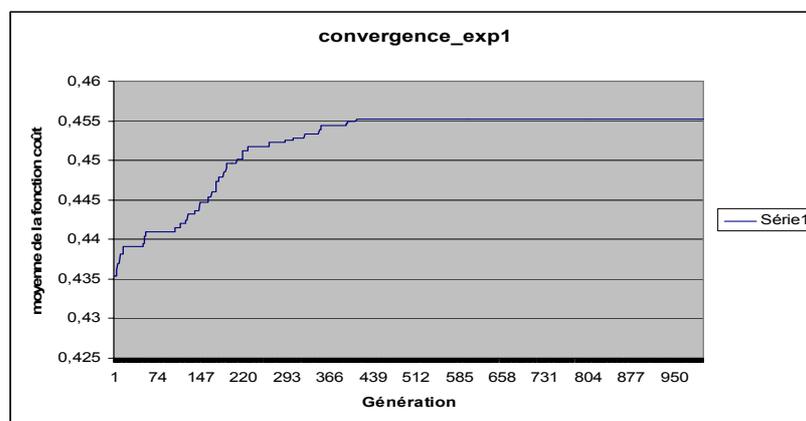


Fig. 4.6. Convergence de l'algorithme pour l'exemple 1.

#### 4.2.2 Exemple 2 :

##### ➤ Description de la perturbation

Nous considérons ici la ligne 17 sens 1, qui est totalement indépendante du reste du réseau de transport simulé. En effet, le seul pôle d'échange de cette ligne est GARE SNCF qui est son terminus de départ dans le sens de circulation considéré. Nous supposons qu'à 10 :48, un embouteillage a lieu au niveau de l'arrêt Quartier Lompez  $S_9^{17}$ , causant un retard d'environ

8 minutes au véhicule  $V_{14}^{17}$ . La fréquence de la ligne considérée est de 1 bus toutes les 20 minutes. Le flux d'arrivée des passagers aux arrêts de la ligne 17 est représenté sur la figure 4.7.

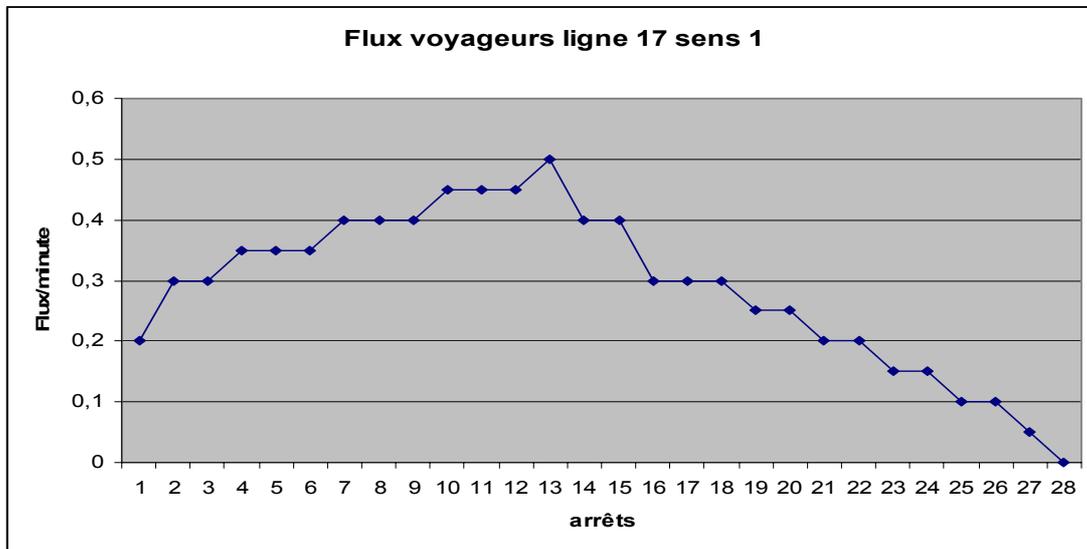


Fig. 4.7 Flux de voyageurs aux arrêtes de la ligne 17 sens 1.

➤ **Détermination de la zone de régulation**

De même manière que pour l'exemple 1, la ligne perturbée est une ligne « emportant », c'est-à-dire qu'elle ne ramène pas de voyageurs qui effectuent des correspondances vers les autres lignes du réseau. Utilisant la méthode de détermination de l'horizon de régulation, nous obtenons une zone de régulation qui s'étale entre les stations  $S_0^{17}$  et  $S_{11}^{17}$  et qui implique quatre véhicules, qui sont  $V_{13}^{17} \dots V_{16}^{17}$ . L'évaluation de l'impact de la perturbation sur le réseau est faite par comparaison des valeurs théoriques et perturbées de chaque critère. Nous montrons par la figure 4.8 cette évaluation :

	<i>at_per</i>	<i>tt_per</i>	<i>rt_per</i>
$r = 0$	6000	00	3318
$r = 2$	6040	00	3138
$r = 5$	6250	00	2853
$r = 8$	6640	00	2550
$r = 10$	6300	00	2769

Fig.4.8 Impact de la perturbation sur les valeurs de critères.

	$V_{13}^{17}$	$V_{14}^{17}$	$V_{15}^{17}$	$V_{16}^{17}$
$S_0^{17}$	1026	1046	1106	1126
$S_1^{17}$	1031	1051	1111	1131
$S_2^{17}$	1032	1052	1112	1132
$S_3^{17}$	1035	1055	1115	1135
$S_4^{17}$	1036	1056	1116	1136
$S_5^{17}$	1038	1058	1118	1138
$S_6^{17}$	1040	1100	1120	1140
$S_7^{17}$	1041	1101	1121	1141
$S_8^{17}$	1043	1103	1123	1143
$S_9^{17}$	1045	1105	1125	1145
$S_{10}^{17}$	1047	1107	1127	1147
$S_{11}^{17}$	1048	1108	1128	1148

	$V_{13}^{17}$	$V_{14}^{17}$	$V_{15}^{17}$	$V_{16}^{17}$
$S_0^{17}$	0	0	0	0
$S_1^{17}$	0	0	1	0
$S_2^{17}$	0	0	0	0
$S_3^{17}$	0	0	2	0
$S_4^{17}$	0	0	0	0
$S_5^{17}$	0	0	0	0
$S_6^{17}$	0	0	0	0
$S_7^{17}$	0	0	1	0
$S_8^{17}$	0	0	0	0
$S_9^{17}$	0	0	0	0
$S_{10}^{17}$	0	0	0	0
$S_{11}^{17}$	0	0	0	0

**Fig. 4.9. Tableau de marche théorique de la ligne 17 sens 1.**

➤ **Génération et évaluation des décisions réalisables**

De même que pour l'exemple précédent, le module de génération des décisions nous préconise de tester la régulation en ligne et le haut le pied hors ligne, pour dissiper cette perturbation. Le haut le pied hors ligne sera appliqué entre la station courante et la station perturbée de la ligne 17. En ce qui concerne la régulation en ligne, nous avons utilisé les mêmes approches et le même vecteur de pondérations que pour l'exemple précédent, vu la ressemblance entre les deux exemples. Nous avons constaté que l'algorithme converge assez vite et qu'il arrive à trouver une solution acceptable (fig. 4.11). La solution est donnée par le tableau de la figure 4.9.

	$\mu(AT)$	$\mu(TT)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$	Score global
HLP	0,35	1	0,16	0,75	0,1	0,37
REL	0,29	1	0,93	1	1	0,69

**Fig. 4.10. Évaluation de décisions réalisables pour l'exemple 2.**

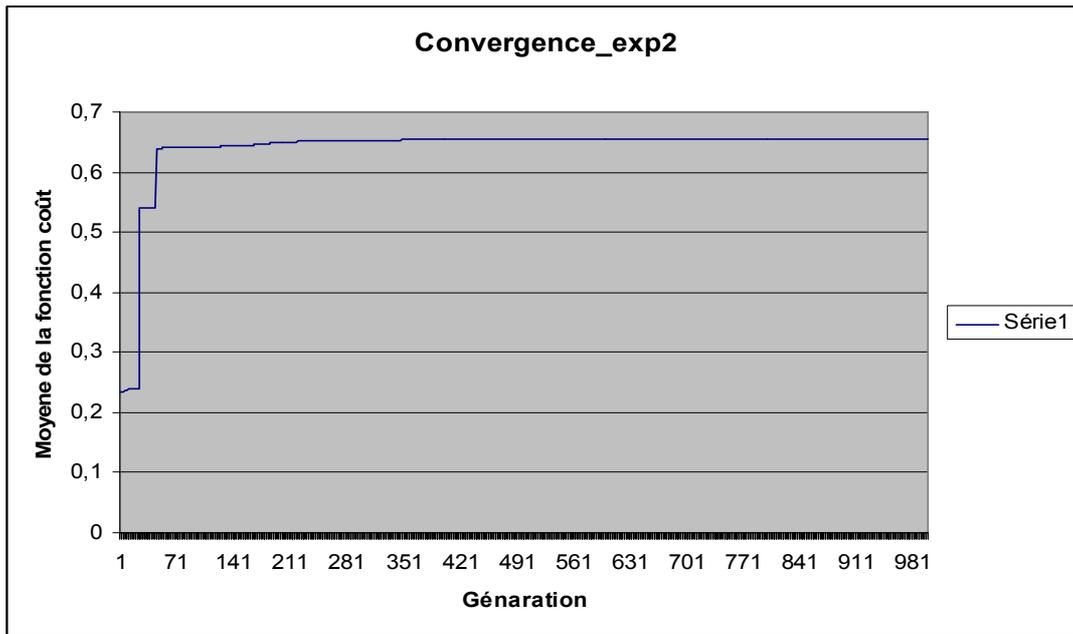


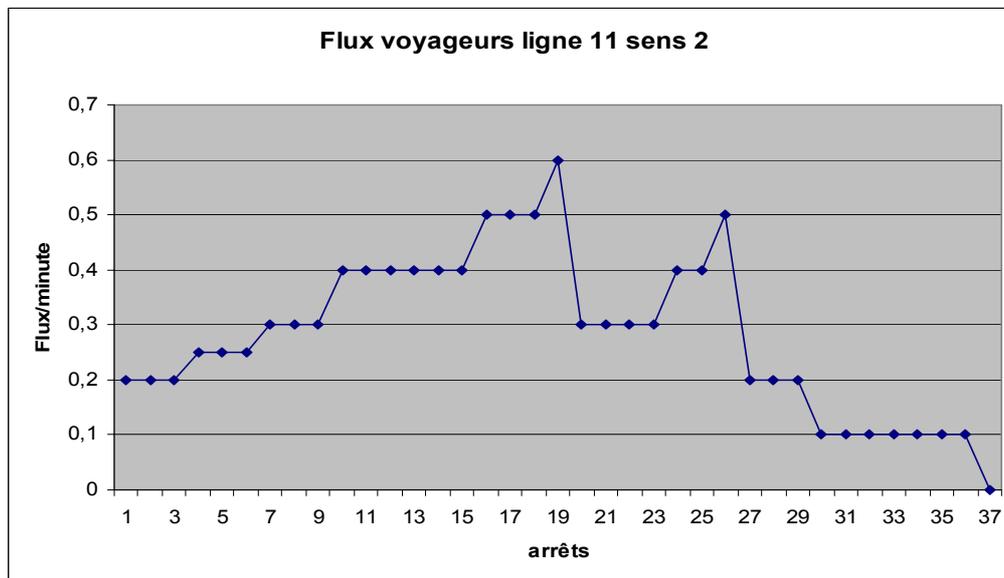
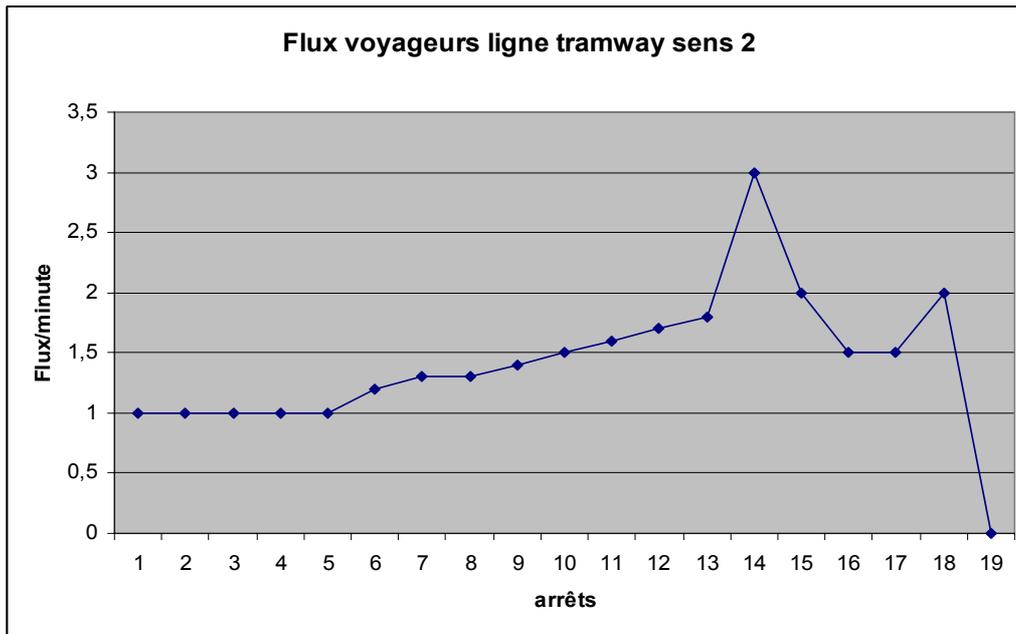
Fig. 4.11. Convergence de l'algorithme pour l'exemple 2.

### 4.3 Scénario 2 : Perturbation touchant deux lignes

#### 4.3.1 Exemple 3

##### ➤ Description de l'incident

Pour ce scénario, nous considérons deux lignes, la ligne tramway sens 2 et la ligne bus 11 sens 2, de fréquence 1bus/20min du réseau simulé. A 8 :07 le conducteur du tramway  $V_{12}^T$  à destination de Dutemple appelle le poste central de commande pour annoncer son blocage à cause d'une manifestation imprévue. Il estime le retard engendré par cette perturbation à 7 minutes. Ce tram devait assurer la correspondance à 8 :12 vers le bus  $V_2^{11}$  de la ligne bus 11 sens 2, qui quittera St Waast à 8 :17. Mais, suite à son retard, la correspondance ne peut avoir lieu, car il arrivera au pôle d'échange après le départ du bus.



**Fig. 4.12. Flux de la ligne tramway sens 2 et de la ligne 11 sens 2.**

➤ **Détermination de la zone de régulation**

La zone de régulation obtenue pour ce scénario de perturbation comprend 4 véhicules et 15 stations de la ligne de tramway et 4 véhicules et 9 arrêts de la ligne bus. Cette zone a été construite autour du véhicule et station perturbée c'est-à-dire, St Waast.

	$V_{11}^T$	$V_{12}^T$	$V_{13}^T$	$V_{14}^T$
$S_3^T$	749	754	803	807
$S_4^T$	751	756	805	809
$S_5^T$	752	757	806	810
$S_6^T$	754	759	808	812
$S_7^T$	755	800	809	813
$S_8^T$	756	801	810	814
$S_9^T$	757	802	811	815
$S_{10}^T$	758	803	812	816
$S_{11}^T$	800	805	814	818
$S_{12}^T$	801	806	815	819
$S_{13}^T$	802	807	816	820
$S_{14}^T$	803	808	817	821
$S_{15}^T$	805	810	819	823
$S_{16}^T$	806	811	820	824
$S_{17}^T$	807	812	821	825

	$V_{11}^T$	$V_{12}^T$	$V_{13}^T$	$V_{14}^T$
$S_3^T$	0	0	0	0
$S_4^T$	0	0	0	0
$S_5^T$	0	0	0	0
$S_6^T$	0	0	1	0
$S_7^T$	0	0	0	0
$S_8^T$	0	0	0	0
$S_9^T$	0	0	1	0
$S_{10}^T$	0	0	2	0
$S_{11}^T$	0	0	0	0
$S_{12}^T$	0	0	0	0
$S_{13}^T$	0	0	0	0
$S_{14}^T$	0	0	0	0
$S_{15}^T$	0	0	0	0
$S_{16}^T$	0	0	0	0
$S_{17}^T$	0	0	0	0

	$V_1^{11}$	$V_2^{11}$	$V_3^{11}$	$V_4^{11}$
$S_{17}^{11}$	747	807	827	847
$S_{18}^{11}$	749	809	829	849
$S_{19}^{11}$	750	810	830	850
$S_{20}^{11}$	752	812	832	852
$S_{21}^{11}$	753	813	833	853
$S_{22}^{11}$	754	814	834	854
$S_{23}^{11}$	755	815	835	855
$S_{24}^{11}$	756	816	836	856
$S_{25}^{11}$	757	817	837	857

	$V_1^{11}$	$V_2^{11}$	$V_3^{11}$	$V_4^{11}$
$S_{17}^{11}$	0	0	0	0
$S_{18}^{11}$	0	1	0	0
$S_{19}^{11}$	0	0	1	0
$S_{20}^{11}$	0	2	0	0
$S_{21}^{11}$	0	1	1	0
$S_{22}^{11}$	0	0	0	0
$S_{23}^{11}$	0	0	2	0
$S_{24}^{11}$	0	0	0	0
$S_{25}^{11}$	0	0	0	0

**Fig. 4.13** Tableaux de marche et meilleures décisions obtenues

➤ **Génération et évaluation des décisions réalisables**

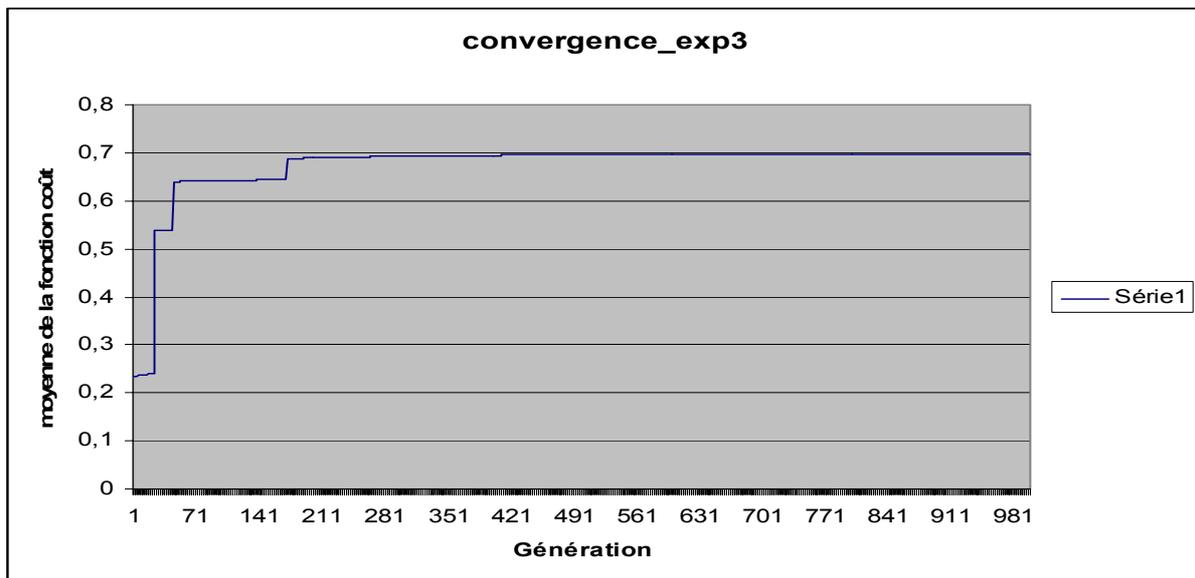
Pour ce scénario de perturbation, seules les actions de type régulation en ligne ont été recommandées par le générateur de décisions.

Pour construire la meilleure décision de ce type, nous avons opté pour l'approche agrégative utilisant l'intégrale de Choquet, nous supposons que le régulateur a exprimé ses préférences comme suit :

$$\begin{matrix} & WT & TT & RT & KM & SQ \\ WT & 0.15 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ TT & 0.1 & 0.35 & -0.1 & 0 & 0.1 \\ RT & 0.1 & -0.1 & 0.25 & 0.1 & -0.1 \\ KM & 0 & 0 & 0.1 & 0.1 & 0.05 \\ SQ & 0 & 0.1 & -0.1 & 0.05 & 0.15 \end{matrix} = I_{ij}$$

Cette matrice contient, en fait, les indices de Shapley et les indices d'interaction entre les critères de régulation. La meilleure solution obtenue et la convergence de l'algorithme sont montrées sur la figure 4.14.

	$\mu(AT)$	$\mu(TT)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$	Score global
REL	0,25	1	0,53	1	1	0,74



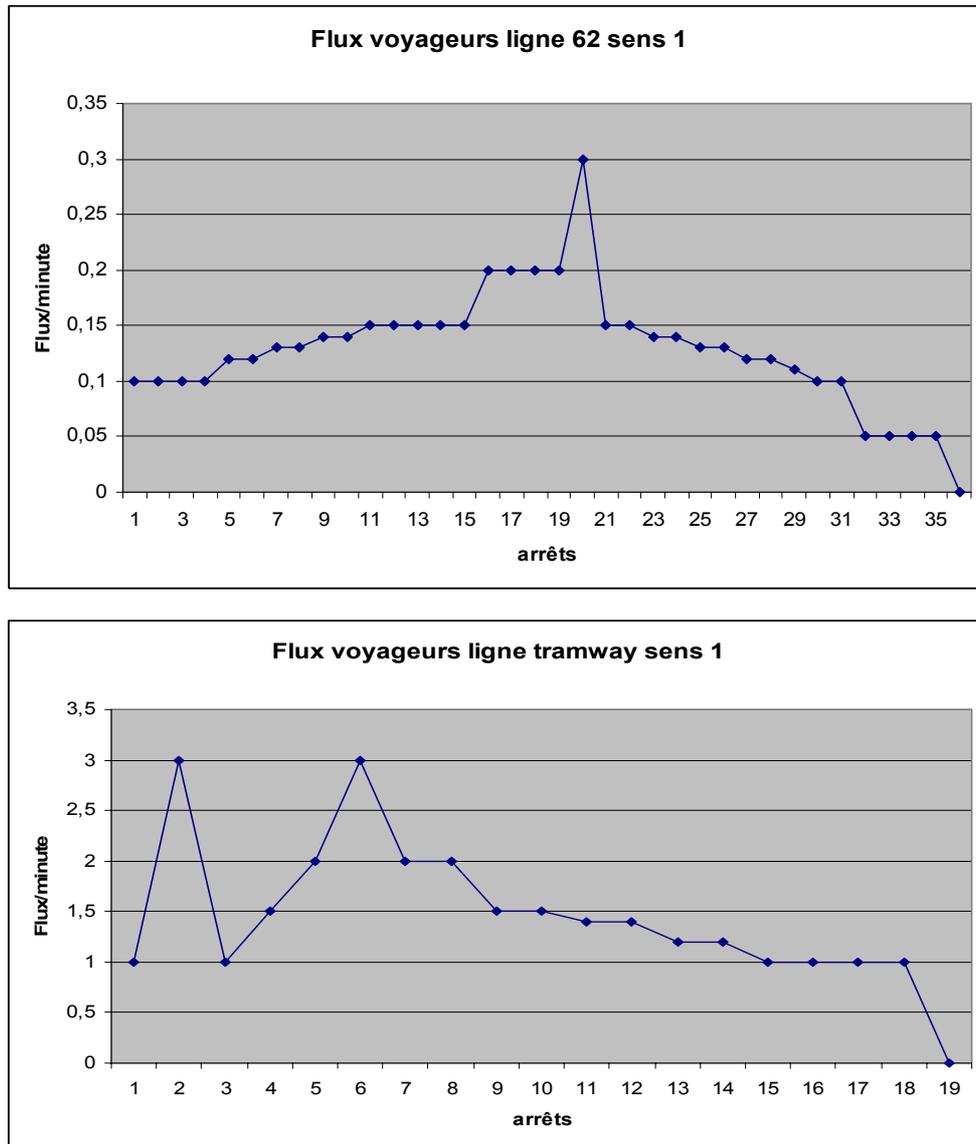
**Fig. 4.14** Evaluation et décisions et convergence de l'algorithme évolutionnaire

### 4.3.2 Exemple 4

➤ **Description de l'incident**

Nous considérons ici la ligne de tramway sens 1 comme ligne perturbée et la ligne 62 sens 1. Nous supposons qu'à 8 :55, le tram  $V_{21}^T$  se trouve bloqué pendant 8 minutes, suite à un acte de vandalisme visant les voies. Ce tram devait assurer la correspondance vers le bus  $V_3^{62}$  au pôle d'échange Université. Suite à cet incident, le véhicule arrive au nœud à 9 :08 au lieu de 9 :00

c'est-à-dire après le départ du bus qui quittera la station à 9 :07, et par conséquent la correspondance ne peut pas être assurée.



**Fig. 4.15. Flux de voyageurs sur les lignes impliquées**

➤ **Détermination de la zone de régulation**

La zone de régulation conseillée par la méthode de détermination de l’horizon spatio-temporel de régulation comprend 13 stations et 4 véhicules de la ligne tramway et 9 stations et 4 bus de la ligne 62.

	$V_{20}^T$	$V_{21}^T$	$V_{22}^T$	$V_{23}^T$
$S_6^T$	841	846	851	856
$S_7^T$	842	847	852	857
$S_8^T$	843	848	853	858
$S_9^T$	844	849	854	859
$S_{10}^T$	845	850	855	900
$S_{11}^T$	847	852	857	902
$S_{12}^T$	848	853	858	903
$S_{13}^T$	849	854	859	904
$S_{14}^T$	850	855	900	905
$S_{15}^T$	852	857	902	907
$S_{16}^T$	853	858	903	908
$S_{17}^T$	854	859	904	909
$S_{18}^T$	855	900	905	910

	$V_{20}^T$	$V_{21}^T$	$V_{22}^T$	$V_{23}^T$
$S_6^T$	0	0	0	0
$S_7^T$	0	0	0	0
$S_8^T$	0	0	0	0
$S_9^T$	0	0	0	0
$S_{10}^T$	0	0	0	0
$S_{11}^T$	0	0	1	0
$S_{12}^T$	0	0	0	0
$S_{13}^T$	0	0	0	0
$S_{14}^T$	0	0	2	0
$S_{15}^T$	0	0	0	0
$S_{16}^T$	0	0	2	0
$S_{17}^T$	0	0	0	0
$S_{18}^T$	0	0	0	0

	$V_2^{62}$	$V_3^{62}$	$V_4^{62}$	$V_5^{62}$
$S_{11}^{62}$	755	855	955	1055
$S_{12}^{62}$	756	856	956	1056
$S_{13}^{62}$	757	857	957	1057
$S_{14}^{62}$	759	859	959	1059
$S_{15}^{62}$	801	901	1001	1101
$S_{16}^{62}$	802	902	1002	1102
$S_{17}^{62}$	803	903	1003	1103
$S_{18}^{62}$	804	904	1004	1104
$S_{19}^{62}$	807	907	1007	1107

	$V_2^{62}$	$V_3^{62}$	$V_4^{62}$	$V_5^{62}$
$S_{11}^{62}$	0	0	0	0
$S_{12}^{62}$	0	1	0	0
$S_{13}^{62}$	0	0	2	0
$S_{14}^{62}$	0	2	0	0
$S_{15}^{62}$	0	0	0	0
$S_{16}^{62}$	0	0	3	0
$S_{17}^{62}$	0	0	0	0
$S_{18}^{62}$	0	1	0	0
$S_{19}^{62}$	0	0	0	0

**Fig.4.16 Tableaux de marche et meilleures décisions obtenues**

➤ **Génération et évaluation des décisions réalisables**

Les actions de régulation proposées par le module de génération des décisions pour la résorption de cette perturbation sont : le raccourci, le direct en ligne et la régulation en ligne.

Le raccourci et le direct en ligne sont testés entre la station courante du véhicule perturbé et le nœud de correspondance touché par l'incident.

Quant à la recherche de la meilleure solution de type régulation en ligne, nous avons utilisé la même approche que pour l'exemple précédent, nous supposons aussi que le régulateur n'a pas changé d'avis, c'est-à-dire que ses préférences restent les mêmes.

Nous donnons par la figure 4.16 la meilleure solution obtenue par cette approche et par la figure 4.17 la courbe de convergence de l'algorithme évolutionnaire.

	$\mu(AT)$	$\mu(TT)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$	Score global
RAC	0,31	1	0,42	0,7	0,6	0,62
DEL	0,7	1	0	1	0,6	0,59
REL	0,57	1	0	1	1	0,68

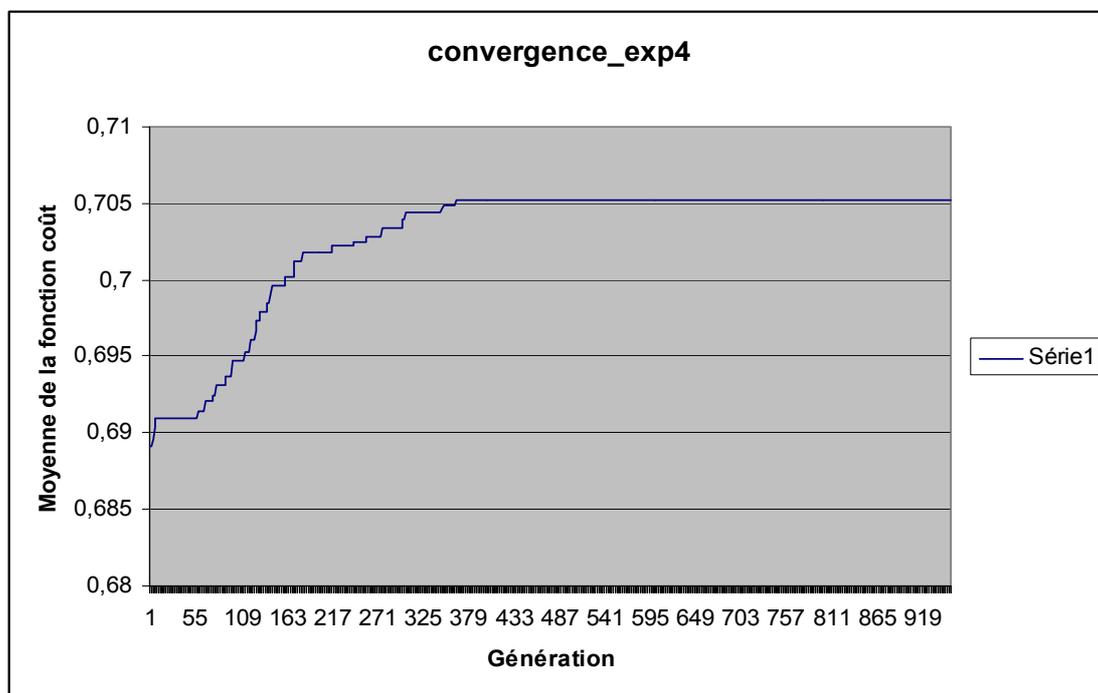
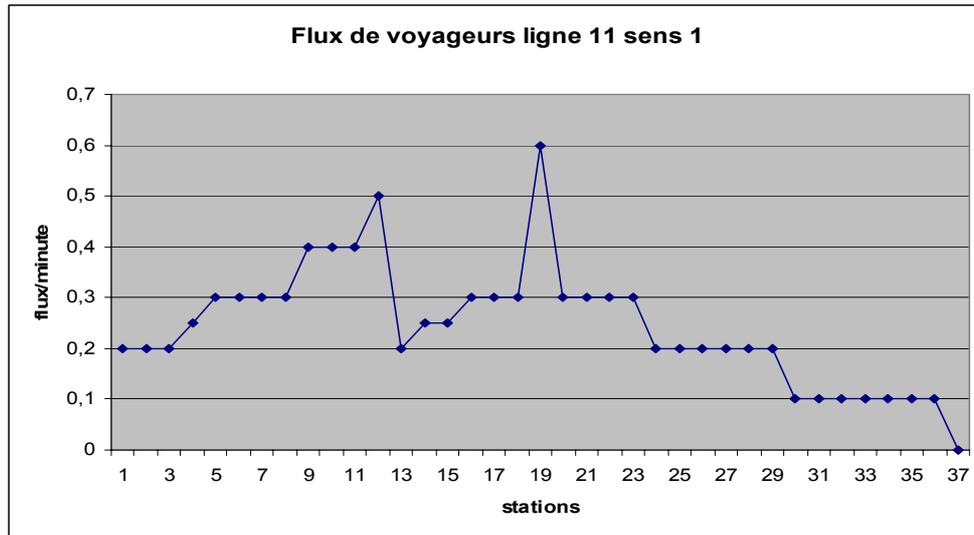


Fig. 4.17. Evaluation de décisions et convergence de l'algorithme évolutionnaire

### 4.3.3 Exemple 5

Nous considérons ici la ligne 11 sens 1 et la ligne de tramway sens 1. Supposons qu'à 10 :05 un problème de circulation ait lieu sur la route de la ligne bus et qu'il bloque la circulation pendant une dizaine de minutes. La congestion causée empêchera le véhicule  $V_{12}^{11}$  de cette ligne d'avancer et lui impose un retard de 10 minutes. Ce véhicule devait assurer une correspondance avec le tramway  $V_{38}^T$  de 10 :26 au pôle d'échange Saint Waast, mais, suite à

son retard, la correspondance ne peut pas avoir lieu, car le bus passera à 10 :27, c'est-à-dire après le départ du tramway.



4.18. Flux de voyageurs de la ligne 11 sens 1

➤ **Détermination de la zone de régulation**

La zone de régulation contient 19 stations et 4 véhicules de la ligne bus, 3 stations et 4 véhicules de la ligne tramway.

➤ **Génération et évaluation des décisions réalisables**

Deux solutions ont été proposées par le générateur de décisions, soit le « haut le pied hors ligne » soit la « régulation en ligne ». Nous avons appliqué le « haut le pied hors ligne » entre la station courante et le nœud de correspondance touché par l'incident. Nous avons aussi utilisé la même approche et la même matrice de préférences du régulateur. La meilleure solution obtenue et la courbe de convergence de l'algorithme évolutionnaire utilisé sont montrées, respectivement par les figures 4.19 et 4.20.

	$V_{11}^{11}$	$V_{12}^{11}$	$V_{13}^{11}$	$V_{14}^{11}$
$S_0^{11}$	940	1000	1020	1040
$S_1^{11}$	942	1002	1022	1042
$S_2^{11}$	943	1003	1023	1043
$S_3^{11}$	944	1004	1024	1044
$S_4^{11}$	945	1005	1025	1045
$S_5^{11}$	948	1008	1028	1048
$S_6^{11}$	950	1010	1030	1050
$S_7^{11}$	951	1011	1031	1051
$S_8^{11}$	953	1013	1033	1053
$S_9^{11}$	954	1014	1034	1054
$S_{10}^{11}$	955	1015	1035	1055
$S_{11}^{11}$	957	1017	1037	1057
$S_{12}^{11}$	958	1018	1038	1058
$S_{13}^{11}$	1000	1020	1040	1100
$S_{14}^{11}$	1001	1021	1041	1101
$S_{15}^{11}$	1002	1022	1042	1102
$S_{16}^{11}$	1003	1023	1043	1103
$S_{17}^{11}$	1004	1024	1044	1104
$S_{18}^{11}$	1005	1025	1045	1105

	$V_{11}^{11}$	$V_{12}^{11}$	$V_{13}^{11}$	$V_{14}^{11}$
$S_0^{11}$	0	0	0	0
$S_1^{11}$	0	0	1	0
$S_2^{11}$	0	0	0	0
$S_3^{11}$	0	0	0	0
$S_4^{11}$	0	0	0	0
$S_5^{11}$	0	0	0	0
$S_6^{11}$	0	0	2	0
$S_7^{11}$	0	0	0	0
$S_8^{11}$	0	0	0	0
$S_9^{11}$	0	0	0	0
$S_{10}^{11}$	0	0	0	0
$S_{11}^{11}$	0	0	2	0
$S_{12}^{11}$	0	0	0	0
$S_{13}^{11}$	0	0	0	0
$S_{14}^{11}$	0	0	0	0
$S_{15}^{11}$	0	0	0	0
$S_{16}^{11}$	0	0	0	0
$S_{17}^{11}$	0	0	0	0
$S_{18}^{11}$	0	0	0	0

	$V_{37}^T$	$V_{38}^T$	$V_{39}^T$	$V_{40}^T$
$S_0^T$	1018	1025	1032	1039
$S_1^T$	1019	1026	1033	1040
$S_2^T$	1021	1028	1035	1042

	$V_{37}^T$	$V_{38}^T$	$V_{39}^T$	$V_{40}^T$
$S_0^T$	0	0	0	0
$S_1^T$	0	2	1	0
$S_2^T$	0	0	0	0

**Fig.4.19. Tableaux de marche et meilleures décisions obtenues**

	$\mu(AT)$	$\mu(TT)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$	Score global
HLP	0,75	1	0,32	0,7	0,2	0,59
REL	0,27	1	0,25	1	1	0,70

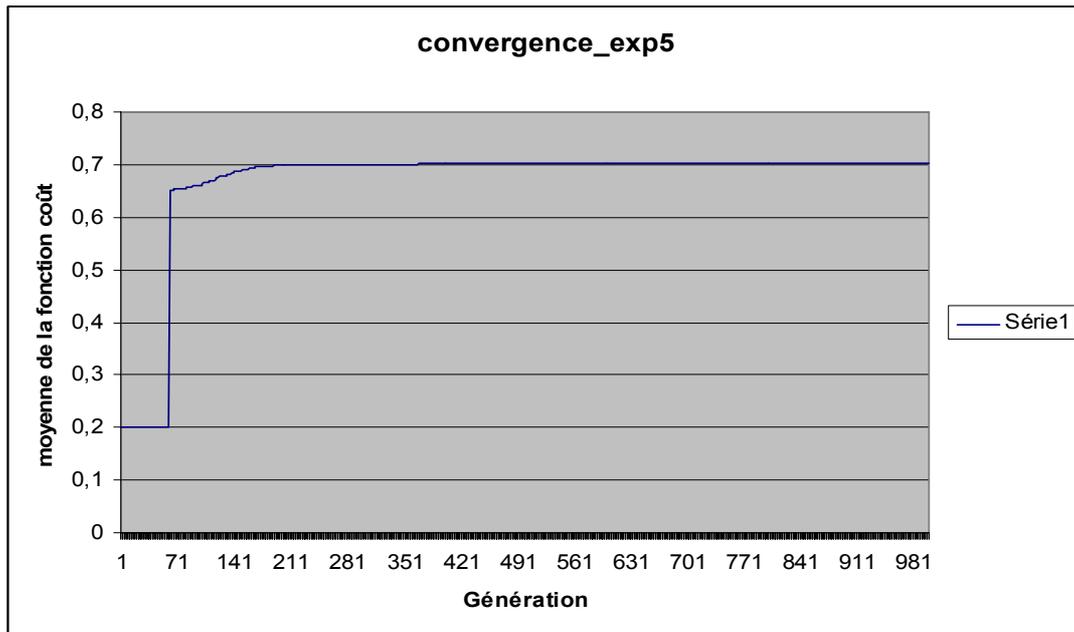


Fig. 4.20. Evaluation des décisions et convergence de l’algorithme évolutionnaire

## 4.4 Scénario 3 : Perturbation touchant trois lignes

### 4.4.1 Exemple 6 :

#### ➤ Description de l’incident

Nous considérons ici les trois lignes : ligne 11 sens 1, ligne 15 sens 2 et la ligne tramway sens 1. Supposons qu’à 11 :05 un accident de route entre deux véhicules personnels ait lieu sur un tronçon de la ligne 15, pas loin de la Gare SNCF, cette ligne a une fréquence de 1 bus/20 minutes. Cet incident va bloquer la circulation et causera un retard de 11 minutes pour le véhicule  $V_{10}^{15}$  de la ligne perturbée. Ce bus devait assurer deux correspondances, l’une vers le tramway  $V_{45}^T$  à 11 :20 et l’autre avec le bus  $V_{15}^{11}$  de la ligne 11 à 11 :25. Suite à ce retard, les deux correspondances seront manquées, car le bus  $V_{10}^{15}$  passera à 11 : 26 au lieu de 11 :15, si on ne régule pas le réseau.

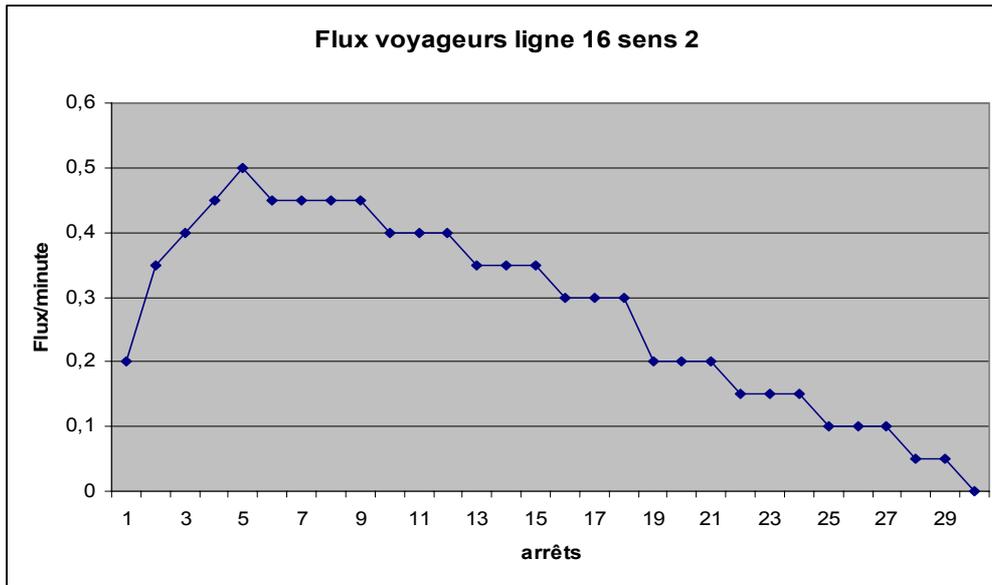


Fig. 4.21. Flux de voyageurs de la ligne 16 sens 2

### ➤ Détermination de la zone de régulation

L'horizon spatio-temporel dans lequel nous travaillons pour traiter cette perturbation est constitué de 6 stations de la ligne 15, 15 de la ligne 11, 6 de la ligne tramway et de 4 véhicules de chacune de ces lignes.

	$V_9^{15}$	$V_{10}^{15}$	$V_{11}^{15}$	$V_{12}^{15}$
$S_{30}^{15}$	1045	1105	1125	1145
$S_{31}^{15}$	1046	1106	1126	1146
$S_{32}^{15}$	1047	1107	1127	1147
$S_{33}^{15}$	1050	1110	1130	1150
$S_{34}^{15}$	1051	1111	1131	1151
$S_{35}^{15}$	1055	1115	1135	1155

	$V_9^{15}$	$V_{10}^{15}$	$V_{11}^{15}$	$V_{12}^{15}$
$S_{30}^{15}$	0	0	0	0
$S_{31}^{15}$	0	0	0	0
$S_{32}^{15}$	0	0	1	0
$S_{33}^{15}$	0	0	2	0
$S_{34}^{15}$	0	0	0	0
$S_{35}^{15}$	0	0	0	0

	$V_{44}^T$	$V_{45}^T$	$V_{46}^T$	$V_{47}^T$
$S_0^T$	1106	1113	1120	1127
$S_1^T$	1107	1114	1121	1128
$S_2^T$	1109	1116	1123	1130
$S_3^T$	1110	1117	1124	1131
$S_4^T$	1112	1119	1126	1133
$S_5^T$	1113	1120	1127	1134

	$V_{44}^T$	$V_{45}^T$	$V_{46}^T$	$V_{47}^T$
$S_0^T$	0	0	0	0
$S_1^T$	0	1	0	0
$S_2^T$	0	1	0	0
$S_3^T$	0	0	0	0
$S_4^T$	0	2	0	0
$S_5^T$	0	0	0	0

	$V_{14}^{11}$	$V_{15}^{11}$	$V_{16}^{11}$	$V_{17}^{11}$
$S_4^{11}$	0	0	0	0
$S_5^{11}$	0	0	0	0
$S_6^{11}$	0	0	3	0
$S_7^{11}$	0	2	0	0
$S_8^{11}$	0	0	0	0
$S_9^{11}$	0	0	0	0
$S_{10}^{11}$	0	0	1	0
$S_{11}^{11}$	0	2	0	0
$S_{12}^{11}$	0	0	0	0
$S_{13}^{11}$	0	0	0	0
$S_{14}^{11}$	0	0	0	0
$S_{15}^{11}$	0	0	1	0
$S_{16}^{11}$	0	0	0	0
$S_{17}^{11}$	0	1	0	0
$S_{18}^{11}$	0	0	0	0

	$V_{14}^{11}$	$V_{15}^{11}$	$V_{16}^{11}$	$V_{17}^{11}$
$S_4^{11}$	1045	1105	1125	1145
$S_5^{11}$	1048	1108	1128	1148
$S_6^{11}$	1050	1110	1130	1150
$S_7^{11}$	1051	1111	1131	1151
$S_8^{11}$	1053	1113	1133	1153
$S_9^{11}$	1054	1114	1134	1154
$S_{10}^{11}$	1055	1115	1135	1155
$S_{11}^{11}$	1057	1117	1137	1157
$S_{12}^{11}$	1058	1118	1138	1158
$S_{13}^{11}$	1100	1120	1140	1200
$S_{14}^{11}$	1101	1121	1141	1201
$S_{15}^{11}$	1102	1122	1142	1202
$S_{16}^{11}$	1103	1123	1143	1203
$S_{17}^{11}$	1104	1124	1144	1204
$S_{18}^{11}$	1105	1125	1145	1205

**Fig. 4.22. Tableaux de marche et meilleures décisions obtenues**

➤ **Génération de décisions**

De même que pour l'exemple précédent, les décisions réalisables d'après la base de règles sont le « haut le pied hors ligne » et la « régulation en ligne ». Le « haut le pied hors ligne » sera appliqué entre la station courante et le nœud de correspondance.

Pour trouver la meilleure solution de type régulation en ligne, nous avons utilisé l'approche non agrégative basée sur l'épsilon dominance. Nous avons supposé que le régulateur a exprimé ses préférences comme suit :

$$\varepsilon = (\varepsilon(AT), \varepsilon(TT), \varepsilon(RT), \varepsilon(KM), \varepsilon(QS))^T = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5)^T = (0.1, 0.05, 0.1, 0.1, 0.1)^T$$

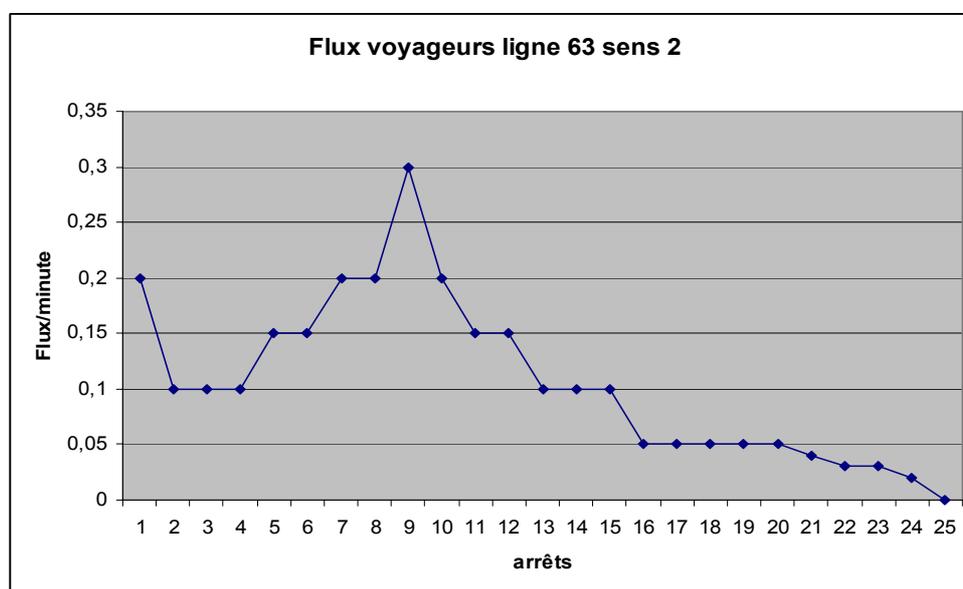
Comme nous l'avons déjà signalé au chapitre 3,  $\varepsilon_i$  est le seuil au dessous duquel deux décisions solutions sont identiques aux yeux du décideur. Le nombre de générations maximales de l'algorithme est de 1000 générations et les opérateurs génétiques utilisés sont les mêmes que pour les exemples précédents. Nous avons pu obtenir de bonnes solutions avec cette approche dont la meilleure est celle donnée par la figure 4.22.

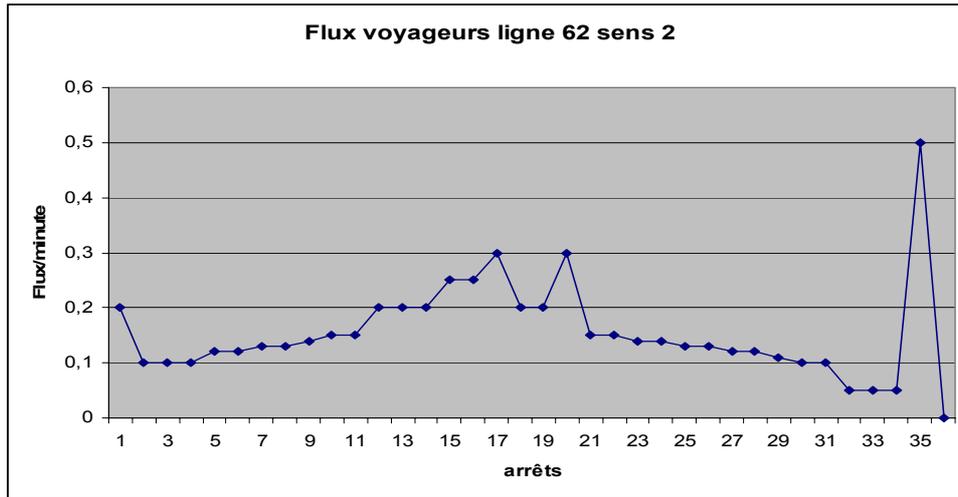
	$\mu(AT)$	$\mu(TT)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$
HLP	0,27	1	0	0,7	0,4
REL	0,61	0,8	0,22	1	1

**Fig. 4.23. Evaluation de décisions**

#### 4.4.2 Exemple 7 :

Nous considérons ici les trois lignes : ligne 63 sens 2, ligne 62 sens 2 et la ligne tramway sens 2. Supposons qu'à 9 :50 un accident de route entre deux véhicules personnels ait lieu sur un tronçon de la ligne 63, qui a une fréquence de 1 bus/60 minutes. Cet incident va bloquer la circulation et causera un retard de 11 minutes pour le véhicule  $V_3^{63}$  prévu à 9 :52 de la ligne perturbée. Ce bus devait assurer deux correspondances, l'une vers le tramway  $V_{34}^T$  à 09 :57 et l'autre avec le bus  $V_3^{62}$  de la ligne 11 à 10 :02. Suite à ce retard, les deux correspondances seront manquées, si le régulateur n'intervient pas, car le bus perturbé passera à 10 :03 au nœud de correspondance.





**Fig. 4.23. Flux de voyageurs des lignes impliquées**

➤ **Détermination de la zone de régulation :**

Pour cet exemple, nous considérons une zone de régulation comprenant 4 véhicules de chaque ligne concernée et 10 arrêts pour la ligne 63, 9 arrêts de la ligne 62 et 6 arrêts de la ligne de tramway.

	$V_2^{63}$	$V_3^{63}$	$V_4^{63}$	$V_5^{63}$
$S_0^{63}$	840	940	1040	1140
$S_1^{63}$	842	942	1042	1142
$S_2^{63}$	843	943	1043	1143
$S_3^{63}$	844	944	1044	1144
$S_4^{63}$	845	945	1045	1145
$S_5^{63}$	847	947	1047	1147
$S_6^{63}$	848	948	1048	1148
$S_7^{63}$	850	950	1050	1150
$S_8^{63}$	852	952	1052	1152
$S_9^{63}$	854	954	1054	1154

	$V_2^{63}$	$V_3^{63}$	$V_4^{63}$	$V_5^{63}$
$S_0^{63}$	0	0	0	0
$S_1^{63}$	0	0	0	0
$S_2^{63}$	0	0	1	0
$S_3^{63}$	0	0	0	0
$S_4^{63}$	0	0	2	0
$S_5^{63}$	0	0	0	0
$S_6^{63}$	0	0	0	0
$S_7^{63}$	0	0	2	0
$S_8^{63}$	0	0	0	0
$S_9^{63}$	0	0	0	0

	$V_2^{62}$	$V_3^{62}$	$V_4^{62}$	$V_5^{62}$
$S_8^{62}$	850	950	1050	1150
$S_9^{62}$	852	952	1052	1152
$S_{10}^{62}$	853	953	1053	1153
$S_{11}^{62}$	854	954	1054	1154
$S_{12}^{62}$	856	956	1056	1156
$S_{13}^{62}$	857	957	1057	1157
$S_{14}^{62}$	859	959	1059	1159
$S_{15}^{62}$	900	1000	1100	1200
$S_{16}^{62}$	902	1002	1102	1202

	$V_2^{62}$	$V_3^{62}$	$V_4^{62}$	$V_5^{62}$
$S_8^{62}$	0	0	0	0
$S_9^{62}$	0	1	3	0
$S_{10}^{62}$	0	0	0	0
$S_{11}^{62}$	0	2	0	0
$S_{12}^{62}$	0	0	1	0
$S_{13}^{62}$	0	0	0	0
$S_{14}^{62}$	0	2	0	0
$S_{15}^{62}$	0	0	1	0
$S_{16}^{62}$	0	0	0	0

	$V_{32}^T$	$V_{33}^T$	$V_{34}^T$	$V_{35}^T$
$S_0^T$	943	950	957	1004
$S_1^T$	944	951	958	1005
$S_2^T$	946	953	1000	1007
$S_3^T$	947	954	1001	1008
$S_4^T$	949	956	1003	1010
$S_5^T$	950	957	1004	1011

	$V_{32}^T$	$V_{33}^T$	$V_{34}^T$	$V_{35}^T$
$S_0^T$	0	0	0	0
$S_1^T$	0	0	1	0
$S_2^T$	0	0	0	0
$S_3^T$	0	1	2	0
$S_4^T$	0	1	0	0
$S_5^T$	0	0	0	0

**Fig. 4.25. Tableaux de marche et meilleures décisions obtenues**

➤ **Génération et évaluation des décisions réalisables**

Deux types d'action de régulation sont proposés par le générateur de décisions (base de règles) : le « haut le pied hors ligne » et la « régulation en ligne ». Comme pour les exemples précédents, le « haut le pied hors ligne » a été testé entre la station courante du véhicule perturbé et le nœud de correspondance menacé par l'incident.

En ce qui concerne la régulation en ligne, nous avons utilisé la même approche que pour l'exemple 6, et nous supposons que le régulateur garde ses préférences inchangées. C'est-à-dire que le vecteur des epsilons demeure le même. Nous avons testé l'algorithme pour 1000 générations. Le résultat obtenu est illustré par le tableau de la figure 4.25, qui représente les retards à appliquer aux différents véhicules.

	$\mu(AT)$	$\mu(TT)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$
HLP	0,3	0	0,38	0,75	0,9
REL	0,17	0,92	0,34	1	1

Fig. 4.26. Evaluation de décisions

## 4.5 Scénario 4 : Perturbation touchant quatre lignes

### 4.5.1 Exemple 8 :

#### ➤ Description de l'incident

Nous étudions ici le cas d'une perturbation impliquant quatre lignes du réseau simulé. Considérons les lignes : 16 sens 1, ligne 11 sens 1, ligne 17 sens 1 et la ligne tramway sens 1. Nous supposons qu'à 12 :44, le véhicule  $V_{11}^{16}$  a un retard de 11 minutes à cause d'un problème technique, ainsi il arrivera à la station Gare à 13 :07 au lieu de 12 :56. Ce véhicule doit assurer trois correspondances à ce nœud de correspondance. La première correspondance est prévue à 13 :05 vers le bus  $V_{20}^{11}$  de la ligne 11. La deuxième correspondance est prévue à 13 :06 vers le bus  $V_{21}^{17}$  de la ligne 17 et la dernière vers le tramway  $V_{62}^T$  à 13 :04. Il est clair que, suite à cet incident si, on ne fait rien, les trois correspondances n'auront pas lieu, obligeant ainsi les voyageurs à attendre plus longtemps que prévu.

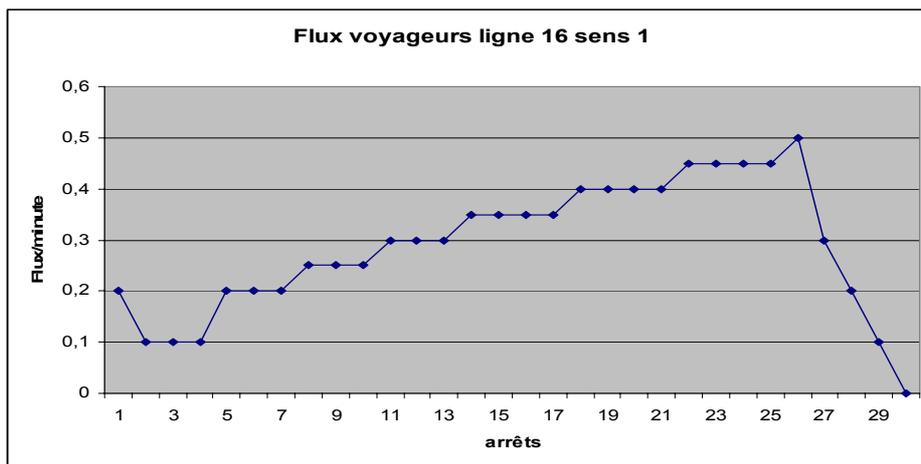


Fig. 4.27. Flux de voyageurs de la ligne 16 sens 1

➤ **Détermination de la zone de régulation**

La zone de régulation obtenue pour cet exemple implique 8 stations et 4 véhicules de la ligne 16, 9 arrêts et 5 véhicules de la ligne 17, 16 stations et 4 véhicules de la ligne 11, 6 stations et 3 véhicules de la ligne tramway.

	$V_{10}^{16}$	$V_{11}^{16}$	$V_{12}^{16}$	$V_{13}^{16}$
$S_{18}^{16}$	1225	1244	1330	1411
$S_{19}^{16}$	1227	1246	1332	1413
$S_{20}^{16}$	1229	1248	1334	1415
$S_{21}^{16}$	1230	1249	1335	1416
$S_{22}^{16}$	1232	1251	1337	1418
$S_{23}^{16}$	1234	1252	1338	1419
$S_{24}^{16}$	1236	1254	1340	1421
$S_{25}^{16}$	1238	1256	1342	1423

	$V_{10}^{16}$	$V_{11}^{16}$	$V_{12}^{16}$	$V_{13}^{16}$
$S_{18}^{16}$	0	0	0	0
$S_{19}^{16}$	0	0	2	0
$S_{20}^{16}$	0	0	0	0
$S_{21}^{16}$	0	0	0	0
$S_{22}^{16}$	0	0	2	0
$S_{23}^{16}$	0	0	1	0
$S_{24}^{16}$	0	0	0	0
$S_{25}^{16}$	0	0	0	0

	$V_{19}^{17}$	$V_{20}^{17}$	$V_{21}^{17}$	$V_{22}^{17}$	$V_{23}^{17}$
$S_0^{17}$	1226	1246	1306	1326	1346
$S_1^{17}$	1231	1251	1311	1331	1451
$S_2^{17}$	1232	1252	1312	1332	1452
$S_3^{17}$	1235	1255	1315	1335	1455
$S_4^{17}$	1236	1256	1316	1336	1456
$S_5^{17}$	1238	1258	1318	1338	1458
$S_6^{17}$	1240	1300	1320	1340	1500
$S_7^{17}$	1241	1301	1321	1341	1501
$S_8^{17}$	1243	1303	1323	1343	1503

	$V_{19}^{17}$	$V_{20}^{17}$	$V_{21}^{17}$	$V_{22}^{17}$	$V_{23}^{17}$
$S_0^{17}$	0	0	0	0	0
$S_1^{17}$	0	0	2	0	0
$S_2^{17}$	0	1	0	3	0
$S_3^{17}$	0	0	0	0	0
$S_4^{17}$	0	0	1	0	0
$S_5^{17}$	0	0	0	1	0
$S_6^{17}$	0	2	0	0	0
$S_7^{17}$	0	0	0	0	0
$S_8^{17}$	0	0	0	0	0

	$V_{61}^T$	$V_{62}^T$	$V_{63}^T$
$S_0^T$	1251	1257	1303
$S_1^T$	1252	1258	1304
$S_2^T$	1254	1300	1306
$S_3^T$	1255	1301	1307
$S_4^T$	1257	1303	1309
$S_5^T$	1258	1304	1310

	$V_{61}^T$	$V_{62}^T$	$V_{63}^T$
$S_0^T$	0	0	0
$S_1^T$	0	2	0
$S_2^T$	0	1	0
$S_3^T$	0	0	0
$S_4^T$	0	0	0
$S_5^T$	0	0	0

	$V_{19}^{11}$	$V_{20}^{11}$	$V_{21}^{11}$	$V_{22}^{11}$		$V_{19}^{11}$	$V_{20}^{11}$	$V_{21}^{11}$	$V_{22}^{11}$
$S_3^{11}$	1224	1244	1304	1324	$S_3^{11}$	0	0	0	0
$S_4^{11}$	1225	1245	1305	1325	$S_4^{11}$	0	1	0	0
$S_5^{11}$	1228	1248	1308	1328	$S_5^{11}$	0	0	0	0
$S_6^{11}$	1230	1250	1310	1330	$S_6^{11}$	0	0	3	0
$S_7^{11}$	1231	1251	1311	1331	$S_7^{11}$	0	2	0	0
$S_8^{11}$	1233	1253	1313	1333	$S_8^{11}$	0	0	0	0
$S_9^{11}$	1234	1254	1314	1334	$S_9^{11}$	0	0	0	0
$S_{10}^{11}$	1235	1255	1315	1335	$S_{10}^{11}$	0	0	0	0
$S_{11}^{11}$	1237	1257	1317	1337	$S_{11}^{11}$	0	1	0	0
$S_{12}^{11}$	1238	1258	1318	1338	$S_{12}^{11}$	0	0	1	0
$S_{13}^{11}$	1240	1300	1320	1340	$S_{13}^{11}$	0	0	0	0
$S_{14}^{11}$	1241	1301	1321	1341	$S_{14}^{11}$	0	0	0	0
$S_{15}^{11}$	1242	1302	1322	1342	$S_{15}^{11}$	0	0	0	0
$S_{16}^{11}$	1243	1303	1323	1343	$S_{16}^{11}$	0	0	1	0
$S_{17}^{11}$	1244	1304	1324	1344	$S_{17}^{11}$	0	0	0	0
$S_{18}^{11}$	1245	1305	1325	1345	$S_{18}^{11}$	0	0	0	0

Fig. 4.28. Tableaux de marche et meilleures décisions obtenues

➤ **Génération et évaluation des décisions réalisables**

De même que pour l'exemple précédent, seul « le haut le pied hors ligne » et la « régulation en ligne » sont réalisables, d'après le module de génération de décisions. Nous appliquons « le haut le pied hors ligne » entre la station courante du véhicule perturbé et le nœud de correspondance touché par la perturbation.

Pour trouver la meilleure solution de type « régulation en ligne », nous avons essayé l'approche agrégative par Choquet et celle basée sur l'épsilon dominance. Nous avons utilisé le même vecteur de préférences et la même matrice que pour les exemples précédents. L'approche Choquet est plus rapide, mais elle ne maintient pas une diversité suffisante dans la population finale.

	$\mu(AT)$	$\mu(TT)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$	Score global
HLP	0,27	1	0	0,75	0,3	0,44
REL	0,22	0,86	0,14	1	1	0,61

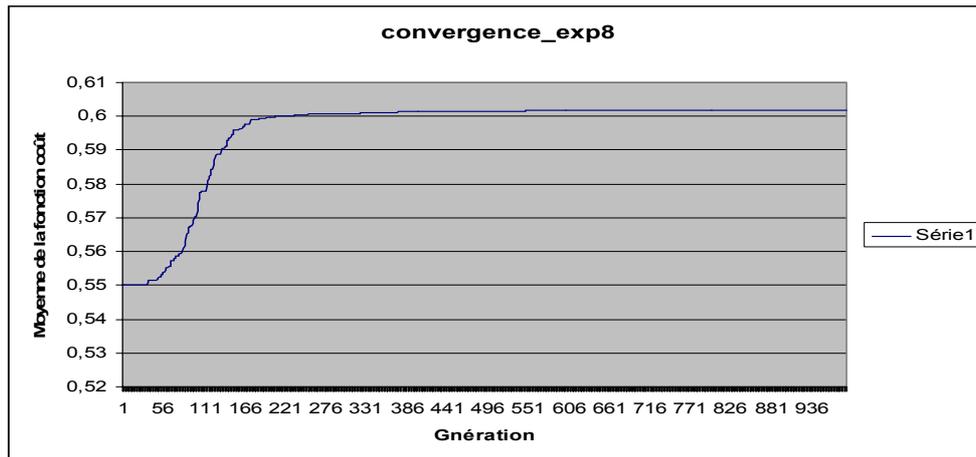
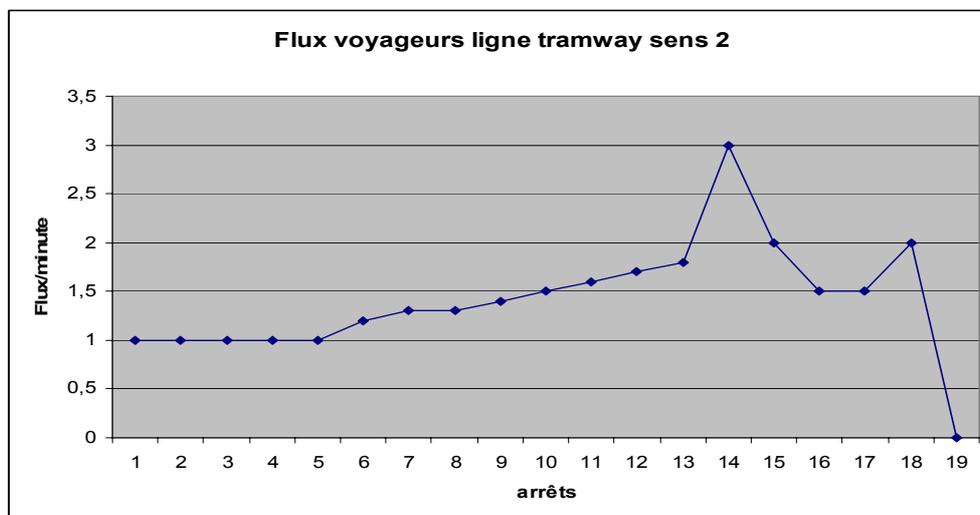


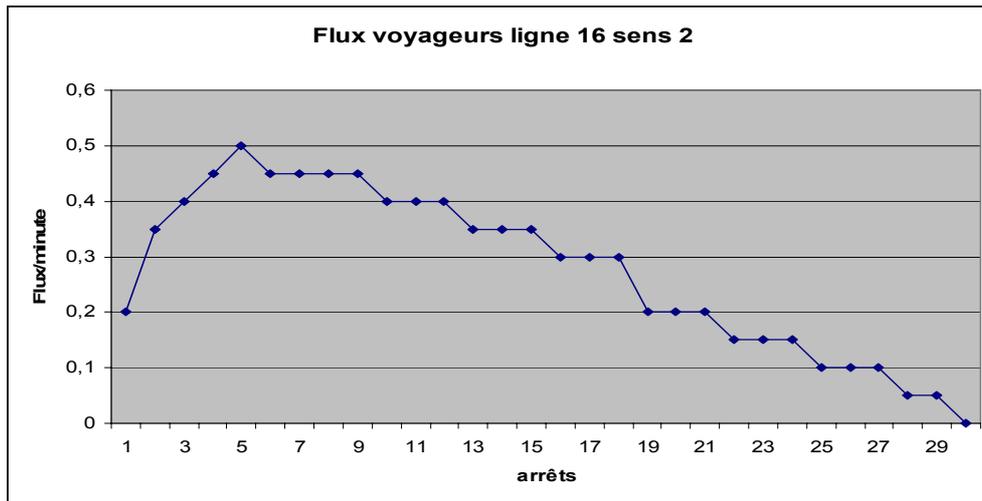
Fig. 4.29. Evaluation de décisions et convergence de l'algorithme évolutionnaire

#### 4.5.2 Exemple 9 :

##### ➤ Description de l'incident

Comme pour l'exemple 8, nous étudions ici le cas d'une perturbation impliquant quatre lignes de transport. Considérons les lignes : 11 sens 1, ligne 15 sens 1, ligne 16 sens 2 et la ligne tramway sens 2. Nous supposons qu'à 10 :50, le tram  $V_{40}^T$  a eu un problème de fermeture de portes lui causant un retard de 10 minutes, ainsi il arrivera à la station Gare à 11 :06, au lieu de 10 :56. Ce tram a trois correspondances à ce nœud de correspondance. La première correspondance est prévue à 11 : 05 vers le bus  $V_{14}^{11}$  de la ligne 11. La deuxième correspondance est prévue à 11 :06 vers le bus  $V_9^{16}$  de la ligne 16 et la dernière correspondance vers le bus  $V_{15}^{15}$  de la ligne 15 à 11 :06. Il est clair que, suite à cet incident, si on ne fait rien, les trois correspondances n'auront pas lieu, obligeant ainsi les voyageurs à attendre plus longtemps que prévu.





**Fig. 4.30. Flux de voyageurs de lignes impliquées**

➤ **Détermination de la zone de régulation**

Nous considérons pour ce scénario une zone de régulation constituée de 15 stations de la ligne tramway, 8 stations de la ligne 15, 5 de la ligne 16 et 13 stations de la ligne 11. Le nombre de véhicules est égal à 4 pour chaque ligne concernée.

	$V_{39}^T$	$V_{40}^T$	$V_{41}^T$	$V_{42}^T$
$S_0^T$	1032	1039	1046	1052
$S_1^T$	1033	1040	1047	1053
$S_2^T$	1035	1042	1049	1055
$S_3^T$	1036	1043	1050	1056
$S_4^T$	1038	1045	1052	1058
$S_5^T$	1039	1046	1053	1059
$S_6^T$	1041	1048	1055	1101
$S_7^T$	1042	1049	1056	1102
$S_8^T$	1043	1050	1057	1103
$S_9^T$	1044	1051	1058	1104
$S_{10}^T$	1045	1052	1059	1105
$S_{11}^T$	1047	1054	1101	1107
$S_{12}^T$	1048	1055	1102	1108
$S_{13}^T$	1049	1056	1103	1109
$S_{14}^T$	1050	1057	1104	1110

	$V_{39}^T$	$V_{40}^T$	$V_{41}^T$	$V_{42}^T$
$S_0^T$	0	0	0	0
$S_1^T$	0	0	0	0
$S_2^T$	0	0	0	0
$S_3^T$	0	0	0	0
$S_4^T$	0	0	3	0
$S_5^T$	0	0	0	0
$S_6^T$	0	0	1	0
$S_7^T$	0	0	0	0
$S_8^T$	0	0	0	0
$S_9^T$	0	0	0	0
$S_{10}^T$	0	0	1	0
$S_{11}^T$	0	0	0	0
$S_{12}^T$	0	0	0	0
$S_{13}^T$	0	0	0	0
$S_{14}^T$	0	0	0	0

	$V_{14}^{15}$	$V_{15}^{15}$	$V_{16}^{15}$	$V_{17}^{15}$
$S_0^{15}$	1030	1050	1110	1130
$S_1^{15}$	1032	1052	1112	1132
$S_2^{15}$	1033	1053	1113	1133
$S_3^{15}$	1036	1056	1116	1136
$S_4^{15}$	1037	1057	1117	1137
$S_5^{15}$	1039	1059	1119	1139
$S_6^{15}$	1040	1100	1120	1140
$S_7^{15}$	1046	1106	1126	1146

	$V_{14}^{15}$	$V_{15}^{15}$	$V_{16}^{15}$	$V_{17}^{15}$
$S_0^{15}$	0	0	0	0
$S_1^{15}$	0	0	3	0
$S_2^{15}$	0	2	0	0
$S_3^{15}$	0	0	1	0
$S_4^{15}$	0	1	0	0
$S_5^{15}$	0	0	0	0
$S_6^{15}$	0	0	1	0
$S_7^{15}$	0	0	0	0

	$V_8^{16}$	$V_9^{16}$	$V_{10}^{16}$	$V_{11}^{16}$
$S_0^{16}$	1017	1059	1119	1204
$S_1^{16}$	1019	1101	1121	1206
$S_2^{16}$	1021	1103	1123	1208
$S_3^{16}$	1022	1104	1124	1209
$S_4^{16}$	1024	1106	1126	1211

	$V_8^{16}$	$V_9^{16}$	$V_{10}^{16}$	$V_{11}^{16}$
$S_0^{16}$	0	0	0	0
$S_1^{16}$	0	2	0	0
$S_2^{16}$	0	0	3	0
$S_3^{16}$	0	2	1	0
$S_4^{16}$	0	0	0	0

	$V_{13}^{11}$	$V_{14}^{11}$	$V_{15}^{11}$	$V_{16}^{11}$
$S_6^{11}$	1030	1050	1110	1130
$S_7^{11}$	1031	1051	1111	1131
$S_8^{11}$	1033	1053	1113	1133
$S_9^{11}$	1034	1054	1114	1134
$S_{10}^{11}$	1035	1055	1115	1135
$S_{11}^{11}$	1037	1057	1117	1137
$S_{12}^{11}$	1038	1058	1118	1138
$S_{13}^{11}$	1040	1100	1120	1140
$S_{14}^{11}$	1041	1101	1121	1141
$S_{15}^{11}$	1042	1102	1122	1142
$S_{16}^{11}$	1043	1103	1123	1143
$S_{17}^{11}$	1044	1104	1124	1144
$S_{18}^{11}$	1045	1105	1125	1145

	$V_{13}^{11}$	$V_{14}^{11}$	$V_{15}^{11}$	$V_{16}^{11}$
$S_6^{11}$	0	0	0	0
$S_7^{11}$	0	0	2	0
$S_8^{11}$	0	1	0	0
$S_9^{11}$	0	0	0	0
$S_{10}^{11}$	0	0	0	0
$S_{11}^{11}$	0	0	2	0
$S_{12}^{11}$	0	3	0	0
$S_{13}^{11}$	0	0	0	0
$S_{14}^{11}$	0	0	0	0
$S_{15}^{11}$	0	1	0	0
$S_{16}^{11}$	0	0	0	0
$S_{17}^{11}$	0	0	1	0
$S_{18}^{11}$	0	0	0	0

**Fig. 4.31. Tableaux de marche et meilleures décisions obtenues**

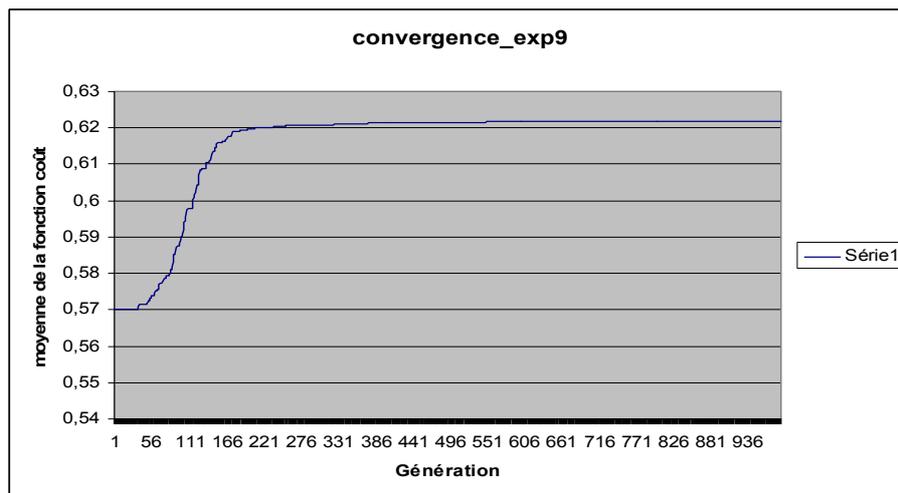
➤ **Génération et évaluation des décisions réalisables**

Pour ce scénario de perturbation, trois actions de régulation sont proposées par le module de génération de décisions, il s'agit de la régulation en ligne, le raccourci et le direct en ligne. Le raccourci et le direct en ligne seront testés entre la station courante et le nœud de correspondance touché par l'incident.

Pour la construction de la meilleure solution de type régulation en ligne, nous utilisons ici l'approche agrégative Choquet et l'approche basée sur l'épsilon dominance. Le nombre de générations maximal est de 1000 et la taille de la population considérée est de 100 individus.

Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 4.31.

	$\mu(AT)$	$\mu(TT)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$	Score global
RAC	0,51	1	0	0,7	0	0,42
DEL	0,67	1	0	1	0,1	0,45
REL	0,32	0,83	0,17	1	1	0,62



**Fig. 4.32. Evaluation de décisions et convergence de l'algorithme évolutionnaire**

## 4.6 Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux résultats obtenus par simulation visant à valider les différentes méthodes et approches de régulation proposées. Nous avons pu montrer l'efficacité de nos approches et méthodes à travers les quelques scénarii présentés. Ainsi, la méthode de détermination de la zone de régulation que nous avons développée nous a aidés à déterminer d'une manière dynamique l'ensemble des stations et des arrêts sur lesquels on doit agir afin de résorber n'importe quelle perturbation. Il est aussi important de signaler que cette méthode a

un apport considérable pour les approches évolutionnaires proposées, puisqu'elle peut nous aider à réduire la taille de l'espace de recherche à explorer. Dans un second point, nous pouvons dire que la base de règles proposée est presque complète, et qu'elle permet de générer des décisions proches du souhait des régulateurs. Les approches évolutionnaires ont donné de bonnes solutions pour l'ensemble des scénarii en un temps de calcul très raisonnable, et ce malgré le degré de complexité du problème de régulation. Une autre contribution qui a été mise en évidence est l'évaluation des décisions par l'intégrale de Choquet, car elle nous a aidés à tenir compte des préférences des régulateurs et à détecter les incohérences qui peuvent se glisser dans ces préférences.

## Conclusions et perspectives

Dans cette thèse, nous avons abordé et étudié le problème de la régulation d'un réseau de transport urbain perturbé. En effet, les exploitants des réseaux de transport sont contraints de trouver des solutions rapides et efficaces pour dissiper les perturbations qui sont de plus en plus gênantes, afin d'améliorer la qualité des services offerts aux voyageurs, en respectant au maximum les horaires théoriques annoncés.

Nous avons d'abord réalisé une étude bibliographique qui nous a permis de faire un tour d'horizon de l'existant concernant l'aide à l'exploitation d'un réseau de transport et de bien préciser le contexte de cette thèse. Ainsi, nous avons abordé les différentes problématiques liées aux réseaux de transport multimodaux, avant d'attaquer les problèmes liés aux processus de planification et de régulation. L'état de l'art réalisé a montré que les problèmes de transport restent toujours difficiles à résoudre, malgré la multitude des améliorations actuelles apportées par l'implantation des systèmes de régulation et de coordination. Nous avons constaté que la majorité des approches de régulation existantes ne traitent pas le cas multimodal des réseaux de transport public, qu'elles limitent le degré d'intervention du régulateur et que les correspondances sont souvent traitées par des approches qui ne tiennent pas compte des autres critères de ponctualité, de régularité, etc.

Ce constat nous a conduits à proposer une résolution pour ce genre de problèmes. Cette résolution est traduite dans un module d'aide à la décision qui a pour objectif d'aider les régulateurs des réseaux de transport à prendre des mesures de régulation adéquates et associées à chaque incident, mais qui effectue aussi les différentes étapes du processus d'aide à la régulation. Le module que nous proposons est constitué de quatre sous-modules, dont chacun réalise une tâche bien précise. Ces sous-modules sont : le sous-module d'évaluation d'impact des perturbations et des actions de régulation sur l'état du trafic, le sous-module de détermination de l'horizon spatio-temporel de régulation, le sous-module de génération de décisions réalisables et celui de construction de celles-ci. Notre première contribution est la nouvelle formulation mathématique, qui introduit deux nouveaux critères de régulation très importants, à la fois pour le client et l'exploitant, à savoir les kilomètres commerciaux et la qualité de service. En outre, nous avons proposé une méthode de détermination de l'horizon spatio-temporel de régulation qui aide les régulateurs à bien définir la zone géographique concernée par une perturbation donnée. D'autre part, nous avons pu intégrer dans notre module d'aide à la régulation le savoir-faire et l'expertise des régulateurs, via une base de règles qui ne prétend pas l'exhaustivité, mais qui est, par contre, bien conçue. Dans ce sens,

nous avons implémenté douze classes de décisions parmi les plus connues et les plus utilisées par les acteurs du domaine de transport collectif. Ces stratégies de régulation, malgré leur réputation, ne sont envisageables par les développeurs de systèmes d'aide à l'exploitation. Et nous tenons à mettre l'accent, sur ce point car nous jugeons que notre apport dessus est significatif.

D'un point de vue algorithmique, nous avons proposé des algorithmes évolutionnaires et qui ont aidé à trouver des solutions plus au moins satisfaisantes, en un temps de calcul très raisonnable. Nous avons aussi proposé un codage et des opérateurs génétiques pour la résolution du problème de régulation. Ces approches ont été utilisées principalement pour la construction des actions de régulation de type « régulation en ligne ». Nous avons ainsi présenté une approche agrégative utilisant une méthode d'évaluation basée sur la théorie des sous-ensembles flous. Cette approche a été par la suite améliorée en introduisant un nouvel opérateur d'agrégation au niveau de la fonction d'évaluation. Ainsi nous avons apprécié l'apport de l'intégrale de Choquet dans l'aide à la régulation du trafic perturbé d'un réseau de transport collectif. Deux autres approches non agrégatives ont été proposées : l'une est une approche du type Pareto dominance classique, mais elle utilise la méthode d'évaluation floue, afin de pouvoir comparer les objectifs un à un en respectant les préférences du régulateur. L'autre approche est l'une des dernières révélations du domaine des algorithmes évolutionnaires, elle utilise le concept de l'épsilon dominance pour contrôler la diversité des solutions proposées au décideur, afin de ne pas proposer deux solutions sauf si elles sont significativement différentes aux yeux de celui-ci.

Afin de valider les approches et méthodes proposées, nous avons réalisé une série de tests qui ont prouvé la qualité de nos approches. Les scénarii que nous avons simulés sont très variés et impliquent un nombre de lignes, de véhicules et de stations variable. Nous avons pu montrer l'efficacité de nos approches et méthodes à travers les quelques scénarii présentés. Ainsi, la méthode de détermination de la zone de régulation que nous avons développée nous a aidés à déterminer d'une manière dynamique l'ensemble des stations et des arrêts sur lesquels on doit agir afin de résorber n'importe quelle perturbation.

Quelques perspectives de recherche sont envisageables, dont la première et la plus importante est la valorisation industrielle de ce travail, qui sera faite par un ingénieur recruté spécialement pour le transfert industriel.

Nous envisageons aussi d'améliorer les approches proposées en testant d'autres algorithmes plus performants hybrides, avec des méthodes exactes par exemple. Cette perspective passera par l'amélioration des opérateurs et stratégies évolutionnaires utilisées. Une piste qui semble

prometteuse sera l'utilisation d'une intégrale de Choquet avec possibilité de générer les mesures floues, sans passer par les indices d'interaction entre les critères. Les résultats que nous avons obtenus nous semblent prometteurs et encourageants pour une application à un plus grand nombre de problèmes. Il serait intéressant d'approfondir notre recherche dans les travaux futurs. Ainsi, il sera très utile d'appliquer les approches proposées à d'autres domaines, tels que l'ordonnancement et le fret.

## Glossaire

AE	: Algorithme Evolutionniste
RTM	: Régie de Transport Marseillais
TM	: Tableau de marche
TMP	: Tableau de marche perturbé
TMR	: Tableau de marche régulé
TMT	: Tableau de marche théorique
$t_{pert}$	: Horaire de détection de l'incident
$H$	: Horizon de la régulation
$S^H$	: Ensemble des stations considérées dans l'horizon $H$
$V^H$	: Ensemble des véhicules considérés dans l'horizon $H$
$S_k^r$	: $k$ -ème station de la ligne $r$
$V_i^l$	: $i$ -ème véhicule de la ligne $l$
$a_{ij}^l$	: Variable de passage associée au véhicule $V_i^l$ et à l'arrêt $S_j^l$
$x_{ijk}^l$	: Variable de destination associée à $V_i^l$ entre $S_j^l$ et $S_k^l$
$ta_{ij}^l$	: Horaire d'arrivée du véhicule $V_i^l$ entre $S_j^l$ et $S_k^l$
$td_{ij}^l$	: Horaire de départ de $V_i^l$ de l'arrêt $S_j^l$
$t_{ijk}^l$	: Durée du trajet direct de $V_i^l$ de la station $S_j^l$ à la station $S_k^l$
$\delta_{ijk}^l$	: Modification du temps de parcours de $V_i^l$ entre $S_j^l$ et $S_k^l$
$\epsilon_{ij}^l$	: Temps supplémentaire de stationnement imposé sur le véhicule $V_i^l$ à l'arrêt $S_j^l$
$ts_{ij}^l$	: Temps d'arrêt de $V_i^l$ à la station $S_j^l$
$t_{mont}$	: Temps moyen que prend une personne pour monter dans le véhicule
$t_{desc}$	: Temps moyen que prend une personne pour descendre d'un véhicule
$N_{mont}_{ij}^l$	: Nombre de personnes qui montent à bord de $V_i^l$ à la station $S_j^l$
$N_{desc}_{ij}^l$	: Nombre de personnes qui descendent de $V_i^l$ à la station $S_j^l$
$Arrêt\_Prec(V_i^l, S_j^l)$	: Dernière station desservie par $V_i^l$ avant $S_j^l$

$Veh^+(V_i^l, S_j^l, S_k^l)$	: Premier véhicule qui succède $V_i^l$ à $S_j^l$ et qui passe également par $S_k^l$ après $S_j^l$
$\mu(\Delta t_l, S_j^l, S_k^l)$	: Taux constant d'arrivée pendant $\Delta t_l$ à la station $S_j^l$ et en destination de $S_k^l$
$N_{ijk}^l$	: Nombre de personnes qui montent à bord de $V_i^{l'}$ à $S_j^l$ et qui ont $S_k^l$ pour destination
$AT$	: Attente totale des passagers aux arrêts dans l'horizon de la régulation
$y_{ii'}^{ll'}$	: Variable de correspondance de $V_i^l$ à $V_{i'}^{l'}$ à la station $S_j^l$
$\omega_{ii'}^{ll'}$	: Nombre de personnes en transfert de $V_i^l$ à $V_{i'}^{l'}$ à la station $S_j^l$
$\rho_{ii'}^{ll'}$	: Taux de correspondance de $V_i^l$ à $V_{i'}^{l'}$ à l'arrêt $S_j^l$
$TT$	: Durée totale des transferts dans l'horizon de la régulation
$C_{ij}^l$	: Charge de $V_i^l$ au départ de $S_j^l$
$RT$	: Durée totale des routes dans l'horizon de la régulation
$N$	: Ensemble de critères
$n$	: Cardinal de $N$
$P(N)$	: Ensemble des sous-ensembles de $N$
$\mu$	: Mesure floue
$m(A)$	: Transformée de Möbius
$A \subset N$	: Sous-ensemble de $N$
$a_1, \dots, a_n$	: Scores d'une solution suivant tous les critères
$I_{ij}$	: Indice d'interaction entre deux critères
$I_i$	: Indice de Shapley

## Références Bibliographiques

- [Abbas-Turki 02] A. Abbas-Turki, O. Grunder, R. Bouykhék 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.
- [Achiche 00] S. Achiche, “Génération par algorithme génétique de bases de connaissances pour un système d’aide à la décision”, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Intergrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Montréal, Mai 2000.
- [Afanassieva 96] L.G. Afanassieva, G. Fayolle et S.Y. Popov, “Models for Transportation Networks”, Projet MEVAL, Rapport de recherche INRIA no.2834, mars 1996.
- [Aloulou 02] M.A. Aloulou, “Structure flexible d’ordonnements à performances contrôlées pour le pilotage d’atelier en présence de perturbations”, Thèse en Informatique de l’Institut National Polytechnique de Lorraine. Soutenue le 16 décembre 2002.
- [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 de l’Université des Sciences et Technologies de Lille, 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, soutenue à Paris IX Dauphine, en janvier 2000.
- [Barichard 03] V. Barichard, “Approches hybrides pour les problèmes multi-objectifs”, Thèse de doctorat en Informatique de l’Université d’Angers, soutenue le 24 Novembre 2003.

- [Barla 00] P. Barla, C. Constantatos, "Airline network structure under demand uncertainty", *Journal of Transportation Research, Part E* 36, pp. 173-180, 2000.
- [Baron 01] L. Baron, "Fuzzy decision support system knowledge base generation using a genetic algorithm", *International Journal of Approximate Reasoning*, pages 126-148, Mars 2001.
- [Basseur 05] M. Basseur, "Conception d'algorithmes coopératifs pour l'optimisation multi-objectif : Application aux problèmes d'ordonnancement de type Flow-shop", Thèse de doctorat en Informatique de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, soutenue le 21 juin 2005.
- [Benkhaled 05] I. Benkhaled, M.A. Kamoun, K. Zidi, S. Hammadi, "Vers un système d'information voyageur multimodal (SIM) à base de système multi-agents (SMA)". *REE* N° 1 Janvier 2005, pp: 41-47.
- [Bielli 02] M. Bielli, M. Caramia, P. Carotenuto. "Genetic algorithms in bus network optimization". *Transportation Research Part C: Emerging technologies*, Volume 10, Issue 1, February 2002, pages 19-34.
- [Bomarius 92] F.A. Bomarius. "Multiagent approach towards modelling urban traffic scenarios", Tech. Rep. RR-92-47, DFKI-GmbH, Germany, 1992.
- [Borne 03] P. Borne, B. Fayech, S. Hammadi and S. Maouche, "Decision Support System for Urban transportation networks", *IEEE SMC Part C: Applications and Reviews*, Special Issue on Decision Technologies in honour of Prof Madan Singh, Vol.33, No.1, pp.67-77, February 2003.
- [Bouchon 95] B. Bouchon-Meunier, "La logique floue et ses applications", Addison-Wesley, octobre 1995.
- [Bounsaythip 98] C.K. Bounsaythip, "Algorithmes heuristiques et évolutionnistes : application à la résolution du problème de placement de formes irrégulières", Thèse de doctorat en Productique, Université des Sciences et Technologies de Lille, 9 octobre 1998.
- [Brézillon 00] P. Brézillon, "SART : An intelligent assistant system for subway control", *Pesquisa Operacional*, pages 247-268, Décembre 2000.
- [Carlier 88] J. Carlier et P. Chrétienne, "Problèmes d'ordonnancement : Modélisation, complexité et algorithmes", *Etudes et Recherches en Informatique*, Editions Masson, Paris, 1988.

- [Castelain 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.
- [Chakroborty 95] P. Chakroborty, K. Deb and P.S. Subrahmanyam, "Optimal scheduling of urban transit systems using genetic algorithms", Journal of Transportation Engineering, Novembre-Décembre 1995.
- [Champion 01] A. Champion, R. Mandiau, S. Espié, C. Kolski, "Multi-agent road traffic simulation: Towards coordination by game theory based mechanisms". Proceedings of the Agents in Traffic and Transportation, Workshop in conjunction with the ITS World Congress 2001, Sydney, Australia, October 2001.
- [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, N° d'ordre 3231, soutenue le 18 décembre 2002.
- [Ciesielski 98] V. Ciesielski and P. Scerri, "Real time genetic scheduling of aircraft landing times", IEEE International Conference on Evolutionary Computation, ICEC98, in D.Fogel (Editor), pp.360-364, Anchorage, May 1998.
- [Collette 02] Yann Collette et P. Siarry, "Optimisation multiobjectif", éditions Eyrolles, septembre 2002.
- [Cure 84] C. Cure et B. Foraste, "Systèmes d'aide à l'exploitation et algorithmes de régulation", Revue Recherche Transport Sécurité, pp.14-22, juillet 1984.
- [Daduna 88] J.R. Daduna and M. Mojsilovic, "Computer-aided vehicle and duty scheduling using HOT programme system", in J.R. Daduna and A. Wren (eds), Computer-Aided Transit Scheduling, Springer-Verlag, Berlin, 133-146, 1988.
- [Danflous 01] D. Danflous, "Déploiement national des systèmes d'information multimodale, GOFAS: l'exemple suisse", Rapport d'étude, CERTU/CETE Méditerranée (Centre des Etudes Techniques et de l'Équipement), Octobre 2001.

- [Davis 91] L. Davis, "The genetic algorithm Handbook", Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
- [Deb 01] K. Deb. "Nonlinear goal programming using multi-objective genetic algorithms". Journal of the Operational Research Society, 52(3), 291-302, 2001.
- [Deb 02] K. Deb & al. "A fast elitist multi-objective genetic algorithm : NSGA II". IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2), pages 182-197, 2002.
- [Deb 03] K. Deb, Mohan, M. and S. Mishra, "A Fast Multi-objective Evolutionary Algorithm for Finding Well-Spread Pareto-Optimal Solutions". KanGAL Report No. 2003002. February, 2003.
- [Deb 98] K. Deb and P. Chakroborty, "Time scheduling of transit systems with transfer considerations using genetic algorithms", Evolutionary Computation 6(1), pages 1-24, 1998.
- [Delahaye 96] D. Delahaye, N. Durand, J.M. Alliot and M. Schoenauer, "Genetic algorithms for air traffic control systems", ENAC, INFAUTOM'96, Toulouse, France, 14-15 mars 1996.
- [Dréo 03] J. Dréo, A. Pétrowski, P. Siarry, E. Taillard, "Métaheuristiques pour l'optimisation difficile". Éditions Eyrolles ISBN: 2-212-11368-4. 2003
- [Dridi 04] M. Dridi. "Contribution à la résolution des problèmes de régulation dans les systèmes de transport dans un contexte multicritère par approche évolutionniste", Thèse de doctorat en Automatique et Informatique Industrielle de L'Université des Sciences et Technologies de Lille et de l'Ecole Centrale de Lille, Soutenue le 06 décembre 2004.
- [El-Hmam 05] M.S. EL Hmam, D. Jolly, H. Abouaissa, A. Benasser, "Modélisation hybride du flux de trafic" MHOSI'05, Hammamet, Tunisie, 24-26 Avril 2005.
- [Fan 04] W. Fan and R. B. Machemehl, "A tabu search based heuristic method for the transit route network design problem", Proceedings of the International Conference on Computer Aided Scheduling of Public Transportation, San Diego, California, August 9-11, 2004.

- [Fayech 02] B. Fayech, S. Hammadi, S. Maouche et P. Borne, “Approche Coopérative pour la Régulation d’un Réseau de Transport Multimodal”, Actes CIFA’02, pages 177-182, Nantes, France, 8-10 juillet 2002.
- [Fayech 03] B. Fayech. “Régulation des réseaux de transport multimodal : systèmes multi-agents et algorithmes évolutionnistes”, Thèse de doctorat en Automatique et Informatique Industrielle, Université des Sciences et Technologies de Lille, N° d’ordre 3349, 14 octobre 2003.
- [Fogel 94] L.J. Fogel, “Evolutionary programming in perspective: the top-down view”, Computational Intelligence, Imitating Life, Zurada & al editors, IEEE Press, pp.135-146, June 1994.
- [Fukuyama 96] Y. Fukuyama and H.D. Chiang, “A parallel genetic algorithm for generation expansion planning”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.11, No.2, 1996.
- [Gandibleux 95] X. Gandibleux. “Système d’aide à décision pour la conduite de processus perturbés ; une approche hybride fondée sur l’intelligence artificielle, la programmation linéaire et l’aide multicritère à la décision”, Thèse de doctorat de l’Université de Valenciennes, France, 1995.
- [Ghaffari 99] A. Ghaffari, “Modélisation d’une ligne de métro en tenant compte du flux des passagers”, Rapport de DEA en Informatique Industrielle à l’Université des Sciences et Technologies de Lille, juin 1999.
- [Glover 86] F. Glover, “Future paths for integer programming and links to artificial intelligence”, Computers and Operations Research 5: 533-549, 1986.
- [Goldberg 85] D.E. Goldberg, R.Lingel, “Alleles, loci and travelling salesman problem”, Proceedings of First International Conference on Genetic Algorithms, pp.154-159, 1985.
- [Goldberg 98] D.E. Goldberg, “Genetic algorithms in search, optimisation and machine learning”, Addison-Wesley, 1989.
- [Grabish 03] M. Grabisch and P. Perny. Agrégation multicritère. In Logique floue, principes, aide à la décision, B. Bouchon-Meunier, C. Marsala (eds), Hermès, 2003, 81-120
- [Grabish 96] M. Grabisch. “The application of fuzzy integrals in multicriteria decision making”, European J. of Operational Research (89), pages 445-456, 1996.

- [Grabish 97a] M. Grabisch, "Fuzzy measures and integrals: a survey of applications and recent issues". In *Fuzzy Sets Methods in Information Engineering: A Guided Tour of Applications*, D. Dubois, H. Prade and R. Yager (eds), J. Wiley & Sons, pages 507-530, 1997.
- [Grabish 97b] M. Grabisch. "k-order additive discrete fuzzy measures and their representation". *Fuzzy Sets & Systems* (92) pages 167-189, 1997.
- [Grabish 98] M. Grabisch, S.A. Orlovski and R.R. Yager, "Fuzzy aggregation of numerical preferences". In *The Handbook of Fuzzy Sets Series, Vol. 4: Fuzzy Sets in Decision Analysis, Operations Research and Statistics*, R. Slowinski (ed), Kluwer Academic, 1998, 31-68
- [Green 97] S. Green, L. Hurst, B. Nangle, P. Cunningham, F. Somers, R. Evans, "Software agents: A review", TCS-CS-1997-06, Trinity College Dublin, Broadcom Eireann Research Ltd., 27 may 1997.
- [Gruer 01] P. Gruer, V. Hilaire and A. Koukam, "Multi-Agent Approach to Modelling and Simulation of Urban Transportation Systems", Proceedings of the 2001 IEEE SMC Conference, 6-10 October 2001, Tucson, Arizona, USA, pp.2499-2504.
- [Hall 01] R. Hall, D. Doussouky, Q. Lu, "Optimal holding times at transfer stations", *Computers & Industrial Engineering*, volume 40, issue 4, pp 379-397, septembre 2001.
- [Hansen 04] J.V. Hansen, "Genetic search methods in air traffic control", *Computers & Operations Research* 31(3), pages 445-459, March 2004.
- [Hansen 86] P. Hansen, "The steepest ascent mildest descent heuristic for combinatorial programming", In *Numerical Methodes in Combinatorial Optimization*, Capri, Italy, 1986.
- [Hartani 95] R. HARTANI, "Modélisation des systèmes fous : Contributions théoriques et applications", thèse de doctorat, Université de Paris 6, 1995.
- [Hayat 05] Saïd HAYAT, "Amélioration de la qualité des correspondances da les réseaux de transports urbains ", rapport interne INRETS, juillet 2005.
- [Hayat 93] Saïd HAYAT, " Modélisation de la régulation de trafic des lignes de métro basée les approches neurofloues ", rapport interne INRETS, juin 1993.

- [Hayat 97] S. Hayat et S. Maouche, “Régulation du trafic des autobus, Amélioration de la qualité des correspondances”, Rapport intermédiaire, Convention ESTAS-I3D, Octobre 1997.
- [Holland 75] J. Holland, “Adaptation in natural and artificial systems”, Second Edition, MIT Press, 1992.
- [Huissman 01] D. Huisman, R. Freling, A.P.M. Wagelmans, “A Dynamic Approach to Vehicle Scheduling”, Econometric Institute, Erasmus University Rotterdam, Netherlands, Report EI2001-17 (accepted for Transportation Science (focussed issue on Real-time Fleet Management) on August 22, 2002 with a new title "A Robust Solution Approach to the Dynamic Vehicle Scheduling Problem").
- [Issai 00] M.T. Isaai, M.G. Singh, Fellow, IEEE, “An object-oriented, Constraint-based Heuristic for a class of passenger-train scheduling problems”, IEEE Transactions on SMC, part C, Applications and Reviews, vol.30, NO.1, February 2000.
- [Issai 01] M. T. Isaai and N. P. Cassaigne, “Predictive and Reactive Approaches to the train-scheduling problem: A knowledge management perspective”, IEEE Transactions on SMC, part C, Applications and Reviews, vol.31, NO.4, pp. 476-484, November 2001.
- [Jennings 98] N.R. Jennings, K. Sycara, M.J. Wooldridge, “A Roadmap of agent research and development”, Autonomous Agents and Multi-Agents Systems, I, pp.275-306, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998.
- [Kacem 02] I. Kacem, S. Hammadi and P. Borne, “Pareto-Optimality approach for Flexible Job-Shop Scheduling Problems: Hybridization of Genetic Algorithms with Fuzzy Logic”, Journal of Mathematics and Computer in Simulation, Elsevier Science, pages: 245-276, 2002.
- [Kacem 03] I. kacem, “Ordonnancement multicritère des job-shops flexibles : formulation, bornes inférieures et approche évolutionniste coopérative”, Thèse de doctorat de l’université de Lille 1, soutenue le 6 janvier 2003.
- [Keeney 93] R.L. Keeney, H. Raiffa. “Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoff”, Editions Cambridge University Press, 1993.
- [Kelman 96] A. Kalman, “Modèles flous pour l’agrégation de données et l’aide à la décision ”, Thèse de doctorat de l’Université Paris 6, 1996.

- [Kidwai 05] F.A. Kidwai, B.R. Marwah, K. Deb, M.R. Karim. “A genetic algorithms based bus scheduling model for transit network”, Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol 5, pages: 477-489, 2005.
- [Kirkpatrick 83] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, M.P. Vecchi. “Optimization by simulated annealing”, Science, (220), pages: 671-680, 1983.
- [Kwan 97] A.S.K. Kwan, R.S.K. Kwan, A. Wren. “Driver scheduling using genetic algorithms with embedded combinatorial traits”, In preprints of the International Workshop on Computer Aided Scheduling of Public Transportation, Boston, USA, 1997.
- [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, N° d’ordre 3239, soutenue le 20 décembre 2002.
- [Lebars 03] M. Lebars, “Un système multi-agents pour l’aide à la décision d’un collectif: application à la gestion d’une ressource agro-environnementale”, Thèse de doctorat de l’Université Paris Dauphine, 2003.
- [Lebesque 02] J.P. Lebesque, “Modélisation des réseaux multimodaux”, Groupe de travail multimodalité, INRETS Paris, 07 février 2002.
- [Li 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.
- [Ljunberg 92] M. Ljunberg, A. Lucas. “The oasis air-traffic management system”. In proceedings of the Second Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence, PRICAI 92, Seoul, Korea, 1992.
- [Lourenço 01] H.R. Lourenço J. Paixão, R. Portugal. “Multiobjective Metaheuristics for the Bus-driver scheduling problem”. Transportation Science, 35(3), pages: 331-343, August 2001.
- [Mesghouni 02] K. Mesghouni, E. Castelain. “Regulation of a public transport network with consideration of the passenger flow: modelling of the system with

- high-level Petri nets”, IEEE SMC, Hammamet, Tunisia, 6-9 October 2002.
- [Mesghouni 98] K. Mesghouni, S. Hayat, S. Hammadi, P. Borne. “Modelling of the traffic regulation for a subway line with double loops”. Proceedings of the IEEE SMC Conference, volume 4, pages 3261-3265, San Diego USA. October, 11-14 98.
- [Mesghouni 99] K. Mesghouni, “Application des algorithmes évolutionnistes dans les problèmes d’optimisation en ordonnancement de la production”, Thèse de doctorat en Automatique et Informatique Industrielle, Université des Sciences et Technologies de Lille, soutenue le 5 janvier 1999.
- [Meskine 01] A. Meskine et P. Gendre, “Algorithmes et calculs d’optimisation d’itinéraires pour l’information multimodale”, Rapport d’étude, CERTU/EMSE (Ecole des Mines de Saint-Étienne et Centre d’Etudes sur les Réseaux, les Transports, l’Urbanisme et les Constructions Urbaines), Novembre 2001.
- [Michalewicz 94] Z. Michalewicz, “Genetic algorithms + Data structures = Evolution programs”, second extended Edition, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 1994.
- [Mohan 98] S.B. Mohan, V.M. Tom. “Urban bus transit route network design using genetic algorithm”, Journal of Transportation Engineering, ASCE, 124(4), pages: 368-375.
- [Moussou 93] V. Moussou, “Problèmes liés à l’évaluation de l’importance relative des critères en aide à la décision. Réflexions théoriques, expérimentations et implémentation informatique”, Thèse de doctorat de l’Université de Paris Dauphine, 1993.
- [Nachtigall 97] K. Nachtigall, S. Voget. “Minimising waiting times in integrated fixed interval timetables by upgrading railway tracks”. European Journal of Operational Research, 103 : 610-627, 1997.
- [Nait-Sidi 02] M. Nait Sidi, 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, ISIA028, WAC 2002, Orlando, Florida, USA, June 9-13, 2002.
- [Ngamchai 00] S. Ngamchai and D.J. Lovell, “Optimal time transfer in bus transit route network design using genetic algorithms”, 8<sup>th</sup> international Conference

- CASPT, Computer Aided Scheduling of Public Transportation, Berlin, Germany, 21-23 June 2000.
- [Ouldsidi 03] MM. Ould Sidi, “Contribution à l’amélioration des systèmes d’inférences floues appliqués aux réseaux de transport collectif”, rapport de DEA Automatique et Informatique Industrielle de Lille 1, Juillet 2003.
- [Ouldsidi 04a] MM. Ould Sidi, S. Hammadi, S. Hayat & P. Borne. “Towards an interactive and effective regulation for the urban transport networks”. IEEE/SMC 04, October 10-13, 2004, The Hague Netherlands.
- [Ouldsidi 04b] MM. Ould Sidi, S. Hammadi, S. Hayat, P. Borne; “Approche floue d’un système d’évaluation des stratégies de régulation d’un réseau de transport perturbé”, Journées francophones de la Logique Floue et ses Applications LFA’04, 17-18 Novembre 2004, Nantes, France.
- [Ouldsidi 05a] MM. Ould Sidi, S. Hammadi, S. Hayat & P. Borne. “Urban transport disrupted networks regulation strategies making and evaluation: A new approach”. Proceedings of IESM’05. Marrakech, Morocco May 16-19, 2005.
- [Ouldsidi 06] MM. Ould Sidi, S. Hayat, S. Hammadi, P. Borne “Urban transport networks regulation and evaluation: A fuzzy evolutionary approach”: IEEE Transaction on Systems Mans and Cybernetics SMC Part A, article accepté.
- [Park 05] S.J. Park, “Bus network scheduling with genetic algorithms and simulation”, Master of Science Thesis of Maryland University, college Park, 2005.
- [Pasquier 02] Laurent Pasquier, “Modélisation du raisonnement en contexte : Application à la gestion d’incidents sur une ligne de métro” thèse de doctorat de l’Université Pierre et Marie Curie, juillet 2002.
- [Perny 92] P. Perny, “Modélisation, agrégation et exploitation de préférences floues dans une problématique de rangement”, Thèse de l’Université Paris Dauphine, 1992.
- [Renders 95] J.M. Renders, “Algorithmes génétiques et réseaux de neurones”, Hermès, Paris, 1995.

- [Riz 88] M. Rizzi, “La régulation des autobus en ligne, approche théorique et algorithmes”, RATP, direction du réseau routier, TEC N°89, juillet-août 1988.
- [Rousseau 85] J.M. Rousseau and J.Y. Blais, “HASTUS: An interactive systems for buses ans crew scheduling”, Computer Scheduling of Public Transport-2, J.M.Rousseau ed., pp.45-60, Amsterdam, North Holland, 1985.
- [Roy 89] B. Roy, “Decision-Aid and Decision-Making”, document du Lamsade N° 51, Université de Paris-Dauphine, 1989.
- [Roy et al. 93] B. Roy et D. Bouyssou, “Aide multicritère à la décision : Méthodes et cas”, Editions Economica, 1993.
- [Salim 97] V. Salim and X. Cai, “A genetic algorithm for railway scheduling with environmental considerations”, Environmental Modelling and Software, Vol.12, No.4, pp.301-309, 1997.
- [Saussol 00] B. Saussol, S. Maouche, S. Hayat, A. Dekokere, A. Dumont, “Elaboration et mise au point d’un système d’aide à la décision pour la gestion du réseau de transport collectif de Montbéliard”, Rapport d’étape INRETS-I3D-LAIL, Appui à la modélisation du système multi-agents, juin 2000.
- [Schwefel 97] H.P. Schwefel and T .Bäck, “Artificial Intelligence: How and why?”, Genetic Algorithms and evolution strategies in engineering and computer science, Edited by D. Quagliarella & al, J. Wiley Editions, 1997.
- [Shim 02] J. P. Shim, M. Warkentin, J. F. Courtney, D. J. Power, R. Sharda and C. Carlsson, “Past, present, and future of decision support technology”, Journal of Decision Support Systems, Volume 33, Issue 2, pp. 111-126, June 2002.
- [Smith 88] B.M. Smith and A Wren, “A bus driver scheduling system using a set covering formulation”, Transportation Science, 22A: 97-108, 1988.
- [Sommerlatt 02] I. Sommerlatt, “Incitation et contrôle en univers multi-institutionnel : Nature et rôle d’outils d’aide à la décision. Application à l’amélioration de la qualité de service dans les transports urbains” Thèse de doctorat de l’Université Paris-Dauphin, juillet 2002.
- [Soulhi 00] A. Soulhi, “Contribution de l’intelligence artificielle à l’aide à la décision dans la gestion des systèmes de transport urbain collectif”,

Thèse de doctorat à l'Université des Sciences et Technologies de Lille,  
18 janvier 2000.

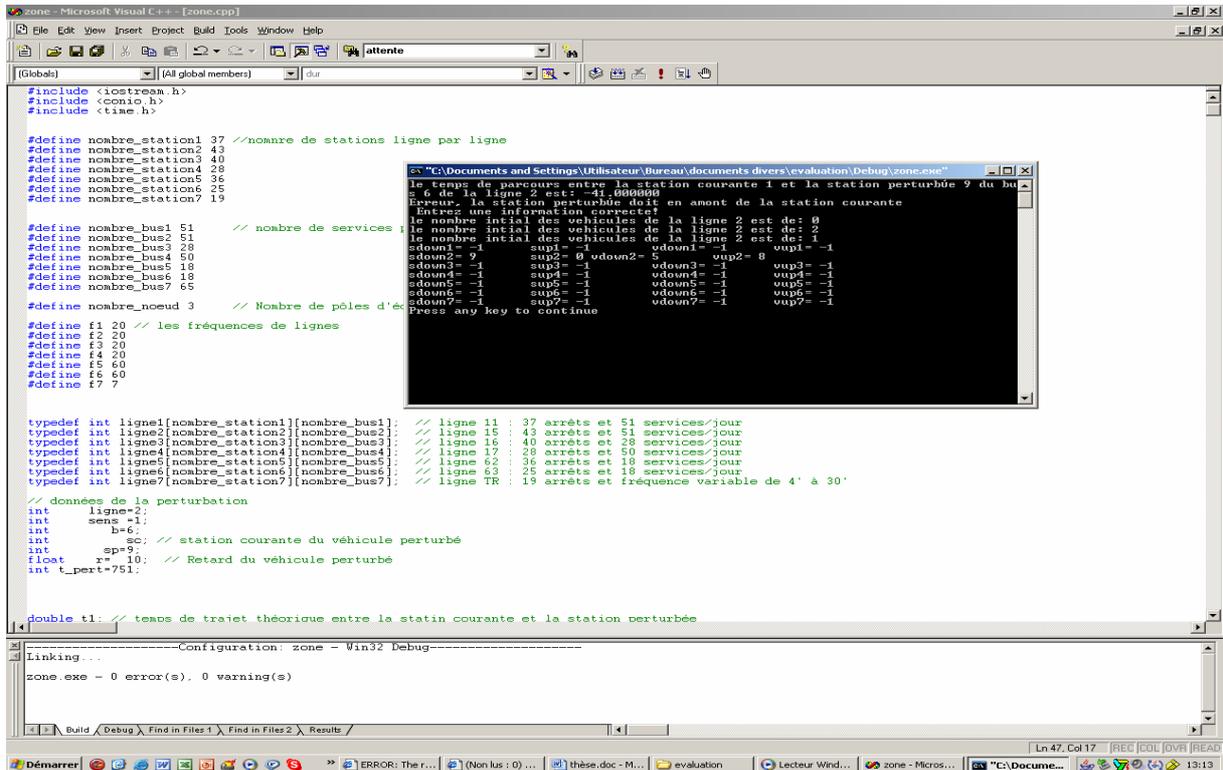
- [Stevens 95] G. Stevens, "An approach to scheduling aircraft landing times using genetic algorithms", Honours thesis, RMIT, Department of Computer Science, November 1995.
- [Sycara 98] K.P. Sycara, "Multi-agent Systems", American Association for Artificial Intelligence, AI Magazine, pp.79-92, Eté 1998.
- [Takanori 03] K. Takanori & al. "Unsatisfying functions and multiobjective fuzzy design using genetic algorithms". IEEE-SMC part B, 33(6) :889-897, December 2003
- [Tan 01] K.C. Tan, L.H. Lee, K.Q. Zh and K. Ou, "Heuristic methods for vehicle routing problem with time windows", Artificial Intelligence in Engineering, 15, pp.281-295, Elsevier, 2001.
- [Trabllsi 04] A. Trabelsi, H. Ezzedine, C. Kolski, "Architecture modeling and evaluation of agent-based interactive systems", IEEE/SMC 2004, The Hague-Netherlands, October-10-13, 2004.
- [Valouxix 01] C. Valouxix and E. Housous, "Combined bus and driver scheduling", Computers and Operations Research 29, pp.243-259, 2002.
- [Wren 00] A. Wren, R.S.K. Kwan and A.S.K. Kwan, "Hybrid genetic algorithm for scheduling bus and train drivers", Report 2000.05, School of Computer Studies, University of Leeds, UK, February 2000.
- [Wren 98] A. Wren, "Heuristics ancient and modern: transport scheduling through the ages", Journal of Heuristics, 4, pp.87-100, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [Wynter 03] L. Wynter et P. Lolito, "Boîte à outils affectation du trafic de Scilab : étude sur l'analyse de transport en région périurbaine", 10<sup>ème</sup> rencontre INRIA-Industrie, Applications de l'Informatique et de l'Automatique aux Transports, Paris-Rocquencourt, 16 janvier 2003.
- [Xiong 92] Y. Xiong, J.B. Schneider, "Transportation network design using a cumulative genetic algorithm and neural network", Transportation Research Record-1364, Transportation Research Board, Washington D. C, 37-44.

- [Yan 97] S. Yan and Y.P. Tu “Multifleet routing and multistop flight scheduling for schedule perturbation”, European Journal of Operational Research, Vol.103, Issue 1, pp.155-169, November 1997.
- [Yu 05] B. Yu, Z. Yan, C. Liu, C. Cheng “Optimization of bus transit network with parallelant colony algorithm”, Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol 5, pp 374-389, 2005.
- [Zeghal 01] F. Zeghal, M. Minoux, “Modélisation et résolution d’un problème d’affectation d’équipages en transport aérien”, Actes de la 3<sup>ème</sup> Conférence francophone de MODélisation et de SIMulation MOSIM’01, Troyes, France, 25-27 avril 2001.
- [Zidi 04] K. ZIDI, S. HAMMADI et P. BORNE, “ Méthode évolutionniste pour l’aide au déplacement dans le transport multimodal perturbé”, proceedings de MOSIM’04, Nantes, 1-3 septembre 2004.
- [Zidi 05] K. ZIDI et S. HAMMADI, “DMAS: Distributed Multi-Agents System for assist users in the multimodal travels”, In Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Systems Management IESM 05 Marrakech, May 16 – 19, 2005.

# Annexe : Illustrations des différentes tâches réalisées par le module d'aide à la décision

## Exemple1:

### Zone de régulation :



## Evaluation de l'impact de l'incident sur l'état du trafic :

```
ligne7 TH7_per2:
// THs régules de toutes les lignes dans les deux sens
ligne1 TM1_reg2:
ligne2 TM2_reg2:
ligne3 TM3_reg2:
ligne4 TM4_reg2:
ligne5 TM5_reg2:
ligne6 TM6_reg2:
ligne7 TM7_reg2:
// charges théoriques de toutes
ligne1 ch1_th1:
ligne1 ch1_th2:
ligne2 ch2_th1:
ligne2 ch2_th2:
ligne3 ch3_th1:
ligne3 ch3_th2:
ligne4 ch4_th1:
ligne4 ch4_th2:
ligne5 ch5_th1:
ligne5 ch5_th2:
ligne6 ch6_th1:
ligne6 ch6_th2:
ligne7 ch7_th1:
ligne7 ch7_th2:
// charges perturbées sur toutes les lignes dans les deux sens
ligne1 ch1_per1:
ligne1 ch1_per2:
ligne2 ch2_per1:
ligne2 ch2_per2:
ligne3 ch3_per1:
ligne3 ch3_per2:
ligne4 ch4_per1:
ligne4 ch4_per2:
ligne5 ch5_per1:
ligne5 ch5_per2:
ligne6 ch6_per1:
ligne6 ch6_per2:
ligne7 ch7_per1:
ligne7 ch7_per2:
// Charges régulées sur toutes les lignes et dans les deux sens
ligne1 ch1_reg1:
ligne1 ch1_reg2:
ligne2 ch2_reg1:
ligne2 ch2_reg2:

```

```
Configuration: eval_impact - Win32 Debug
eval_impact.exe - 0 error(s), 0 warning(s)
```

## Génération des décisions réalisables :

```
#include<conio.h>
#include<time.h>
//----- les conditions et les variables ----->
//----- fréquences de la ligne ----->
int f;
int ligne = 2;
int sens = 1;
int b = 6;
int sp = 7;
int r = 10;
int t_pert = 751;
float retard=10;
int heure;
int blocage=0;
int sens_charge=1;
int interval_courant=10;
int climat=1;
//float trajet [7];
//int report_ch;
int duree=4;
int reserve =0, disponib
int cas=1;
int battement=8;
int charge=28;
int report= 20;
int cmax =212;
int nombre_station =19;
int sc =4;
int hph1.del, dtel, dtec
int heure_journee (int t_pert)
{
if(((t_pert)>=700)&&(t_pert<=830))||((1130<=t_pert)&&(t_pert<=1300))||((1730<=t_pert)&&(t_pert<=1830)))
heure =1;
// heure de ponite

```

```
Configuration: basederegles - Win32 Debug
Compiling...
basederegles.cpp
Linking...
basederegles.exe - 0 error(s), 0 warning(s)
```