

# SYSTEME D'AIDE A LA REGULATION ET EVALUATION DES TRANSPORTS MULTIMODAUX INTEGRANT LES CYBERCARS

Asma Melki

## ► To cite this version:

Asma Melki. SYSTEME D'AIDE A LA REGULATION ET EVALUATION DES TRANSPORTS MULTIMODAUX INTEGRANT LES CYBERCARS. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole Centrale de Lille, 2008. Français. tel-00384527v1

**HAL Id: tel-00384527**

**<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00384527v1>**

Submitted on 15 May 2009 (v1), last revised 15 May 2009 (v2)

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

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

N d'ordre: 85

**Ecole Centrale de Lille**

**THESE**

présentée pour obtenir le grade de

**DOCTEUR**

**en Automatique et Informatique Industrielle**

par:

Asma MELKI

Doctorat délivré par l'Ecole Centrale de Lille

**SYSTEME D'AIDE A LA REGULATION ET EVALUATION DES  
TRANSPORTS MULTIMODAUX INTEGRANT LES CYBERCARS**

Soutenu publiquement le 28 Novembre 2008, devant le jury d'examen:

Président:	P. Vanheeghe	Professeur, Ecole centrale de Lille
Rapporteur:	B. Descotes-Genon	Professeur, Université Joseph Fourier, Grenoble
Rapporteur:	J. Marchal	Professeur, Université de Liège
Examineur:	A. Artiba	Professeur, Supmeca Paris
Directeur:	S. Hammadi	Professeur, Ecole Centrale de Lille
Co-directeur:	C. Tahon	Professeur, Université de Valenciennes

## RÉSUMÉ

Un nouveau concept de mobilité urbaine est apparu : Les Cybercars : Des véhicules routiers autonomes économiques et propres et qui viennent en complément des transports publics. Cette thèse a pour cadre le plan plur-formation " cœur de Ville ". Ce PPF a pour objectif de traiter les problématiques relatives à la mise en place des Cybercars dans un contexte urbain. L'objectif de notre travail de recherche est de fournir un outil d'aide à la décision aux régulateurs de transport multimodal. Il s'agit de les aider dans le choix de la stratégie d'exploitation à adopter, en mode dégradé, en présence de perturbations simultanées dans le réseau. Ce système d'aide à la décision est basé sur une phase de construction des décision qu'il serait possible d'appliquer, suivie d'une phase d'évaluation multicritère des différentes stratégies candidates au moyen de l'Intégrale de Choquet. Cette phase permet d'affiner le choix proposé au régulateur vu que l'évaluation tient compte des interactions entre les critères et donne au régulateur une image ciblée des repercussions de chaque stratégie sur le réseau de transport .L'originalité de nos travaux réside dans le fait d'intégrer l'utilisation des Cybercars comme stratégie d'exploitation qui s'ajoute à celles des modes de transports multimodaux. L'aspect temps-réel et la complexité du problème de régulation nous ont guidés dans le choix des algorithmes évolutionnaires à adopter pour la mise en place de certaines stratégies d'exploitation. Les résultats de simulations ont permis d'appuyer l'idée d'utiliser les Cybercars dans les milieux urbain, non seulement pour les déplacements planifiés mais également pour résorber les perturbations qui affectent le réseau.

**Mots clés Cybercars, Système de Transport Multimodal, Intégrale de Choquet, Evaluation multicritère, Algorithmes évolutionnaires, régulation de transport, Système de Transport Intelligent.**

## ABSTRACT

A new concept of urban mobility was born during the last decade resulting from an international consortium with an aim of finding an alternative to the private cars for urban displacements. It is a question of Cybercars which are road vehicles with fully automated driving capabilities, used as a complement to mass transit. The framework of this thesis is the plan pluri-formation PPF: "cœur de ville". This PPF aims to treat the several problems relating to the development of Cybercars in an urban context. The objective of our research task is to provide a decision support system (DSS) to the regulators of multimodal transportation. It consists of helping them in the choice of the strategy of exploitation to adopt, in degraded mode, with the presence of simultaneous disturbances in the transportation network. This DSS is based on a phase of construction of the decisions which it would be possible to apply, followed by a phase of multicriteria evaluation of the various strategies by means of the Integral of Choquet, this phase will refine the choice suggested to the regulator considering the interactions between the criteria and gives them a targeted interpretation of data. The originality of our work resides in integrating the Cybercars as strategy of exploitation which is added to those related to other modes. The real-time aspect and the complexity of the regulation problem justify the choice of evolutionary algorithms to be adopted to realize some operation strategies under a significant number of disturbances. The several experimental scenarios proved the idea to use Cybercars, not only for urban displacements but also to face disturbances of multimodal network system.

**Keywords:** Cybercars, Multimodal transportation System, Choquet Integral, Multicriteria Evaluation evolutionary algorithms, transportation regulation, Intelligent Transportation System. Intelligent.

*A mes chers parents  
A ma sœur Nahed et sa famille,  
A mon frère Badi,  
A Wassim,  
Pour leur amour, leur soutien et leur présence.*

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en particulier le Professeur Slim HAMMADI, mon directeur de thèse, Professeur à l'Ecole Centrale de Lille, de m'avoir encadrée, soutenue durant les trois années de cette thèse, de m'avoir assuré un cadre de travail serein, de m'avoir ouvert la voie pour la recherche scientifique.

Mes plus sincères remerciements s'adressent également au Professeur Christian TAHON, le co-directeur de ma thèse, Professeur à l'Université de Valenciennes, du Hainaut Cambrésis, de m'avoir co-encadrée, pour sa rigueur scientifique et de m'avoir accueillie au sein du laboratoire LAMIH.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude au Professeur Pierre Borne, Professeur à l'Ecole Centrale de Lille et directeur de l'équipe ID du LAGIS, pour m'avoir accueillie au sein de son équipe de recherche.

Que Professeur Philippe Vanheeghe, Professeur à l'Ecole Centrale de Lille et Directeur de l'équipe LAGIS, reçoive mes plus sincères remerciements pour l'honneur qu'il m'a fait d'avoir accepté de présider le jury de soutenance de cette thèse.

Je souhaite adresser un grand MERCI au Professeur Bernard DESCOTES-GENON, Professeur à l'Université Joseph Fourier de Grenoble et au Professeur Jean MARCHAL, Professeur à l'Université de Liège et directeur du groupe de recherche Transport et logistique (GTU), qui m'ont fait le grand honneur d'accepter de rapporter cette thèse.

Je remercie particulièrement Professeur Abdelhakim ARTIBA, Professeur à SUPMECA de Paris pour avoir accepté d'être l'examineur de cette thèse.

Je ne pourrais oublier de remercier le personnel de l'équipe LAGIS et de l'Ecole Centrale pour leur amabilité et disponibilité.

J'adresse mes vifs remerciements à mes collègues et amis en particulier Wassim Sakouhi et Hayfa Zgaya.

Enfin, je remercie ma famille qui a toujours cru en moi et m'a soutenue dans les meilleurs et les pires moments, je leur exprime mon infinie reconnaissance.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>RÉSUMÉ</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>iv</b>
<b>DEDICACE</b>	<b>v</b>
<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>vi</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b>	<b>vii</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>xi</b>
<b>LISE DES FIGURES</b>	<b>xii</b>
<b>LISTE DES ANNEXES</b>	<b>xv</b>
Introduction Générale	1
<b>CHAPITRE 1: LES CYBERCARS ET LEUR INTERACTION AVEC LES TRANSPORTS PUBLICS</b>	<b>4</b>
1.1 Introduction	4
1.2 Les systèmes de transports intelligents (STI)	5
1.2.1 Définition	5
1.2.2 Les visions des STI	5
1.2.3 Les systèmes de transports cybernétiques (STC)	8
1.2.4 Les Cybercars	17
1.2.5 La complémentarité des Cybercars avec les transports publics	21
1.2.6 Motivations et cadre de la thèse	22
1.2.7 Conclusion	25

## **CHAPITRE 2: LES SYSTÈMES DE TRANSPORTS INTÉGRANT LES CYBERCARS: MODÉLISATION ET OPTIMISATION . 27**

2.1	Introduction . . . . .	27
2.2	Etat de l'art: modélisation et optimisation des problèmes de transport . .	28
2.2.1	Modélisation des problèmes de transport . . . . .	28
2.2.2	Optimisation des problèmes de transport . . . . .	33
2.3	L'optimisation des problèmes de transport cybernétiques . . . . .	48
2.3.1	Le transport à la demande . . . . .	48
2.3.2	Les raisons du développement du transport à la demande dans le milieu urbain . . . . .	49
2.3.3	Revue de littérature . . . . .	50
2.4	Description du système de transport intégrant les Cybercars . . . . .	50
2.4.1	L'architecture ACTIF . . . . .	51
2.4.2	Modélisation d'un système de transport intégrant les Cybercars	54
2.4.3	Outil Simplifié de Création d'Architectures multiprojets (OSCAR)	58
2.5	Vers la mise en place d'un système de transport intelligent basé sur la l'intégration des Cybercars . . . . .	59
2.6	Conclusion . . . . .	59

## **CHAPITRE 3: SYSTÈME D'AIDE MULTICRITÈRE À LA DÉCISION PROPOSÉ ET ÉVALUATION DES CRITÈRES DE RÉGULATION PAR L'INTÉGRALE DE CHOQUET . . . . . 62**

3.1	Introduction . . . . .	62
3.2	L'intermodalité au cIJur des transformations du paysage multimodal . .	63
3.3	Structure des systèmes de gestion des réseaux de transport publics . . .	64
3.3.1	Evolution des systèmes de gestion . . . . .	64
3.3.2	Structure basée sur les STI . . . . .	64
3.3.3	Le Système d'aide à l'exploitation et à l'information Voyageurs	68
3.3.4	Le passage du mode normal au mode perturbé . . . . .	70
3.3.5	Manœuvres de régulation . . . . .	72



3.3.6	Manœuvres pour le réseau de bus . . . . .	73
3.3.7	Les critères de régulation . . . . .	78
3.4	Structure des systèmes de gestion du réseau de TAD . . . . .	79
3.5	Vers un Système Informatique d'Aide à la Décision (SIAD) . . . . .	80
3.6	L'aide multicritère à la décision et les outils d'évaluations . . . . .	81
3.6.1	Définition de l'aide multicritère à la décision . . . . .	81
3.6.2	Domaines d'application . . . . .	82
3.6.3	Agrégation multicritère . . . . .	82
3.6.4	Les opérateurs d'agrégation . . . . .	84
3.6.5	Limitations des opérateurs d'agrégation usuels . . . . .	90
3.6.6	Les intégrales floues . . . . .	91
3.6.7	Relation de l'intégrale de Choquet avec divers opérateurs d'agrégation classiques . . . . .	94
3.6.8	Choix de l'opérateur d'agrégation . . . . .	96
3.6.9	Limites de l'intégrale de Choquet . . . . .	99
3.7	Formulation du problème . . . . .	99
3.7.1	Détermination du périmètre de la perturbation . . . . .	101
3.7.2	Construction des décisions . . . . .	102
3.7.3	Algorithme évolutionnaire de régulation . . . . .	104
3.8	Algorithme d'insertion du système NORIA . . . . .	112
3.8.1	Les contraintes des cybercars . . . . .	114
3.8.2	Les critères du système Noria . . . . .	115
3.8.3	Principe . . . . .	116
3.8.4	Algorithme . . . . .	116
3.8.5	Evaluation de l'action de régulation externe . . . . .	118
3.9	Conclusion . . . . .	118
<b>CHAPITRE 4: SIMULATIONS ET RÉSULTATS . . . . .</b>		<b>120</b>
4.1	Introduction . . . . .	120
4.2	Outil informatique utilisé . . . . .	120

4.3	Validation de l'algorithme de construction des décisions . . . . .	121
4.3.1	Scénario 1: Une perturbation . . . . .	122
4.3.2	Scénario 2: Incidents en heure creuse . . . . .	124
4.3.3	Scénario 3: Incidents en heure de pointe . . . . .	127
4.4	Conclusion . . . . .	129
	Conclusion Générale . . . . .	130

## **LISTE DES ABBRÉVIATIONS . . . . . 133**

## **Bibliography . . . . . 135**

III.1	Critère de régularité . . . . .	xx
III.1.1	Calcul de l'attente à un arrêt . . . . .	xx
III.1.2	Calcul de l'attente totale sur l'horizon de régulation . . . . .	xxi
III.2	Critère de correspondance . . . . .	xxiii
III.3	Critère de la ponctualité . . . . .	xxiv
III.3.1	Calcul du nombre de passagers montant . . . . .	xxiv
III.3.2	Calcul du nombre de passagers descendant . . . . .	xxv
III.3.3	Calcul de la charge . . . . .	xxv
III.3.4	Calcul de la durée totale du passager . . . . .	xxv
III.4	Les kilomètres commerciaux: . . . . .	xxvi
III.5	La qualité de service . . . . .	xxvi

## LISTE DES TABLEAUX

1.I	Comparaison des consommations d'énergie des différents modes de transport . . . . .	13
1.II	Caractéristiques de la demande des STC (adapté de Mac Donald et al., 2003) . . . . .	15
4.I	Description du scénario 1 . . . . .	122
4.II	Description du scénario 2 . . . . .	124
4.III	Evaluation de l'incident 1 . . . . .	126
4.IV	Evaluation de l'incident 1 . . . . .	127
4.V	Description du scénario 2 . . . . .	127
4.VI	Evaluation de l'incident 1 . . . . .	128
4.VII	Evaluation de l'incident 1 . . . . .	129

## LISE DES FIGURES

1.1	Serpentine ( source : <a href="http://www.serpentine.ch">www.serpentine.ch</a> ) . . . . .	10
1.2	Cycab (source: <a href="http://www.robosoft.fr">www.robosoft.fr</a> ) . . . . .	11
1.3	UITra (source: <a href="http://www.atsltd.co.uk">www.atsltd.co.uk</a> ) . . . . .	11
1.4	Diagramme comparatif fu coût d'investissement en Euro . . . . .	14
1.5	Projet Liselec . . . . .	15
1.6	Répartition de la famille des CyberCars en fonction de la densité spatio-temporelle (source : rapport d'évaluation du projet CyberMove) . . . . .	18
1.7	Modèle Masetro (Source: Maestro Guidelines) . . . . .	19
1.8	les niveaux de contrôle du PPF " cœur de Ville " . . . . .	24
1.9	Les différents axes de recherche du PPF . . . . .	25
2.1	Modèle à 4 étapes . . . . .	33
2.2	Tableau récapitulatif des problèmes d'optimisation (Source: Thèse de doctorat de H. Zgaya) . . . . .	34
2.3	Optimalité locale au sens de Pareto . . . . .	36
2.4	Exemple de croisement en un point . . . . .	41
2.5	Exemple de croisement en deux points . . . . .	41
2.6	Principe d'un algorithme génétique . . . . .	43
2.7	Structure externe du modèle ACTIF (source: <a href="http://www.its-actif.org">www.its-actif.org</a> ) . . . . .	52
2.8	Modélisation selon ACTIF du système de gestion des transports publics intégrant les Cybercars . . . . .	55
2.9	Domaine fonctionnel: Exploiter les transports publics . . . . .	56
2.10	Logiciel Oscar . . . . .	58
2.11	Logiciel Oscar . . . . .	60
3.1	Interaction entre les moyens de transport de surface . . . . .	65
3.2	Diagramme fonctionnel du système d'aide à l'exploitation selon l'architecture ACTIF . . . . .	66

3.3	Diagramme de flux, stock de données de la fonction Superviser et réguler et informer les voyageurs . . . . .	67
3.4	Composition du Poste central de commande . . . . .	69
3.5	Classification des perturbations . . . . .	72
3.6	Haul le pied hors ligne . . . . .	74
3.7	Direct en ligne . . . . .	74
3.8	Apport de la nouvelle approche de régulation . . . . .	81
3.9	Exemple d'application de la somme pondérée . . . . .	89
3.10	Exemple illustratif des limites de la moyenne pondérée . . . . .	90
3.11	Indices de shapley et d'interaction pour divers opérateurs . . . . .	95
3.12	Interprétation de l'intégrale de choquet en terme d'indice d'interaction (Source: Grabisch, 2002) . . . . .	95
3.13	Application de l'intégrale de Choquet . . . . .	98
3.14	Approche proposée de régulation . . . . .	100
3.15	Construction de l'horizon à partir de l'instant $t_{pert}$ . . . . .	102
3.16	Principe de la régulation en terminus . . . . .	103
3.17	Principe de construction des décisions . . . . .	104
3.18	Représentation du chromosome de l'algorithme OptReg . . . . .	105
3.19	Fonction d'appartenance utilisée par la fuzzification . . . . .	107
3.20	Les fonctions d'appartenance pour les critères . . . . .	109
3.21	Pseudo code de fitness . . . . .	110
3.22	Pseudo code de l'opérateur de sélection . . . . .	111
3.23	Pseudo code de l'opérateur de croisement uniforme . . . . .	112
3.24	Pseudo code de l'opérateur de mutation contrôlée . . . . .	113
3.25	Pseudo code de l'algorithme de régulation . . . . .	114
3.26	Pseudo code de l'algorithme de régulation . . . . .	117
4.1	Modélisation du réseau de transport Valenciennois par QUEST (Source: T.Bonte . . . . .	121
4.2	Interface SAD . . . . .	123

I.1	Appréciation des actions en fonction des critères . . . . .	xvi
II.1	Principe de la régulation en terminus . . . . .	xviii
III.1	Distribution des arrivées des passagers à un arrêt . . . . .	xxi

## **LISTE DES ANNEXES**

<b>Appendix I:</b>	<b>Document de base pour l'évaluation des décisions en fonction des critères . . . . .</b>	<b>xvi</b>
<b>Appendix II:</b>	<b>Détermination de l'horizon de la régulation . . . . .</b>	<b>xvii</b>
<b>Appendix III:</b>	<b>Formulation mathématique des critères de régulation . . .</b>	<b>xx</b>
<b>Appendix IV:</b>	<b>Les contraintes de régulation . . . . .</b>	<b>xxvii</b>

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le développement de sociétés industrialisées a transformé les habitudes des personnes en matière de mobilité. Afin d'être en adéquation avec l'évolution des besoins des usagers des services de transports, toujours en quête d'une qualité de service meilleure, les autorités de transports et les responsables des régions ont misé sur l'intégration des systèmes de transports intelligents pour compléter les systèmes de transports multimodaux existants. En effet, les avantages apportés grâce aux nouvelles technologies d'une part et la prise de conscience des enjeux du développement durable d'autre part ont permis la multiplication des projets visant à reconfigurer le paysage des systèmes de transports de la façon la plus optimale possible.

Nos travaux de recherche s'inscrivent, en toute logique, dans un projet pionnier de la région Nord-Pas-de-Calais, baptisé " CIJur de ville ". Ce projet, démarré en 2006, vise à apporter des solutions innovantes en termes de mobilité urbaine et d'intégration des nouveaux modes propres au sein des milieux urbains. Ce projet associe trois équipes de recherche de la région : LAMIH-UVHC, LAGIS-ID-Ecole Centrale de Lille et LGI2A-Université d'Artois.

Inclure les cybercars, appelées également véhicules urbains intelligents, dans un réseau fortement maillé, demeure un défi à relever qui nécessite des études de faisabilité et des recherches portant sur différents thèmes permettant entre autres : la prise en considération de plusieurs aspects comme la gestion de la demande, la réallocation des ressources, la coordination avec les transports publics, la reconfiguration partielle ou totale du réseau des cybercars en cas de perturbations. Cette multitude d'objectifs doit tenir compte essentiellement des contraintes relatives à la gestion de la flotte des cybercars et aux caractéristiques du réseau où ces véhicules autonomes vont être implémentés. Le but est d'optimiser des critères relatifs à la qualité de services rendus aux usagers comme le temps de parcours ou encore assurer les correspondances.



"Cœur de ville" est resté ouvert à la coopération avec des laboratoires de recherche spécialisés dans le transport comme l'INRETS et l'INRIA qui n'ont pas manqué à exprimer le besoin en matière de théories et d'innovation pour la mise en IJuvre d'un système de gestion des cybercars où le développement technique avance à grands pas à l'inverse des idées sur la façon de gérer ce nouveau mode.

Nous avons donc opté pour un système d'aide à la régulation qui fait intervenir ce nouveau mode " propre " dans sa démarche de résorption des perturbations aléatoires qui dégradent la qualité de service. Dans ce contexte, nos travaux de recherche visent à apporter des réponses concernant les possibilités d'interfaçage des cybercars avec les moyens de transports publics. Nous permettons ainsi de mettre à profit la réactivité des cybercars et leurs qualités en matière d'économie, d'énergie, de respect de l'environnement, de flexibilité ainsi que de capacité à assurer un service porte-à-porte. Pour justifier la faisabilité d'un tel système, nous avons utilisé l'intégrale de Choquet comme outil d'agrégation de critères qui est l'Intégrale de Choquet pour évaluer les différentes décisions à transmettre au régulateur qui va trancher sur les instructions de l'approche d'exploitation du réseau à adopter afin de faire rebasculer le réseau vers un fonctionnement normal. Ce rapport est organisé en quatre parties.

Dans le premier chapitre, nous présentons les cybercars dans leur contexte général à savoir les systèmes de transport intelligents. Nous mettons donc l'accent sur les différentes initiatives à l'image des projets émergents visant à développer ce nouveau mode d'une part et le besoin de coordonner les cybercars avec les modes existants d'une autre part.

Un état de l'art sur les méthodes d'optimisation et leurs applications dans les systèmes de transports multimodaux et les systèmes de transport à la demande dont les cybercars fait l'objet du second chapitre.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de notre approche de régulation des systèmes multimodaux. Nous intervenons essentiellement au niveau de l'aide à la décision apportée au régulateur en enrichissant les stratégies d'exploitation existantes. Ces stratégies ont été efficacement développées par un système noria qui fait intervenir

les cybercars dans la résolution des perturbations.

Le quatrième chapitre illustre cette approche de régulation et d'évaluation à travers des exemples de simulation de scénarii s'inspirant des perturbations rencontrées réellement dans les postes de contrôle et de commande des compagnies de transport public. On évalue les décisions réalisables par rapport à des critères de qualité de service afin de guider le régulateur dans son choix de la décision à prendre.

## **CHAPITRE 1**

### **LES CYBERCARS ET LEUR INTERACTION AVEC LES TRANSPORTS PUBLICS**

#### **1.1 Introduction**

Le Plan de Déplacement Urbain (PDU) en France décrit notamment les normes de la qualité de service dans le transport qui portent sur les enjeux économiques (coûts, valeur ajoutée, etc.) et les enjeux par rapport aux clients (satisfaction, fidélisation, régression des réclamations, etc.). Ces exigences constituent un atout fondamental pour les fournisseurs de service de transport pour pouvoir concurrencer les offres existantes.

La qualité de service regroupe, outre les dispositifs de sécurité et les standards de l'infrastructure, des indicateurs de performance en matière de mobilité. De ce fait, plus le système d'exploitation est capable de réagir aux aléas du trafic plus la satisfaction des clients et des autorités de transport augmente. D'un autre côté, l'avancement des nouvelles technologies offre aux industriels automobiles et aux chercheurs la possibilité d'améliorer la théorie derrière les systèmes sophistiqués. Il est donc nécessaire de pouvoir s'aider par la technologie pour gérer au mieux le système de transport.

Ce chapitre s'organise en quatre parties : nous présentons dans le prochain paragraphe les systèmes de transport intelligents de façon générale, ensuite nous nous focalisons dans le paragraphe I.3 sur les systèmes de transport cybernétiques dont nous présentons les caractéristiques et les différentes applications les concernant. Ce qui nous mène à mettre l'accent au paragraphe I.4 sur les véhicules urbains intelligents comme nouveau mode surgissant dans le paysage du transport urbain. Nous décrivons ensuite dans le paragraphe I.5 les initiatives réalisées dans le contexte afin de favoriser la complémentarité entre les systèmes de transports cybernétiques et les transports publics. Enfin, le paragraphe I.6 est directement lié au au projet réalisé dans le cadre de cette thèse

à savoir le programme pluri-formation PPF "cœur de Ville " soutenu entre autre par la région du Nord-Pas-de-Calais.

## **1.2 Les systèmes de transports intelligents (STI)**

### **1.2.1 Définition**

Les Systèmes de Transport Intelligents (STI) est un label fréquemment utilisé de nos jours dans les applications sur le transport. La diversité de ses éventuelles implications ont fait que nous pouvons adapter cette notion selon le contexte souhaité tout en restant bien évidemment dans un cadre d'innovation en matière de service dans le domaine du transport. Il s'agit d'intégrer dans ce type de service des technologies développées dans les domaines de communication, de l'informatique, de l'ingénierie, etc.

De façon générale, les STI traduisent le déploiement des nouvelles technologies afin d'améliorer les réseaux de transport. Il existe, dans la littérature, différentes définitions de ce terme.

### **1.2.2 Les visions des STI**

Dans cette partie, nous explorons les différentes visions des STI en France, en Europe et à l'échelle internationale afin de cerner les caractéristiques de ces systèmes et leurs applications potentielles. Nous avons donc étudié les différents rapports d'évaluation fournis par les départements et les autorités de transport et parcouru les différents sites web<sup>1</sup>portant le label STI. Notons qu'il existe des communautés régionales, nationales et internationales où les STI constituent un axe de recherche fondamental.

#### **Les STI à l'échelle nationale**

En s'appuyant sur l'idée de Parey [Par04] chargé de STI France qui indique que les STI sont l'application des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) aux transports et leurs différents modes. Parey indique également que les

---

<sup>1</sup>[www.its-france.org](http://www.its-france.org), [www.its-canada.org](http://www.its-canada.org)

applications concernent essentiellement les transports terrestres jusqu'aux interfaces avec le maritime et l'aérien. Nous pouvons donc confirmer que les STI, à travers une multitude d'application, constituent un enjeu considérable dans l'amélioration de la gestion des réseaux de transports multimodaux puisqu'ils touchent à différents aspects considérables: la sécurité, l'information aux voyageurs et la détection des perturbations. Parey ajoute que les STI sont surtout caractérisés par leur multidisciplinarité en faisant appel à différents métiers et en donnant naissance à d'autres spécialités. La multinationalité des STI implique la nécessité d'une harmonisation dans les différents pays pour la mobilité des personnes et des marchandises.

*Côté entreprise:*

Notre choix s'est porté sur le groupe SETEC ITS vu son excellence dans la gestion et la mise en IJuvre de projets innovants impliqués dans le transport. Leur devise est que l'évolution du transport peut s'effectuer en intégrant les STI dans l'industrie automobile (pilotage automatique, signalisation) et dans les processus qui interagissent avec le voyageur comme le Système d'Aide à l'Exploitation(SAE), le Système d'Information Voyageurs (SIV), le Système d'Information Multimodale (SIM) ainsi que le Système d'Aide à l'Exploitation et l'Information Voyageurs (SAEIV). Il est à noter que ce groupe a conçu des projets innombrables à l'échelle nationale. Nous pouvons citer à titre non exhaustif le CDGVAL : le véhicule automatique léger reliant les terminaux de l'aéroport de Paris et les systèmes de billettique dans les régions de Rouen, Rhône-Alpes, Toulouse, Bouches du Rhône, Bas-Rhin, Alsace, etc.

Un œil sur la vision des STI à l'échelle internationale

Le Canada fait partie des pays qui ont longuement développé les différents aspects des STI, le Canada, mais pour certains, c'était peut être la seule opportunité d'exceller dans les applications du transport vu les limitations de ce pays en matière d'industrie automobile, et vu le nombre d'habitants pour une très grande surface[Zav99].

A cette fin, dans le département du transport, les chercheurs exploitent les fonctions des STI à travers les quatre éléments suivants du réseau : le véhicule, l'utilisateur, l'infrastructure et le système de communication comme suit :

Véhicule : il s'agit d'identifier les véhicules, les évaluer et les contrôler, l'objectif étant d'assurer une bonne gestion du parc routier, ainsi qu'un acheminement sécurisé et efficace de la marchandise.

Usager : les usagers du réseau peuvent solliciter les capacités des STI à assurer une surveillance du comportement des conducteurs pour prévenir d'une part les accidents et avoir une information temps-réel sur le voyageur (services, état de circulation, renseignement sur l'infrastructure) d'autre part.

Infrastructure : outre la surveillance et la détection, les STI sont utiles dans le contrôle et l'administration de l'infrastructure.

Ceci se traduit par un processus de détection d'incidents et de réaction sous forme d'interventions planifiées.

Système de communication : la collecte des données pour analyser et les traiter repose sur l'efficacité d'un système de communication. Ce dernier joue le rôle d'élément connecteur entre les décisions à entreprendre et les actions à appliquer.

Les Etats-Unis constituent une plateforme puissante et un terrain d'expérience favorable pour le développement des applications labélisées STI. Des projets tels que FAST-TRAC ou Guidestar TMS ont prouvé leur efficacité en réduisant de façon drastique les accidents de la route respectivement dans les régions du Michigan et Minneapolis. Le site web du département du transport et de l'administration de l'innovation technologique et de la recherche<sup>2</sup> regroupe une bibliothèque immense des projets déjà réalisés et les autres en cours, en matière de gestion des artères du réseau, la gestion des autoroutes, la gestion du transit, la sécurité publique, le péage électronique, l'organisation de la planification, la prévention des accidents, la maintenance, la gestion du trafic et l'information voyageur.

On se focalise dans ce qui suit sur les systèmes de transports cybernétiques.

---

<sup>2</sup>[www.rita.dov.gov](http://www.rita.dov.gov)

### 1.2.3 Les systèmes de transports cybernétiques (STC)

#### 1.2.3.1 Historique de la notion des STC

C'est dans les années 80 que ce concept s'est généralisé sur les traces des timides réflexions qui ont commencé à partir de l'année 1953 dans les pays industrialisés. Les Etats-Unis ont été les pionniers dans la mise en place des PRT (Personal Rapid Transit), un service sans arrêt entre une origine et une destination moyennant des véhicules automatisées dans des parcours dédiés. Anderson[And96] indique que c'est **Donn Fitcher** qui est derrière cette invention, et qui a été suivi par la suite par les compagnies **TTI, Inc., Alden staRRcar, Uniflo Jet Rail, Urbmobile, M.I.T, Bartells, Kieffer**.

Le déploiement des STI dans l'industrie automobile présente de multiples avantages dans la gestion du transport en milieu urbain. De ce fait, un nouveau concept a vu le jour dans les villes, modifiant ainsi les standards des modes de transports courants. Il s'agit des systèmes de transports cybernétiques.

#### 1.2.3.2 Définition d'un système cybernétique

Nous reprenons ici la définition donnée par Wiener[Wie48] concernant un système cybernétique. Un système cybernétique peut être défini comme un ensemble d'éléments en interaction qui sont exprimés par des échanges d'information. Lorsque des éléments sont organisés autour d'un système, leurs interactions donnent à l'ensemble des propriétés que ne possèdent pas ces éléments pris séparément. Les échanges produits constituent une communication, à laquelle les éléments réagissent en changeant d'état ou en modifiant leur action.

Dans le domaine du transport, cet aspect peut s'adapter aux nouveaux systèmes qui émergent actuellement et qui, en apparence, prennent différentes formes selon les objectifs du concept et le milieu d'action mais tous visent à améliorer les transports des passagers. C'est grâce à la coordination et la complémentarité avec les transports publics (essentiellement les transports de masse) et la similarité avec les véhicules privés que les STC constituent à l'avis global des chercheurs une solution prometteuse dans la maîtrise de la gestion du réseau de transport multimodal. Dans ce contexte Parent[PdLF01] con-

sidère dans le cadre du projet Cybercar qui sera détaillé ultérieurement (paragraphe I.4) qu'un STC est une flotte de cybercars qui transporte des passagers ou des biens de façon automatique.

Un système de transport cybernétique :

Est donc un regroupement de véhicules autonomes dotés de capacités "intelligentes" en les pilotant à travers un système global de gestion centralisé ou non. Le but est d'assurer un service de transport qui puisse satisfaire au mieux la qualité de service offerte aux usagers en quête de mobilité performante à travers les différentes mailles du réseau.

### **1.2.3.3 Caractéristique d'un STC**

Les systèmes de transport cybernétiques ont la faculté d'épouser les infrastructures des villes où ils sont implémentés grâce à la flexibilité de leurs technologies. Ils fournissent un service de transport d'individus ou de biens sur demande, en intégrant l'option de l'automatisation dans leurs parcours.

Dans ce contexte, nous pouvons distinguer les spécificités suivantes :

- L'infrastructure : les véhicules peuvent emprunter selon leur technologie des voies de guidage de type route, rail ou bimodal.
- La capacité : ces véhicules sont capables de transporter de un à six individus.
- La sécurité : il s'agit de véhicules entièrement automatisés pouvant se déplacer sans conducteur humain.
- La flexibilité : l'avantage majeur des STC est qu'ils assurent des services à la demande, disponibles 24/24 7j/7 et ne se conforment pas à un horaire rigide comme les transports publics.

### **1.2.3.4 Exemples des STC**

L'expansion de ce concept dans les différents pays industrialisés a donné naissance à des projets plus moins concrétisés. Certains sont encore des projets futuristes, d'autres ont déjà vu le jour.



Nous dressons dans la suite une liste d'exemples de véhicules automatisés que nous avons rencontrés dans la revue de littérature.

Exemples de véhicules apparentés aux STC :

**SERPENTINE**<sup>3</sup>: il s'agit d'un projet concrétisé en Suisse (Fig.1.1). A ce jour, il est



Figure 1.1: Serpentine ( source : [www.serpentine.ch](http://www.serpentine.ch))

encore en phase de démonstration (la première date de l'année 2002) et n'est encore pas définitivement implanté dans le paysage urbain. Il est caractérisé par sa basse consommation d'énergie 0,2l/100km et une capacité de transporter jusqu'à 4 personnes à la fois.

**CYCAB**<sup>4</sup>: En France, les Cycabs fabriqués par la société RoboSoft ont été testés dans la ville d'Antibes (Fig. 1.2). Avec une vitesse de 30 km/h et une recharge automatique par induction, ils sont capables de transporter jusqu'à 2 personnes adultes.

**ULTRA**<sup>5</sup>: ULTra peut atteindre 40km/h. Ce concept a vu le jour à Cardiff au Royaume-Uni (Fig.1.3). Il promet des résultats encourageants surtout comme solution à la congestion.

Ultra est un concept de Personal Rapid Transit (PRT) : Il s'agit de véhicules sans conducteurs circulant sur des voies de guidage dédiées.

<sup>3</sup>[www.serpentine.ch](http://www.serpentine.ch)

<sup>4</sup><http://www.robosoft.fr>

<sup>5</sup><http://www.atsltd.co.uk>



Figure 1.2: Cycab (source: [www.robosoft.fr](http://www.robosoft.fr))

D'autres concepts existent en Suède et dans d'autres pays industrialisés. A titre non exhaustif, nous citons: Express<sup>6</sup>, Skyweb<sup>7</sup> Skycab<sup>8</sup>, Vectus<sup>9</sup>, etc. Dans ce qui suit nous



Figure 1.3: ULTra (source: [www.atsltd.co.uk](http://www.atsltd.co.uk))

donnons des exemples de projets qui utilisent les véhicules cités précédemment.

#### *Exemples de projets apparentés aux STC:*

Les consortiums européens et internationaux se sont multipliés afin de favoriser les échanges d'expériences et de technologies dans la création des flottes de véhicules automatisés dans le but d'assurer un service à la demande. Nous pouvons citer entre autres :

**CyberMove**<sup>10</sup>: l'objectif primordial de ce projet européen, qui rassemble des labora-

<sup>6</sup><http://faculty.washington.edu/jbs/itrans/>

<sup>7</sup><http://www.taxi2000.com/>

<sup>8</sup><http://www.skycab.se/eng/>

<sup>9</sup><http://www.vectus.se/engindex.html>

<sup>10</sup>[www.cybermove.org](http://www.cybermove.org)

toires de recherches de renommée mondiale ainsi que des entreprises d'industrie automobiles, est de fournir une alternative à la voiture privée sans pour autant la remplacer. Il s'agit d'impliquer les STC dans un cadre urbain en complémentarité avec les transports publics. Ce projet a débuté en décembre 2001 pendant 3 ans appuyé par des rapports d'évaluation et des sites de démonstration.

**CyberCar**<sup>11</sup>: une première version s'est étendue également entre 2001 et 2004 pour concrétiser un concept inventé en 1991 par l'INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et Automatique) sur les véhicules automatisés. Ce projet est suivi actuellement par un projet baptisé *CyberCar 2* afin d'assurer la continuité des recherches et les démonstrations qui ont débuté autre le site d'Antibes.

Ses objectifs se résument à :

- réduire des caractéristiques des milieux urbains à travers l'assistance à la conduite et l'automatisation des technologies,
- diminuer la pollution urbaine à travers l'usage de véhicules électriques automatisés,
- améliorer la sécurité des passagers et des conducteurs,
- assurer une bonne qualité de service pour les usagers grâce à des services de transport à la demande de type porte-à porte ou transport collectif.

Le besoin de trouver une alternative aux véhicules privés a poussé les autorités de transport à réfléchir à des systèmes innovants.

#### **1.2.3.5 Des systèmes de transports innovants basés sur les STC**

De nombreuses études sur les inconvénients des véhicules privés ont alerté les scientifiques ainsi que les autorités sur la nécessité de trouver une alternative, essentiellement, dans le cadre urbain où la présence simultanée de différents modes de transports engorge souvent les mailles du réseau. Cet aspect détériore la qualité de service offerte

---

<sup>11</sup><http://www.cybercars.org>

aux usagers et augmente considérablement les dépenses et la consommation de l'énergie. Dearien[DP93] a étudié la relation cause-effet de l'utilisation des moyens de transport et leur effet sur l'environnement en étudiant le cas des États-Unis. Il a donc montré qu'il est urgent de remplacer certains modes à fortes consommations par des véhicules légers pour préserver l'environnement et réduire la consommation de l'énergie (Tableau I.1) et par la suite le coût d'exploitation.

D'autres études comparatives ont été publiées présentant un argument fort pour introduire les concepts STC dans les villes. L'analyse de la consommation montre que les

Véhicule	<i>MJ/Person * Km</i>
Train	1.0 - 1.4
Bus Urbain	1.2
Motocycle	1.6
Véhicule électrique	1.7
Véhicules urbain	1.9 - 2.0
Tramway/métro léger	2.4 - 2.5
Avion	3.3

Table 1.I: Comparaison des consommations d'énergie des différents modes de transport

véhicules électriques sont moins gourmands en consommation d'énergie. Une autre étude comparative a été présentée par Tegner[Teg05] (Fig.1.4) En analysant le diagramme de la figure I.4, on se rend compte que l'investissement qui est alloué aux trois systèmes de type Personal Rapid Transit (PRT) est en moyenne 6MEuro. Ce coût est multiplié par plus de 3 en ce qui concerne les autres modes de type LRT, Bus, etc.

La présence des véhicules automatisés dans les milieux urbains n'est pas encore au point et reste dans la plupart des projets dans le cadre des démonstrations sur site protégé. Néanmoins, d'autres concepts se généralisent dans les grandes villes en s'apparentant au principe des STC tout en restant accessible et proche de la notion de véhicule privé. Ainsi des concepts tels que le car-sharing, le car-pooling, le taxi, le transport à la demande ou encore les systèmes d'autoroutes automatisés sont en phase d'exploitation:

a) Le Car-sharing ou l'auto-partage

A Zurich, en 1948, l'idée est venue de façon informelle de créer un club de conducteurs

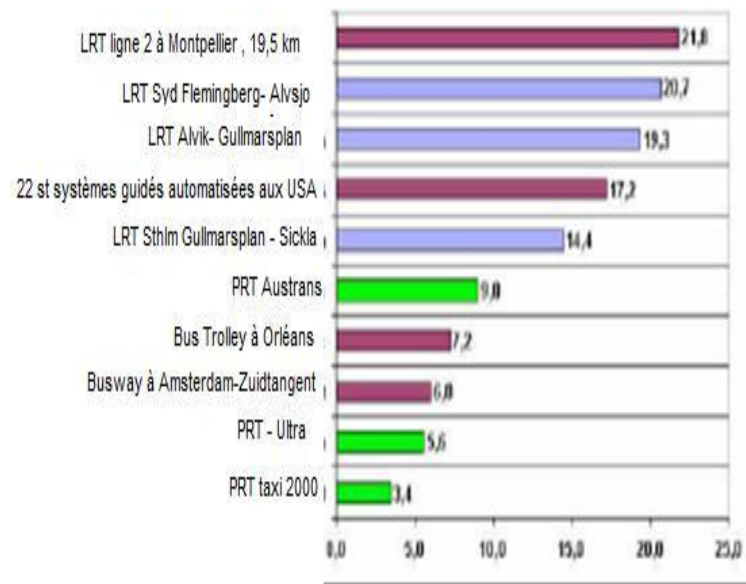


Figure 1.4: Diagramme comparatif du coût d'investissement en Euro

mais cela n'a pas été suivi. C'est à partir des années 1970 que les premiers projets sont apparus. Mais, plusieurs d'entre eux ont malheureusement échoué. Le véritable déclic a eu lieu dans les années 1990 où plusieurs projets se sont agrandis un peu partout en Europe.

La Suisse a su développer ce concept grâce à sa maîtrise de la gestion de stationnement dans les centres villes et l'évolution de son transport public. L'intitulé de son projet est : Mobility Car Sharing<sup>12</sup>. L'Allemagne de son côté a conçu le projet Stattauto Drive<sup>13</sup>.

La France a ensuite repris l'idée : Praxitèle<sup>14</sup> à Saint-Quentin-En-Yvelines, ce projet a été abandonné en 1999 après une durée de 6 ans. La réussite de l'auto partage s'est affirmée à travers Liselec<sup>15</sup> qui existe depuis 1999 en proposant sur abonnement 50 voitures électriques en libre-service réparties sur 7 stations en ville.(Fig.1.5)

Actuellement, nous pouvons trouver différents systèmes d'auto-partage dans les grandes villes de France : à Paris (Caisse commune), à Lille (Lilas autopartage), Strasbourg

<sup>12</sup><http://www.mobility.ch>

<sup>13</sup><http://www.stattauto-muenchen.de>

<sup>14</sup><http://www-rocq.inria.fr/praxitele/>

<sup>15</sup><http://l3idemo.univ-lr.fr/cocoon/liselec/index>

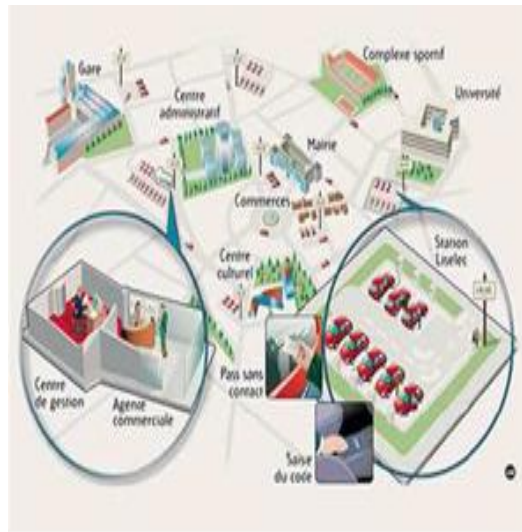


Figure 1.5: Projet Liselec

(Auto'trement).

Récemment, en Juillet 2007, une loi a été transmise au Sénat afin d'appuyer le projet de loi présenté par Roland Ries concernant "la tendance à promouvoir l'autopartage ". Le principe de ce concept est d'utiliser des véhicules de façon collective, en les louant pendant une durée donnée et en les récupérant à partir de certaines stations positionnées d'une manière stratégiques dans les villes.

Dans le tableau I.2, nous récapitulons les différentes caractéristiques des systèmes de transport cybernétiques cités dans le paragraphe précédent.

Système	Description	Volume du trafic	Trajet
Carsharing	Milieu urbain étendu	Elevé	Court
Witkar	Milieu urbain étendu	Elevé	Très court
CityCar	Milieu urbain étendu	Elevé	Très court
Praxitele	collecte et distribution en milieu résidentiel	Faible	Très court
Liselec	Milieu urbain étendu	Elevé	Très court
Elettra Park	Liaison entre périphériques	Elevé	Court
CarLink	Elevé en heures de pointe	12	Court

Table 1.II: Caractéristiques de la demande des STC (adapté de Mac Donald et al., 2003)

### b) Le Taxi

Le principe du Taxi est communément connu à travers le monde entier. En majorité le service offert par un taxi correspond à une demande de type porte-à-porte. D'autres taxis peuvent offrir un service partagé par différents usagers soit parce qu'ils ont une destination commune (gare, manifestation) ou qu'ils ont une spécificité commune (transport d'handicapés). Les prix assez élevés découragent les usagers à emprunter les taxis pour les longues distances.

Une nouvelle notion est apparue en concordance avec les TIC, à savoir le WebTaxi : il s'agit d'un service taxi basé sur l'application web. Les requêtes des personnes parviennent au portail web en précisant l'origine et la destination. Le système de gestion calcule ainsi le trajet à parcourir et encaisse la course, le client est informé par la suite de la présence du taxi qui va assurer son transport.

### c) Le Transport à la demande

Connu par la communauté des chercheurs par DRTS (Demand Responsive Transport Systems). Le système réalise la collecte de passagers qui ne peuvent pas emprunter les transports publics ordinaires pour cause de mobilité réduite. Ce concept est un service de transport public flexible qui joint les spécificités d'un taxi et d'un bus. Il se distingue néanmoins par le fait que :

- Contrairement aux bus, il ne se plie pas à un tableau de marche et à un parcours fixés
- Contrairement aux taxis, il peut satisfaire plus d'une requête au même moment. Par contre, il nécessite une réservation préliminaire afin d'ajuster le parcours de collecte.

Nous pouvons répertorier les DRTS selon :

#### i) L'usage :

- service DRTS destiné à usage public,

- service DRTS destiné à usage ciblé (personnes à mobilité réduite)

ii) Le modèle de transport :

- many-to-many : dans les métropoles, plus compliqués à gérer, il s'agit de déplacements ayant des points origines différents et des points destinations différents.
- many-to-one et many-to-few: desservant les centres urbains à partir de milieux ruraux,
- one-to-many et few-to-many : en inversant les lieux d'origines et de destinations, nous retrouvons le cas précédent.

Selon le SAMPO<sup>16</sup> (System for Advanced Management of Public Transport Operations), un service DRTS suit quatre étapes :

- Enregistrement des clients?
- Ordonnancement du service,
- Confirmation de la réservation des trajets,
- L'utilisation du service.

Nous nous intéressons dans le paragraphe suivant à un type de transport cybernétique en particulier, à savoir, les cybercars.

## **1.2.4 Les Cybercars**

### **1.2.4.1 Définition**

Nous avons introduit brièvement dans les paragraphes précédents la notion de Cybercar en citant les projets innovants dans le cadre des STI.

La priorité des autorités de transport étant d'assurer la complémentarité de ces nouveaux

---

<sup>16</sup>SAMPO : projet groupant des industriels, des autorités de transport, des consultants et des chercheurs qui a pour objectif de réaliser l'adéquation entre la demande et l'offre en matière de DRTS.



concepts avec le réseau multimodal existant. Dans ce contexte, nous introduisons le cybercar comme mode alternatif qui jouera le rôle d'une aide supplémentaire aux régulateurs dans le cas où des perturbations surviennent sur le réseau de façon inattendue.

Parent[PdLF01] définit les Cybercars comme étant des véhicules routiers avec des capacités de conduite totalement automatisées. Une flotte de Cybercars constitue un STC pour le transport de passagers ou de biens. Dans un réseau routier, avec la faculté d'assurer un service à la demande et en porte-à-porte.

La flotte de véhicules est contrôlée par un système de gestion centralisé afin de satisfaire des demandes particulières dans un environnement particulier. Au début, les cybercars assurent des courts trajets à vitesse réduite dans un environnement urbain ou des espaces privés.

La famille des cybercars s'étend selon une dispersion spatio-temporelle de la densité. La Fig.1.6 indique l'emplacement des Cybercars par rapport aux autres modes de transport conventionnels (individuels ou publics). La faisabilité de la mise en place des cyber-

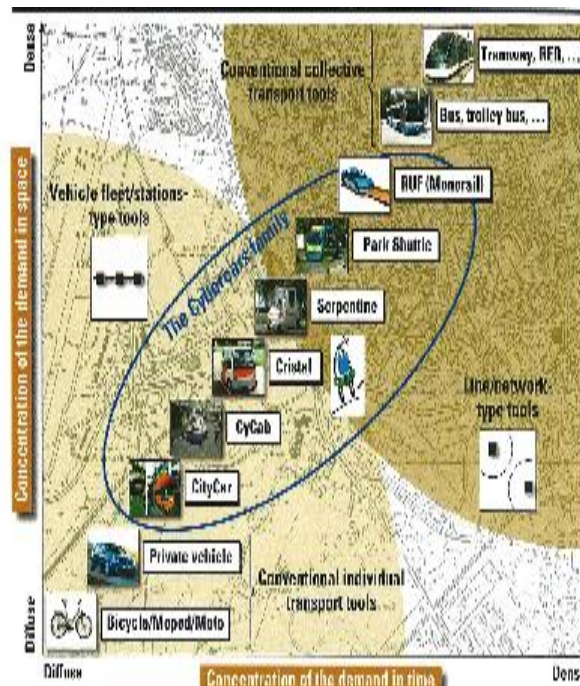


Figure 1.6: Répartition de la famille des CyberCars en fonction de la densité spatio-temporelle (source : rapport d'évaluation du projet CyberMove)

cars dans le contexte urbain a été évaluée à travers plusieurs études. Dans le paragraphe suivant, nous avons cerné les exigences des usagers potentiels des Cybercars.

#### 1.2.4.2 Les besoins des usagers

Afin de positionner ce type de véhicule dans son cadre urbain et pour démontrer la faisabilité d'un système qui va s'appuyer sur ce genre de véhicules, des rapports d'évaluation ont suivi les démonstrations sur site qui ont été réalisées un peu partout en Europe.

En réalité, l'évaluation a été élaborée en trois phases selon le modèle Maestro présenté dans la Fig.1.7:

a) Evaluation initiale : Le choix des indicateurs de performances et des méthodologies

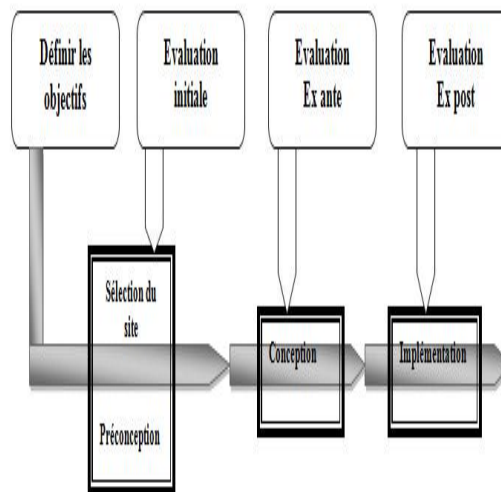


Figure 1.7: Modèle Masetro (Source: Maestro Guidelines)

de mesure d'impact du point de vue qualité et quantité, ont été définis et mis en pratique sur huit sites de démonstration du projet CyberMove.

b) Evaluation Ex-ante : Basée sur un modèle microscopique du trafic,

c) Evaluation Ex-post : Permet de valider par expérimentations, les résultats des étapes précédentes.

Nous avons cerné les principales exigences des usagers concernant la mise en place d'un STC dans leur ville[MTH07]

- La disponibilité:

Les véhicules doivent être localisés dans des endroits stratégiques. En évitant le stockage des véhicules dans un endroit particulier, leur nombre doit être suffisant pour correspondre à la demande. Les véhicules doivent avoir une vitesse de déplacement raisonnable.

- La sécurité :

Les usagers revendiquent un besoin en infrastructure séparée (zones libres) pour les voitures pour un transport efficace dans les endroits à congestion tel que les centres villes. En effet, l'usage exclusif des rames dans le centre ville augmente la sécurité piétonnière. Une supervision à partir d'une station d'opérateur (d'aide à la décision) et des capteurs intelligents, outils de navigation, etc. aideront à assurer la sécurité de ce système.

- La vitesse : La vitesse maximale doit atteindre les 50km/h entre la ville et les zones suburbaines. La vitesse moyenne doit être d'environ 30km/h dans la ville.

- Le service : Les matériaux formant les véhicules (à l'intérieur comme à l'extérieur) doivent résister aux graffitis et d'autres types de vandalisme. Le paiement doit être standardisé.

- L'apparence : Les rames ressemblent aux mini-vans, qui présentent des similarités avec les rames existantes. Les usagers n'apprécient pas les formes étranges.

- Le confort des passagers : Sur ce point, les études d'avis ont montré que les entrées doivent convenir pour les personnes à mobilité réduite. Egalement, l'utilisation des véhicules, le mode de paiement, le temps du trajet, la localisation actuelle, la description des routes, etc. doivent être intuitives. En matière de sécurité, il sera nécessaire de mettre un système de vidéosurveillance ainsi que des boutons d'urgence. Des écrans pour la projection des films ou des publicités ainsi que les

informations (annonces, instructions) qui doivent être accessibles pour les sourds-muets. Tous ces aspects déterminent le facteur de confort des passagers.

### **1.2.5 La complémentarité des Cybercars avec les transports publics**

Les challenges de l'intégration des Cybercars dans un réseau multimodal constituent une préoccupation des autorités de transport à l'échelle mondiale. En effet, il ne suffit pas d'améliorer les STC et les transports publics pour réussir l'équilibre offre/demande auquel les fournisseurs de service de transport font face.

#### **1.2.5.1 Les initiatives en matière de complémentarité**

En Europe, différentes initiatives ont été proposées conjointement par les autorités de transport et les industriels afin d'assurer une "mobilité intelligente". Le but est d'éviter à l'usager de se soucier des en ne fournissant pratiquement que ses points de départ et arrivée. Dans ce qui suit, nous présentons les initiatives dans quelques pays à travers le monde.

##### *Les initiatives en Allemagne*

Une coopération entre BSAG et Cambio à Bermen en Juin 1998 a permis de fournir aux usagers des cartes de transport combiné : transport public - carsharing nommée : " Bremer Karte Plus Auto Card"[Bur99]; l'usage de ces cartes a permis en une année d'augmenter l'utilisation des transports publics de 26%.

##### *Les initiatives au Canada*

Un rapport effectué par le département de transport au Canada en juin 2006 a fait l'objet d'une évaluation des initiatives de mobilité combinée dans les villes Canadiennes. Ce rapport a révélé que la coopération entre les Transport publics et les Carsharing ont réduit la congestion de 2.1% et la pollution de 1.6%. [Tes06].

##### *Les initiatives en suisse*

Suivant l'exemple de l'Allemagne, une carte nommée DBCarsharing a vu le jour [HT98].

Les initiatives en suède La suède a pris conscience de l'avantage d'avoir une mobilité

combinée[VAG03] et débute par une phase de prise de conscience de l'opinion publique sur l'intérêt des STC en complément des transports publics actuels.

### **1.2.5.2 Les limites des systèmes de gestion actuels**

Malgré la diversité des initiatives pour intégrer les STC dans le contexte urbain actuel, nous constatons tout de même que des efforts restent à fournir. Les limites des systèmes actuels peuvent être résumées comme suit :

- Absence d'interface standardisée entre les fournisseurs de transport public et les fournisseurs de services partagés,
- La communication entre ces services a débuté grâce à des affiches publicitaires et des tracts qu'on retrouve de plus en plus dans les stations de transport public mais elle donne l'impression qu'il s'agit d'un service concurrent et non d'un service complémentaire,
- Les systèmes d'exploitation n'incluent pas encore la proposition d'emprunter un véhicule de services partagés pour résorber les éventuelles perturbations.

Dans le paragraphe suivant, nous présentons le cadre de nos travaux de recherche ainsi que les motivations qui nous ont poussées à intégrer les cybercars dans le processus de régulation.

## **1.2.6 Motivations et cadre de la thèse**

### **1.2.6.1 Motivations**

Nos travaux de recherche s'ajoutent à ceux déjà effectués au sein du laboratoire LAGIS équipe ID pour différents motifs, essentiellement: \* Sensibilisation à la nécessité de modifier les habitudes des usagers du réseau de transport pour une meilleure implication dans une mobilité intelligente moyennant des modes de transport propres.

\* Généralisation du processus de régulation pour qu'il tienne en compte d'un concept en plein essor dans les pays industrialisés soucieux pour leur environnement.

\* Mise en évidence des avantages considérables de la complémentarité entre les STC et les transports publics.

#### **1.2.6.2 Programme Pluri-Formations "cœur de Ville "**

Le projet PPF " Cœur de Ville ", démarré en septembre 2006, associe les laboratoires LAMIH-UVHC, LAGIS-ID-Ecole Centrale de Lille et LGI2A-Université d'Artois. Placé sous la direction de Mr Christian TAHON du LAMIH-SP, il compte plusieurs personnalités extérieures :

- \* Michel PARENT de l'INRIA (équipe IMARA),
- \* Stéphane ESPIE de l'INRETS (équipe MSIS),
- \* Gérard COUVREUR de l'INRETS (équipe ESTAS).

Le projet vise à traiter des problèmes de transport urbain incluant une flotte de cybercars distribués dans un cœur de ville. Il consiste à prendre en compte les problèmes de gestion des demandes, des perturbations, de l'allocation et de la réallocation d'un cybercar, des contraintes entre la flotte de cybercars et les autres moyens de transport, les perturbations, etc.

Dans ce projet, nous nous focalisons sur la place de ces nouvelles solutions dans le cadre des STI et nous mettons en évidence les complémentarités avec les transports publics classiques (bus, tramways...).

Dans les transports publics classiques, les usagers doivent se synchroniser avec l'offre de transport, prédéfinie par la société gestionnaire. Un atout important des systèmes de transport à la demande est d'introduire plus de flexibilité : dans les solutions PRT (détaillées en paragraphe I.3.4), cybercars ou auto-partage, c'est le véhicule qui se synchronise avec les besoins de l'utilisateur.

La démarche proposée pour la résolution des problèmes de reconfiguration suit trois niveaux (Fig. 1.8)

- \* un niveau "stratégique" : ce niveau assure la gestion prévisionnelle de la flotte de cybercars. Il assure l'optimisation de l'utilisation des ressources (affectation des cybercars, gestion des places de stationnement, prise en compte des fluctuations de la demande, etc.). Ce niveau stratégique génère alors des demandes de déplacement

traitées au niveau tactique. Là où interviennent les opérateurs d'exploitation,

\* un niveau "tactique" : ce niveau est chargé de satisfaire et mettre en œuvre les demandes de déplacements issues du niveau stratégique précédent. Il génère les trajectoires à suivre par les cybercars en tenant compte des perturbations,

\* un niveau "opératif" : propre aux cybercars : à ce niveau, le but est d'améliorer leur réactivité soumis aux perturbations très localisées (traversée de piétons, route obstruée, etc.).

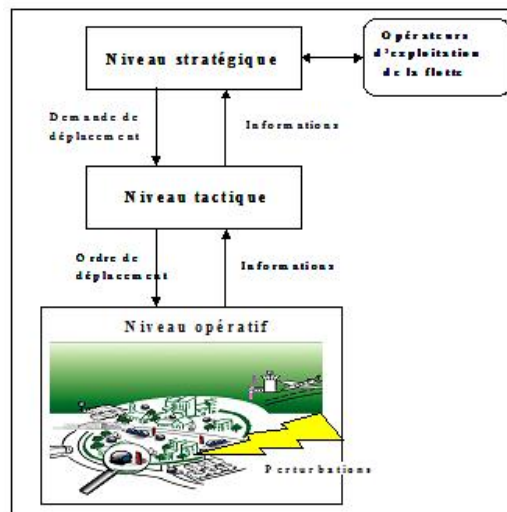


Figure 1.8: les niveaux de contrôle du PPF " cœur de Ville "

Les travaux de recherche qui entrent dans le cadre du PPF "cœur de ville" forment un ensemble cohérent où les axes de recherche sont complémentaires (Fig.1.9).

– Routage des cybercars, concerne le déplacement des cybercars sur le réseau de transport en faisant face aux perturbations. Ce thème est traité par les équipes LAMIH-SP et LAMIH-RAIHM : R. Mandiau, Y. Sallez, T. Berger, F. Dumitrescu (stagiaire de recherche).

– Architecture Holonique adaptée au transport, Cette architecture intègre plus particulièrement l'allocation des cybercars aux différentes demandes. Ce thème est

traité au sein de l'équipe LAMIH-SP : C. Tahon, T. Berger, S. Raileanu (Doctorant).

– Interaction Homme-Système Cybercars, qui étudie les modalités d'interaction " sensible au contexte " entre usager(s) et cybercar(s). Ce thème est traité dans les équipes LAMIH-RAIHM et LAMIH-SP : C. Kolski, D. Tabary, T. Berger, O. Serrate (Doctorant).

– Régulation des Transports Publics (TP), Cette partie intègre les cybercars comme moyen d'action pour pallier une défaillance des TP. Ce thème est traité dans le cadre de cette thèse par les équipes LAGIS-ID et LAMIH-SP : C. Tahon, S. Hammadi, A. Melki (Doctorante).

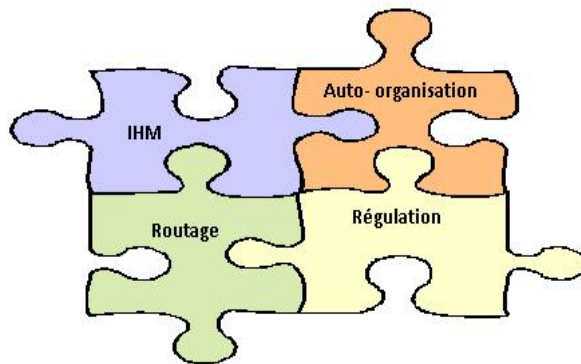


Figure 1.9: Les différents axes de recherche du PPF

### 1.2.7 Conclusion

L'introduction des systèmes de transport cybernétiques est une démarche innovante. Associée aux transports publics, les STC constituent une ouverture vers une mobilité intelligente plus performante et une amélioration considérable de la qualité de service des usagers du réseau de transport. Les différentes initiatives apportent, grâce à la performance des technologies et des composants sophistiqués des véhicules autonomes, la



capacité d'assurer les requêtes de transport dans un contexte urbain. La gestion de ces véhicules du point de vue exploitation du réseau et régulation en cas de perturbation reste un challenge à remporter. Dans le chapitre suivant, nous abordons les problèmes de régulation en général et présenter notre approche qui se base sur l'utilisation des Cybercars comme moyen permettant de réguler certaines situations de perturbations.

## **CHAPITRE 2**

### **LES SYSTÈMES DE TRANSPORTS INTÉGRANT LES CYBERCARS: MODÉLISATION ET OPTIMISATION**

#### **2.1 Introduction**

Lacomme [Lac05] décompose la démarche de résolution d'un problème en trois étapes, à savoir : la modélisation du problème, la conception d'algorithmes d'optimisation et la validation des solutions retenues. C'est cette démarche que nous suivons tout au long de ce chapitre. En effet, la gestion d'un système de transport requière de faire face à un problème complexe qui nécessite différentes connaissances théoriques (outils de modélisation des problèmes, classification des problèmes multiobjectifs, algorithmes d'optimisation, etc.).

En particulier, un problème de transport possède différentes contraintes augmentant de façon drastique sa complexité. Ce type de problème nécessite donc une modélisation qui représente au mieux tous les volets du problème afin de mieux l'identifier et proposer les solutions qui lui correspondent. Ces solutions seront ensuite évaluées selon les critères des fournisseurs de transport et ceux des autorités de transport des villes urbaines. Le chapitre précédent a comporté un état de l'art sur les systèmes de transports innovants ainsi que les éventualités de coordinations avec le système de transport public existant. L'objectif de ce chapitre est de montrer de façon plus transparente cette coordination dans le cadre d'un système de transport intelligent.

Ce chapitre est organisé comme suit : le second paragraphe est un état de l'art sur la modélisation des problèmes de transport ainsi que sur les méthodes exactes et approchées utilisées pour résoudre les problèmes d'optimisation. Le troisième paragraphe se focalise sur les moyens d'optimiser les problèmes connus sous le nom des problèmes de transport à la demande en s'appuyant sur les systèmes de transports

cybernétiques. Ensuite, le quatrième paragraphe justifie la modélisation basée sur l'architecture ACTIF d'un système de transport intégrant une flotte de cybercars. Enfin, le cinquième paragraphe introduit l'approche proposée de régulation à l'aide de la mise en place d'un système Noria.

## **2.2 Etat de l'art: modélisation et optimisation des problèmes de transport**

### **2.2.1 Modélisation des problèmes de transport**

La modélisation constitue un élément clé dans la mise en place d'un système de gestion de transport. En effet, ils permettent d'avoir un nombre important d'informations. Nous détaillons dans la suite les éléments de base dans la modélisation des problèmes de transport.

#### **2.2.1.1 Les enquêtes**

##### *✓ Origine / Destination*

C'est un élément clé dans la prévision et la planification des déplacements urbains. Les données étant coûteuses, l'avantage de ce type d'enquête est qu'elle fournit une estimation raisonnable des déplacements. Abrahamsson [Abr98] présente une revue de littérature des différentes manières de réaliser cette enquête.

##### *✓ Types d'enquêtes*

Les enquêtes dans le domaine du transport peuvent traiter les habitudes des usagers dans les déplacements, l'inventaire du système de transport ou encore l'aménagement du territoire en vue d'une éventuelle reconfiguration. Les moyens qui sont mis à disposition des enquêteurs sont: les observations, les interviews des conducteurs (Enquête Cordon), par téléphone, des recherches documentaires...).

### 2.2.1.2 Modélisation du transfert modal

Un modèle de transfert modal permet d'étudier la probabilité des usagers de changer d'un mode à un autre. En effet, c'est en fonction des variations de l'offre en transport que ce modèle pourra anticiper le comportement des usagers. Cela permet de favoriser un mode par rapport à un autre mais souvent il s'agit de pénaliser l'utilisation des voitures privées en faveur du transport en commun. Notons que si plusieurs modes peuvent servir d'alternatives au mode actuel emprunté, une comparaison des temps de chaque mode détermine le choix final des utilisateurs. Un seuil pourra donc être fixé afin d'accepter un transfert modal.

A la suite d'un changement de situation l'utilisateur peut :

- emprunter un autre mode,
- conserver le mode actuel,
- combiner son mode actuel à un autre mode,
- changer le point de jonction des modes.

Outre la représentation des problèmes de transport suivant les déplacements des usagers, il existe des modélisations symboliques et graphiques de ces problèmes.

### 2.2.1.3 Modélisation par graphe

De nombreux problèmes de transport sont modélisés à l'aide des graphes. Il s'agit de représenter de façon symbolique un réseau. Il peut s'agir de simuler le transport d'objets (marchandises, énergie, fluides, etc.), des personnes ou des informations à travers un réseau (routier, de distribution, etc.). La théorie des graphes est la discipline qui vise à définir les éléments qui servent à l'encodage d'un graphe. Un réseau routier peut être représenté par :

**Un graphe orienté et valué** ( $G$ ) ensemble de nœuds et d'arcs où chaque nœud représente des arrêts et les arcs orientés sont le déplacement entre ces arrêts.

**Un nœud** : appelé également sommet, il peut être un point d'extrémité ou un point d'intersection. Un point d'extrémité représente dans un réseau routier un terminus de la ligne d'un bus ou tramway, le point d'intersection correspond à un pôle d'échange ou un

nœud de correspondance.

**Un arc orienté** : il reflète un lien entre deux sommets, il relie un sommet initial et un sommet terminal. Il représente l'infrastructure qui supporte le déplacement (route, rail).

#### 2.2.1.4 Modélisation par Réseau de Pétri (RdP)

Le Réseau de Pétri, souvent utilisé pour modéliser des systèmes de production, a été également adopté comme étant un outil de modélisation des réseaux de transport.

En effet, les RdP permettent de modéliser un comportement dynamique. Ils sont formés de places, d'arcs et de transitions. Des lois de franchissement (ou tir) régissent le fonctionnement dynamique d'un RdP en se basant sur la présence ou non de jetons dans les places en amont et les conditions imposées au niveau des transitions. Ce mécanisme peut ensuite être représenté par un graphe de marquage qui traduit l'évolution du franchissement. Il existe diverses variantes de RdP : le RdP autonome, RdP simple, RdP pur, RdP à capacités, RdP généralisé, RdP à arc inhibiteur, RdP temporisé, RdP stochastique, etc.[Gen06].

Diverses recherches et applications qui se sont appuyés sur cet outil puissant ont vu le jour :

Dans le domaine de la gestion de production, Caradec a proposé une extension des RdP hybrides : Rdp Lots colorés afin de traduire le caractère à la fois hybride et flexible d'un système de production [Car98]. Abbas-Turki[ATGBE02] a considéré le RdP dans ses travaux de recherche sur la modélisation des réseaux de transport, entre autres la gestion des correspondances Nait-Sidi-Moh [SMM02] a opté pour les RdP stochastiques pour l'étude de la performance d'un système de bus, le calcul du temps d'attente dans les stations de correspondance s'est effectué par une modélisation par l'algèbre Max-Plus Dans le même axe de recherche, Bouyekhf [BGE03] a traité le problème de correspondance en appliquant la théorie des RdP stochastique sur un cas réel.

Les RdP ont également été utilisés dans la représentation du flux de voyageurs faisant l'objet d'un travail de DEA de Ghafari [Gha98] et de la thèse de Saade[Saa] qui s'est intéressée à la représentation du flux de voyageurs entrant dans une station du milieu

parisien. Saade a appuyé ses recherches par une simulation visuelle par SIMULA. Enfin, Mesghouni [MC02] a focalisé ses travaux de recherche sur la modélisation flux des passagers dans le processus de la régulation.

#### **2.2.1.5 Modélisation par un système multi-agent**

Un système multi-agent est un ensemble d'entités autonomes dotées de capacités de communication et d'interaction dans le cadre d'un environnement afin de résoudre des problèmes ne pouvant être traités par les agents de façon individuelle.

Plusieurs travaux ont adopté cette modélisation afin de traiter des problématiques du domaine de transport selon des axes variés :

- Le transport côté client :

La problématique consiste à offrir à l'utilisateur l'itinéraire le plus adéquat à ses attentes (traduites sous forme de requêtes) et donc de l'accompagner avant et pendant son voyage dans le choix de l'itinéraire. L'évolution technologique des plateformes de développement a fait exploser le nombre de portails offerts aux usagers du transport en leur proposant les itinéraires à emprunter tout en rajoutant des critères de confort et des contraintes sur le temps de départ et/ou d'arrivée. Une comparaison de la gestion centralisée et de la gestion distribuée a été effectuée par Zargayouna[Zar03] qui s'est focalisé sur les systèmes d'information voyageurs; C'est en creusant dans l'aspect coopératif des agents que le système incrémente ses performances que Zidi[Zid06] a opté pour l'utilisation des agents système, responsable zone, calcul chemin, gestionnaire d'information, superviseur et perturbation afin de proposer un système d'aide au déplacement voyageurs dans le cadre d'un système de transport multimodal. S'alignant avec les travaux de Kamoun [Kam07] et Trabelsi[AT04], Zgaya [Zga07], a mis l'accent sur une des caractéristiques d'un système multi-agent à savoir la négociation afin de résoudre des situations de conflits dues à l'indisponibilité des serveurs d'information ou à un engorgement du réseau suite à la réclamation de plusieurs services à la fois ou plusieurs requêtes simultanées de transport. Elle a également ouvert la voie à l'utilisation du principe des prédicats dans les systèmes multi agents distribués.

- Le transport côté régulateur :

Le paysage du transport est assez large pour couvrir différents axes de recherche. Les compagnies de transport essayent de trouver une adéquation entre l'offre et la demande tout en respectant les exigences en terme de qualité de service vis-à-vis des autorités de transports. Dans ce contexte, un volet important consiste à maîtriser cette demande et la canaliser dans le circuit du transport. Désormais, cette étape ne se passe pas sans problèmes vu la complexité de gérer une flotte de véhicules, avec différents modes et sur toutes les mailles du réseau de transport. C'est donc le rôle du régulateur de résoudre en temps réel, les défaillances des stratégies d'exploitation lorsque des perturbations impliquent des modifications du fonctionnement normal. Dans[Fay03], le système multi-agent proposé correspondant à un module d'aide à la décision qui vient soutenir le entité active. L'interaction entre les agents INCIDENT, ARRET et l'environnement définissent les actions qui vont être évaluées puis fournies au régulateur.

#### **2.2.1.6 Modèle à 4 étapes**

La procédure la plus répandue qu'utilisent les autorités de transport pour la modélisation des systèmes de transport étant le modèle à 4 étapes qui a pour objectif de modéliser le transport urbain des personnes et des marchandises.

Comme son nom l'indique, cette modélisation s'effectue en quatre étapes qui sont précédées par une estimation de la population, grâce à des enquêtes de type Origine/Destination (O/D) ou Cordon (paragraphe 2.2.1.1).

Ces quatre étapes sont exprimées comme suit :

- Génération du flux : il s'agit dans cette étape de générer les flux émis. Cette génération peut s'effectuer de façon normative, catégorielle ou par régression. Il y aura dans cette phase une estimation vers et depuis chaque zone.
- Distribution zonale : au cours de cette phase, il s'agit d'estimer la matrice O/D en la construisant. Il existe essentiellement deux méthodes pour représenter le volume de déplacement entre chaque couple de zones à savoir le modèle gravitaire et le maximum

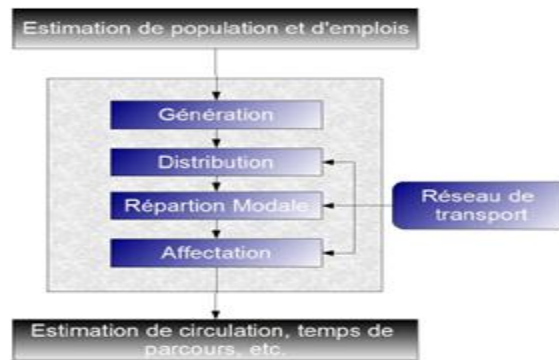


Figure 2.1: Modèle à 4 étapes

d'entropie.

- Répartition modale : Cette phase traduit l'éclatement de la matrice O/D obtenue, en la répartissant selon les modes, cela permet d'estimer pour chaque mode le volume de déplacement. Généralement, on adopte des modèles désagrégés de choix discret (ex. Logit, probit).

- Affectation : une fois la part en déplacement de chaque mode définie, on attribue la charge sur les arcs du réseau pour chaque mode.

La phase de modélisation permet de cerner les différents éléments d'un problème de transport. La résolution de ce dernier s'effectue en fixant des fonctions objectifs dans le but de trouver les solutions optimales.

Dans le paragraphe suivant nous nous focalisons sur les problèmes d'optimisation ainsi que les méthodes de résolution de ces problèmes.

## 2.2.2 Optimisation des problèmes de transport

### 2.2.2.1 Problème d'optimisation

Un problème d'optimisation a pour objectif de réaliser une adéquation entre les données du problème et ses contraintes à travers une minimisation ou maximations de fonctions objectifs. Une classification des problèmes d'optimisation en fonction des



caractéristiques du problème (variable de décision, fonction objectif, formulation du problème)[Zga07] est résumée dans le tableau 2.2.

Caractéristiques du problème			Type du problème
Variable de décision	Nombre	1	monovariable
		>1	multivariable
	Type	Nombre réel continu	continu
		Nombre entier	entier ou discret
		Permutation sur un ensemble fini de nombres	combinatoire
Fonction objectif	Type	Fonction linéaire des variables de décision	linéaire
		Fonction quadratique des variables de décision	quadratique
		Fonction non linéaire des variables de décision	non linéaire
Formulation du problème	Type	Avec des contraintes	contraint
		Sans contraintes	non contraint

Figure 2.2: Tableau récapitulatif des problèmes d'optimisation (Source: Thèse de doctorat de H. Zgaya)

#### 2.2.2.2 Les problèmes d'optimisation multiobjectif

Dans certains systèmes réels, cet aspect représente la majorité des cas abordés dans les applications industrielles, dans le transport ou encore dans les problèmes de décision, les preneurs de décision voudraient gérer plus qu'un objectif dans la résolution de leurs problématiques. Ces problèmes s'inscrivent dans le cadre des problèmes plus complexes à résoudre à savoir : les problèmes d'optimisation multiobjectifs.

Des disciplines variées ont besoin de méthodes de résolutions performantes pour considérer les différents objectifs visés par le décideur.

a) Présentation d'un problème multiobjectif :

En considérant un problème de minimisation de façon générale, sa formulation se présente comme suit :

*Minimiser*

$$f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)\} \quad x \in S$$

$x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ : représente Un vecteur de variables de décision de dimension  $n$ .

$S$ : ensemble de solutions réalisables.

Un problème d'optimisation tient compte également des différentes contraintes du problème ce qui se traduit par une formulation plus adaptée et adoptée :

$$\text{Minimiser } \vec{f}(\vec{x})$$

tel que

$$\vec{g}(\vec{x}) \leq 0 : \text{représente les contraintes d'inégalité.}$$

$$\vec{h}(\vec{x}) = 0 : \text{représente les contraintes d'égalité.}$$

$$\text{avec : } \vec{x} \in \mathbb{R}^n, \vec{f}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^m, \vec{g}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^q \text{ et } \vec{h}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^p.$$

Où  $m$  représente le nombre des fonctions objectifs,

$q$  le nombre de contraintes d'égalité

et  $p$  le nombre de contraintes d'inégalités.

Les objectifs à satisfaire sont généralement assez différents voir contradictoires. De ce fait, la solution à un tel problème correspond à un ensemble de points présentant le meilleur compromis, cet ensemble est nommé : *Pareto-optimal* ou *front Pareto*.

Pour faire ressortir les meilleurs compromis, il est nécessaire d'établir un ordre entre ces éléments de solutions, cet ordre correspond à la *relation de dominance*.

### **La dominance:**

Dans la littérature, il existe différentes types de dominances, cône-dominance [CS02] a-dominance [Oth98] etc.

La plus connue étant la dominance au sens de Pareto qui a été développée par Goldberg [Gol89] qui suggère que la relation de dominance au sens de Pareto va faire converger l'ensemble de solutions possibles à un ensemble de solutions efficaces.

Pour introduire ce principe, il faut définir le principe d'une relation de dominance :

On note par  $\prec$  la relation de dominance,  $a \prec b$  signifie que **a domine b**.

$$x \in E \text{ domine } x' \in E \text{ si } \forall i, f_i(x) \leq f_i(x')$$

avec au moins un  $i$  tel que  $f_i(x) < f_i(x')$ .

### **La dominance au sens de Pareto:**

\* Solution optimale au sens de Pareto :

Les solutions dominantes dominent les autres mais ne se dominent pas entre elles.

\* Optimalité globale au sens de Pareto :

C'est ce qui définit une solution efficace  $f(x)$  ; une solution est dite globalement optimale s'il  $\nexists y \in \mathbb{N}, y \prec x$ .

\* Optimalité locale au sens de Pareto :

Une solution est dite localement optimale au sens de Pareto si, pour un  $\delta > 0$  fixé  $\nexists y \in \mathbb{N}, f(y) \in B(f(x), \delta)$  et  $y \prec x$  où  $B(f(x), \delta)$  représente une boule de centre  $f(x)$  et de rayon  $\delta$ . (Fig.2.3).

Dans la suite, nous présentons une revue de littérature des méthodes de résolution des

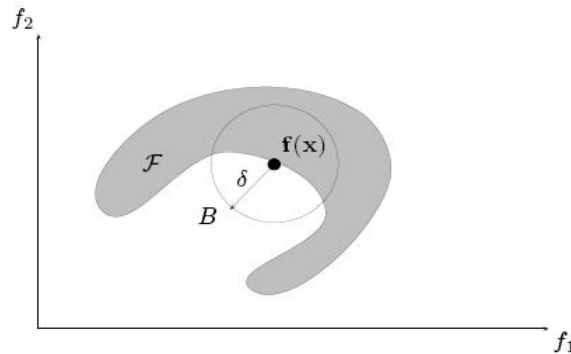


Figure 2.3: Optimalité locale au sens de Pareto

problèmes d'optimisation multiobjectifs dans le contexte des systèmes de transports multimodaux.

### A. Les méthodes de résolution

Un problème d'optimisation est caractérisé par un certain nombre de variables ce qui définit par conséquent la complexité du problème. Cette dernière détermine le recours à une méthode au détriment d'une autre. La résolution de tels problèmes peut donc se faire de deux manières. Soit par le moyen des méthodes exactes ou par des méthodes approchées. Nous présentons dans la suite le principe de ces méthodes.

#### a) Les méthodes exactes

L'avantage de ces méthodes est qu'elles permettent de trouver la solution optimale d'un problème. Nous énumérons certaines méthodes couramment utilisées en recherche

opérationnelle :

- La méthode Simplex : il s'agit d'un outil de recherche d'optimum en programmation linéaire. En parcourant l'espace de recherche sommet par sommet, le meilleur sommet qui fournit la meilleure solution pour la fonction objectif est retenu. Lorsque plusieurs sommets adjacents fournissent la meilleure solution. Cette sélection est nommée : règle de pivotage.
- Branch and Bound (évaluation et séparation progressive): cette méthode permet d'éliminer les mauvaises solutions. En partant de la racine (ensemble de solutions initiales), les bornes inférieures et supérieures délimitent les solutions. Une solution optimale est retrouvée lorsqu'il y a égalité entre les bornes inférieures et supérieures. Cette méthode est appliquée dans les problèmes de voyageur de commerce, d'ordonnancement, d'affectation, etc.
- Programmation dynamique : le principe de cette méthode est que la solution optimale d'un problème est déduite à partir de la solution d'un sous problème. La résolution par cette méthode peut s'effectuer soit de manière itérative ou récursive. En remontant le problème à l'envers par rapport à sa construction. Par exemple, le problème du sac à dos ou encore la théorie des jeux sont résolus au le moyen de la programmation dynamique.
- Programmation polyédrale : la résolution d'un problème d'optimisation par l'approche polyédrales s'effectue selon quatre étapes. La solution est d'abord représentée par des vecteurs qui vont déterminer ensuite les points d'un domaine. Une enveloppe convexe sera construite en suivant ces points. Au cours de la troisième étape, on définit un système d'égalités linéaires pour enfin appliquer la programmation linéaire. Delorme[Del00] rajoute à ce propos que des applications génériques permettent d'aider à résoudre des problèmes d'optimisation en appliquant ces méthodes. A titre d'exemple AMPL, CPLEX, LINDO, MPL, OMP, XPRESS.

#### b) Les méthodes approchées

Dans un contexte temps réel, la réponse à certaines situations est fortement liée aux contraintes de temps et de ressources du problème. Des problèmes qualifiés de Non déterministes polynomiaux (NP) difficiles couvrent des problèmes de décision dont on ne connaît pas un algorithme de résolution ayant une longueur polynomiale. Par contre, pour ce type de problème, on connaît un algorithme de résolution qui permet de savoir si une proposition donnée est une solution à ce problème.

De ce fait, il existe des algorithmes, appelés *les heuristiques*, qui fournissent rapidement une solution réalisable mais qui n'est pas nécessairement optimale. Ces heuristiques peuvent traiter certains problèmes particuliers. La résolution d'un plus grand nombre de problèmes s'effectue à l'aide d'algorithmes plus puissants appelés *les Métaheuristiques*. Freville[Fre00] classifie ces méthodes selon des catégories différentes :

- Méthodes constructives : algorithme Glouton, méthode Pilote, GRASP,
- Méthodes de recherche locale : recuit simulé [KGV83] algorithmes de descente, multi-départs, algorithme à seuil, méthode de bruitage, recherche Tabou[Glo89],
- Méthodes évolutionnistes : algorithmes génétiques [Holland, 1975], algorithmes de colonies de fourmis [DS04] méthode des chemins, algorithmes d'évolution, algorithmes bio-inspirés, recherche dispersée.
- Réseaux de neurones : réseaux auto-adaptatifs, machine de Boltzmann, modèle de Hopfield-tank, réseau élastique.
- Heuristiques Bayésiennes (optimisation globale, optimisation discrète).
- Superposition (perturbation des données, perturbation des paramètres d'une heuristique).

Il est à noter que l'utilisateur a le choix de se baser sur une de ces méthodes en se ramenant à son bon sens, parfois il est nécessaire d'utiliser plusieurs méthodes pour obtenir un résultat satisfaisant.

## **B. Les méthaheuristiques**

Ces algorithmes puissants permettent de résoudre un bon nombre de problèmes complexes. Le terme méthaheuristique traduit le fait que ces algorithmes regroupent plusieurs heuristiques et pour accélérer leurs convergences, ils sont souvent combinés à d'autres algorithmes.

Les méthaheuristiques ne requièrent pas des connaissances à priori du problème à résoudre mais peuvent fournir des solutions à ces problèmes en fixant une ou plusieurs fonction(s) objectif(s).

Les méthaheuristiques utilisées dans les problèmes d'optimisation s'inspirent de phénomènes naturels où ils recherchent à reproduire les caractéristiques de diversification et d'évolution.

Les algorithmes génétiques et évolutionnaires s'inspirent de la biologie dans l'évolution des individus et la compétition entre eux pour continuer à exister (Théorie de Darwin). Les meilleurs individus donnent ensuite des descendance qui hériteraient des gènes de la population en cours.

L'algorithme de colonies de fourmis prend ses sources de l'éthologie. Il s'agit d'une adaptation du comportement des fourmis qui partent à la recherche de leur nourriture. Cet algorithme a ensuite servi à résoudre les problèmes de recherche du plus court chemin.

Les phénomènes physiques ont également enrichi le panel des méthaheuristiques à travers le recuit simulé issu à la base de l'observation des procédés dans la métallurgie, et qui vise à minimiser une fonction.

### **a) Les méthaheuristiques évolutionnaires**

Les algorithmes évolutionnaires appliquent le principe de l'évolution des individus, ils sont régis par des mécanismes de codage, de mémorisation, de diversification ainsi que d'un critère d'arrêt. Nous détaillons dans ce qui suit l'algorithme génétique (AG) qui fait parti des méthaheuristiques évolutionnaires les plus utilisées.

#### *Les algorithmes génétiques*

Principe:

Par analogie à l'évolution biologique, on parle de chromosomes constitués de gènes

qui sont hérités au cours des générations (chaque itération de l'algorithme produit une génération). Ces chromosomes représentent les solutions formant la population initiale. Les algorithmes génétiques procèdent à l'évolution des individus en suivant ces étapes :

**L'initialisation de la population** la population est générée soit de façon aléatoire ou avec des individus préalablement optimisés. Cette optimisation peut parfois limiter la diversité des individus et n'est donc pas toujours sollicitée. Au cours de cette étape, les solutions sont codées et le choix du codage influe sur l'efficacité de l'algorithme. La taille de la population est également définie, elle doit assurer le compromis entre le temps de calcul et la qualité des solutions trouvées. Il existe plusieurs types de codage, nous citons, le codage binaire (le plus utilisé), codage par arborescence, codage par caractères, etc.

**L'évaluation des individus de la population initiale** au cours de cette phase, on détermine la ou les fonctions objectives qu'on cherche à optimiser. Le critère d'évaluation peut s'agir d'une minimisation de fonction coût (temps, revenus, distance, etc.).

**La sélection** il existe deux façons de procéder dans la sélection: \* l'élitisme : il s'agit de trier l'ensemble de la population de façon déterministe, les mauvais individus sont écartés et les meilleurs sélectionnés.

\* Donner une chance aux individus moins bons tout en favorisant les meilleurs individus.

La technique utilisée dans l'élitisme est de sélectionner les premiers suite à un tri des individus. Quant à la seconde manière de procéder, il existe différents techniques comme la sélection par tournois, sélection par roulette, sélection steady-state ou encore la sélection par rang.

**Le croisement (Crossover)** c'est l'étape qui suit la sélection, les individus choisis vont subir un mécanisme de reproduction suite à l'enjambement de chromosomes pour donner naissance à des enfants. Cette opération va se faire avec une probabil-

ité prédéterminée qui représente la fréquence de l'hybridation. Chaque enfant va hériter des gènes de ses parents.

Les techniques de croisement consistent à délimiter un ou plusieurs points pour le découpage et l'assemblage des génotypes. Les méthodes utilisées sont :

- Croisement en un point

Le schéma de la figure 2.4 illustre ce type de croisement.

Nous désignons par P1 et P2 les parents, E1 et E2 les enfants.

- Croisement en deux points

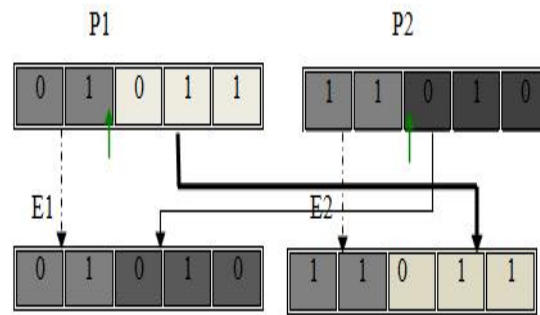


Figure 2.4: Exemple de croisement en un point

Afin d'illustrer le croisement en deux points, nous présentons dans la figure 2.5 un exemple détaillé. ○ Croisement en m points

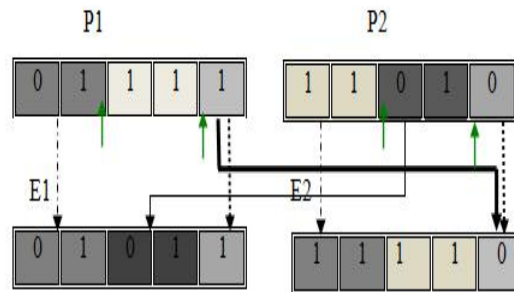


Figure 2.5: Exemple de croisement en deux points



Il faut dans ce cas généraliser la procédure précédente à  $m$  points de rupture.

**La mutation** Pour éviter que certains gènes ne se répandent au cours des générations en pénalisant d'autres conduisant à tomber dans des extrema locaux, l'opération de mutation est utilisée. Dans le but d'assurer une diversité génétique, la mutation s'effectue avec une certaine probabilité qui doit être assez faible pour ne pas changer radicalement les génotypes et assez puissante pour assurer l'effet souhaité. Dans certains cas, on peut choisir aléatoirement un gène et le remplacer par un autre.

**La création d'une nouvelle population** : la suite des successions subie par la population initiale (évaluation, sélection, croisement et mutation) donne naissance à une nouvelle population. Cette itération est ensuite répétée jusqu'à atteindre un des critères d'arrêt fixés ou aboutir à des solutions ayant une performance supérieure à un seuil satisfaisant.

La figure 2.6 présente un organigramme d'un algorithme génétique standard. Dans cet organigramme, nous retrouvons les étapes détaillées précédemment

#### b) Les métaheuristiques par recherche locale

Le principe de ces métaheuristiques est de procéder à des itérations en explorant le voisinage afin d'éviter les extrema locaux.

Le voisinage est souvent présenté sous la forme d'une application, le choix de cette fonction s'effectue en tenant compte des caractéristiques du problème à traiter. Néanmoins, la procédure de détermination du voisinage nécessite un traitement délicat. La taille du voisinage ne doit pas excéder celle de la mémoire allouée dans la procédure de calcul. Un autre aspect important réside dans l'évaluation des voisins, la rapidité de l'évaluation est exigée lorsque le nombre de voisinage est important. La topologie du voisinage subit au cours des itérations des mouvements afin de choisir le voisin "proche de  $x$ " selon l'évaluation donnée.

Cette recherche locale s'effectue par le moyen de diverses méthodes, de la plus élémentaire : la méthode de descente aux heuristiques comme la recherche tabou ou le recuit

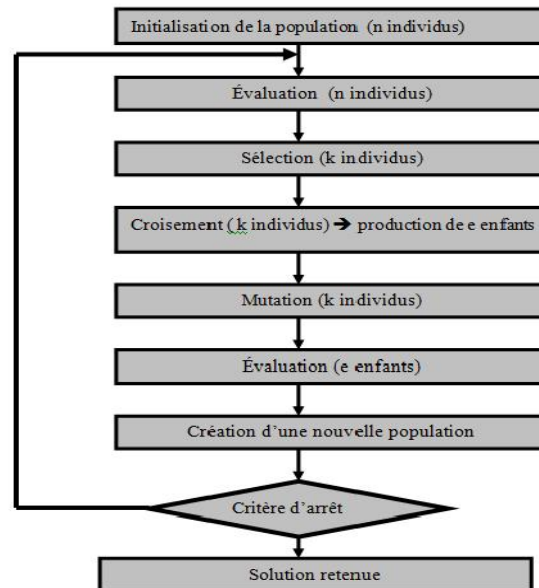


Figure 2.6: Principe d'un algorithme génétique

simulé.

#### - Méthode de la descente

L'avantage de cette méthode couramment utilisée est d'appréhender rapidement le minimum global d'une fonction.

Principe :

A partir d'un point initial  $x_0$ , la méthode consiste à atteindre  $x' \in N(x)$  qui vérifie  $f(x') < f(x)$ ; avec  $f$ : la fonction d'évaluation;  $x'$  devient le nouveau point de départ de l'algorithme. Cette méthode donne très vite un premier optimum, sauf que cet optimum peut ne pas être le même si la structure du voisinage était différente. Pour remédier à cet inconvénient, il est possible de réaliser des mouvements sur le voisinage en acceptant un voisin  $x'$  qui vérifie  $f(x') \geq f(x)$ . Une autre manière de procéder à la diversification de la solution optimale est de relancer l'algorithme à partir d'un autre point initial.

#### - La recherche tabou

L'efficacité de cette méthode préconise un bon compromis entre l'exploitation et l'exploration à travers la diversification et l'intensification[Bar03].

Initialement présentée par Glover[Glo89], les applications de la recherche tabou se sont

diversifiées au cours de ces années pour couvrir les problèmes de sac à dos ou encore le coloriage des graphes.

Cette méthode repose, tout comme la méthode par descente, sur l'exploration du voisinage, elle est caractérisée par la présence d'une mémoire, appelée liste tabou, qui permet d'éviter au cours des itérations de retomber sur un minimum local précédemment exploré. Cela conduit à empêcher l'algorithme de passer par des points visités ; Il faut faire un choix judicieux quant à l'allocation de la taille de la liste tabou, d'où l'intérêt d'utiliser des listes dynamiques[GGPS02] dans certaines configurations du voisinage ou encore de ne garder dans cette liste que les mouvements qui sont interdits à reproduire plutôt que les solutions interdites.

Cette métaheuristique a été utilisée dans le domaine du transport à travers plusieurs problématiques. Nous citons dans ce contexte les travaux de Descotes-Genon[Dg05] qui s'est focalisé sur un problème de tournées de véhicules appliqué au transport de marchandises.

Principe :

Initialiser une liste tabou  $T$ ,

A partir d'une solution initiale  $x$ , explorer le voisinage  $N(x)$ , s'il existe  $x' \in N(x)$  tel que  $f(x') < f(x)$ , retenir  $x'$  même s'il est plus mauvais que  $x$ , recommencer l'opération en partant de l'optimum  $x'$  jusqu'à atteindre un critère d'arrêt donné tout en évitant les mouvements conduisant aux solutions archivées dans la liste tabou.

Les performances de cette méthode peuvent être améliorées grâce aux opérateurs d'intensification et de diversification. Le premier opérateur a pour objectif d'accentuer la recherche dans des zones où les caractéristiques sont semblables à celles trouvées dans les meilleures solutions alors que le deuxième opérateur vise à favoriser les recherches dans des zones qui n'ont pas été explorées. Il est parfois envisageable de retirer certains mouvements de la liste tabou pour débloquer une situation cyclique, cette technique est appelée : l'aspiration.

#### - Le recuit simulé

Kirkpatrick[KG83] a utilisé un procédé de métallurgie dans une démarche d'optimisation. Ce procédé c'est le Recuit. Il s'agit de chauffer et de refroidir ensuite un métal pour lui donner une certaine forme et ceci de façon itérative. Dans un problème

d'optimisation on assimile la fonction objectif à l'énergie du système, on introduit un autre paramètre qui traduit la température.

Nous présentons dans la suite le principe de cet algorithme.

Principe :

Basé sur l'algorithme de Métropolis et la distribution de Boltzmann, le recuit simulé préconise de partir d'une température initiale qui soit élevée et de la diminuer petit à petit. L'exploration du voisinage est régie par certaines règles, la probabilité du choix du voisin suit la distribution de Boltzmann suivante:  $p(T, x, x') = \exp \frac{f(x) - f(x')}{T}$ .

On distingue les cas suivants

- $T$  suffisamment élevée  $\exp \frac{f(x) - f(x')}{T} \cong 1$ ,  $x'$  a de fortes chances d'être accepté.
- $T$  petite et  $f(x) > f(x')$ ,  $\exp \frac{f(x) - f(x')}{T} \cong 0$ ,  $x'$  est fort probablement refusé.
- $f(x) < f(x')$ ,  $\exp \frac{f(x) - f(x')}{T} > 1$ ,  $x'$  est sûr d'être accepté.

L'étape initiale est de choisir une solution initiale ainsi qu'une température initiale.

Par la suite on choisit un voisin  $x' \in N(x)$  et on génère un nombre aléatoire dans  $[0,1]$ .

Si ce nombre est inférieur à  $p(T, x, x')$  alors on garde  $x'$  comme solution optimale. Cette procédure sera itérée tant que la température est supérieure à un seuil fixé.

La difficulté de manipulation d'un tel algorithme réside dans le paramétrage des entrées de l'algorithme comme la température initiale ou encore la loi de décroissance de la température.

Les méthodes de recherche locale ne se résument pas aux trois algorithmes cités ci-dessus (méthode de la descente, le recuit simulé et l'algorithme tabou), il existe également d'autres méthodes à savoir le GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure), RVV (la Recherche à Voisinage Variable) ou encore la recherche locale guidée.

### C. L'hybridation

L'amélioration des performances des heuristiques citées précédemment peut entre autres s'effectuer en hybridant certaines méthodes, les algorithmes évolutionnaires ont justement fait l'objet d'hybridation. A titre d'exemple, les algorithmes génétiques et le recuit simulé sont appliqués pour résoudre des problèmes similaires et comme il s'agit de deux méthodes stochastiques, les chercheurs ont jugé utile de profiter des avantages de chacune des méthodes en améliorant les limites de l'autre.

L'hybridation s'effectue au niveau de l'opérateur de mutation qui sera remplacé par une méthode de recherche locale. Ce remplacement, va assurer la diversification en étendant l'espace de recherche. L'algorithme évolutionnaire, quant à lui va structurer la démarche de cette recherche de l'optimum.

### **2.2.2.3 Optimisation des problèmes de transports multimodaux**

Une des principales orientations dans la recherche scientifique des équipes ID (du laboratoire LAGIS de l'Ecole centrale de Lille) et SP (du laboratoire LAMIH de l'Université de Valenciennes, du Cambrésis et du Hainaut) est le transport. En abordant des problématiques réelles touchant au réseau de transport de la région, des méthodes innovantes qui relèvent de la recherche opérationnelle et de la modélisation multi-agents ont été validées. Nous donnons dans la suite, par ordre chronologique la liste des travaux qui ciblent, en particulier, la résolution des problèmes de régulation :

- \* Soulhi [Sou] s'est servi de modèles basés sur la logique floue pour résoudre la problématique des correspondances à travers un module d'aide à la décision,
- \* Laichour[Lai02] a concentré ses recherches sur la régulation des correspondances par le biais d'actions de régulation,
- \* Fayeche[Fay03] a adopté une structure de multi-agents afin de réaliser un système d'aide à la décision pour résoudre la problématique de régulation du réseau de transport multimodal en mettant l'accent sur un agent perturbation.
- \* Petit-Rozé[CPR] s'est intéressé au module d'information voyageurs dans un système de transport multimodal à travers une organisation multi-agents,
- \* Ould Sidi[Oul06] en coopération avec le fournisseur de service de transport de Valenciennes " TransVilles ", a élaboré un module d'aide à la décision qui appuie le régulateur dans les décisions à entreprendre en cas de perturbations à travers une évaluation multi-critère.

#### 2.2.2.4 Des problèmes types d'optimisation dans le transport

a) TSP (Travel Salesman Problem) ou Problème de Voyageur de Commerce :

Les chercheurs ont quadrillé cette problématique depuis plus d'un siècle. Le problème se présente comme suit : sachant que nous connaissons les distances entre les villes, le voyageur de commerce doit visiter chaque ville au plus une fois et se rendre à la ville qui était son point de départ. L'explosion des solutions à rechercher ont dissuadé les chercheurs jusqu'à l'apparition puis l'évolution des calculateurs puissants. Les méthodes de résolution de ce problème dépendent essentiellement de la taille des variables. Un nombre de villes réduit peut permettre d'utiliser une approche déterministe telle que les algorithmes :cutting-plane et facet-finding. Dans la littérature, c'est l'approche approximative qui est privilégiée en adoptant la méthode de gloton, la méthode élastique, l'algorithme génétique ou encore l'algorithme de colonies de fourmis.

b) VRP (Vehicle Routing Problem) ou Problème de routage de véhicules : Ce problème a été mis en place depuis plus de quarante ans par Dantzig et Ramser [DR59] l'ont énoncé pour la première fois, je cite : " the optimum routing of a fleet of gasoline trucks between a bulk terminal and a large number of service station ". Il s'agit, plus généralement, de résoudre de façon optimale un problème combinatoire décrit par un ensemble de routes avec une flotte de véhicules afin de servir un ensemble donné de clients.

Ce problème s'est élargi en subissant certains détails de contraintes, ce qui a donné naissance à plusieurs variantes à savoir : VRP à capacités (CVRP), VRP avec de multiples dépôts (MDVRP), VRP périodiques (PVRP), VRP avec possibilités de servir le même client par différents véhicules (SDVRP), VRP stochastique (SVRP), VRP avec possibilités de retourner certains produits (VRPB), VRP avec ramassage et livraison (VRPPD)[GGaET99] , VRP avec supervision par satellite, ainsi les véhicules ne sont pas obligés de retourner au dépôt central (VRPSF), VRP avec fenêtre de temps (VRPTW).

c) Dial-a-Ride problem: C'est l'annotation d'un problème de transport à la demande porte à porte, c'est une extension du problème de ramassage et de livraison (PDP : Pickup and Delivery Problem)[CL04][KDGH07]. La spécificité de ce problème est qu'il traite des contraintes différentes. En effet, il ne s'agit pas d'un transport de marchandises mais

de personnes ce qui implique des exigences de qualité différentes (personnes à mobilité réduite, patients) ainsi que des contraintes de temps ou de lieu de ramassage (embarquement) et livraison (débarquement).

## **2.3 L'optimisation des problèmes de transport cybernétiques**

### **2.3.1 Le transport à la demande**

Le transport à la demande est une notion qui a émergé ces dernières années en apportant des modifications du paysage urbain dans les pays industrialisés. Les définitions du transport à la demande (TAD) comportent certains éléments clés traduisant l'aspect flexible de cette offre de transport et le service personnalisé pour l'utilisateur. Nous avons retenu la définition proposée par Ambrosino [ANR04] qui définit le transport à la demande comme une : *"forme intermédiaire de transport qui se situe entre le bus et le taxi et couvre une large gamme de services de transport qui s'étend d'une modeste communauté de transport à un large réseau de service "*.

En France, la loi d'orientation sur les transports intérieurs définit le TAD comme un service de transport collectif de personnes, où les points d'arrêts, les itinéraires, les horaires et les fréquences sont flexibles et où seule la tarification doit être connue à l'avance.

Ce service est principalement dédié aux communes qui ne sont pas servies par un transport public régulier (commune à nombre réduit d'habitants par ex.), comme il peut être présent dans les milieux urbains afin d'aider les personnes défavorisées ou à mobilité réduite à se déplacer.

La majeure différence par rapport aux problèmes de transport classiques est que la phase de planification est quasi quotidienne concernant le transport à la demande. Par contre, l'exploitation des transports classiques obéit à des marches de services planifiées par saison, de façon mensuelle où par semaine. Les prestataires des services de TAD se multiplient en nombre pour répondre aux besoins de clients qui cherchent une mobilité multifonctionnelle en adoptant des modes de transport polyvalents qui sont prêts à combiner plusieurs modes de transport.

### **2.3.2 Les raisons du développement du transport à la demande dans le milieu urbain**

La société a connu une véritable évolution idéologique, économique et même environnementale. Cette évolution a influencé les habitudes en termes de mobilité en favorisant l'autonomie des individus. En effet, les sociétés industrialisées ont connu une dispersion dans l'espace due à l'extension de leurs vies professionnelles et aux modifications de la morphologie des villes. De plus, le souci d'augmenter le pouvoir d'achat a eu pour conséquence la flexibilité dans les périodes de travail (travail pendant les jours fériés, weekend, nuit, etc.).

Sur une autre échelle, le développement des TIC ne se limite pas à une évolution technologique mais a permis de créer des potentiels importants dans les transports urbains. Il existe d'ores et déjà une politique qui vise à mettre en place des systèmes de communication développés (téléphonie, WAP, RDSÉ) dans le but d'informatiser la gestion des services de transport et de créer des modules complémentaires dans la logique de cette gestion à savoir le système d'aide à l'information et le système d'aide à l'exploitation.

D'un autre côté, des phénomènes touchant à l'environnement alertent de plus en plus l'opinion publique (augmentation du nombre des catastrophes naturelles, pollution et émission de gaz à effet de serre, etc.), ce qui a conduit à fixer des exigences environnementales poussant les personnes à modifier leurs comportements et leurs habitudes de déplacements. Engager une démarche de développement durable pour les villes urbaines signifie que plusieurs secteurs doivent se plier aux exigences imposées dans le cadre de cette démarche y compris le secteur du transport.

Tous ces facteurs ont incité à une dispersion dans le temps couplée avec une dispersion dans l'espace et donc un horizon propice au développement de ces services.



### 2.3.3 Revue de littérature

Le problème d'optimisation du transport à la demande peut être traité selon plusieurs angles et selon la configuration du problème.

Un problème de TAD peut être assimilé à un problème Dial-and-Ride[CL04] (paragraphe II.2.2.4). Il peut également être vu comme un problème de voyageur de commerce de type NP-complet. En imposant des contraintes (fenêtres de temps), un problème de TAD peut aussi être considéré comme un VRPTW (Vehicle Routing Problem with Time Window) (paragraphe II.2.2.4.b). Nous rappelons qu'un problème VRP est une classe de problèmes d'optimisation combinatoire dans lesquels les clients sont servis par un certain nombre de véhicules.

Crainic[CMN] a mis l'accent sur un nouveau système de transport immergent qui fait côtoyer les lignes de transport préalablement fixées obéissant à des tableaux de marche fixes avec des lignes flexibles selon le besoin des usagers. Il a utilisé un modèle mathématique visant à optimiser le routage des véhicules et l'affectation des requêtes à ces véhicules. Ce modèle intègre un système de gestion de transport flexible.

A l'image de ces recherches, Liaw [LWB96] a développé un modèle qui résout un problème Dial-A-Ride bimodal incluant la gestion de bus à itinéraire fixé et des véhicules de transit. Zhou [eLL03] a proposé un cadre d'optimisation multiobjectif afin d'estimer la variation de la demande du trafic sur plusieurs jours.

## 2.4 Description du système de transport intégrant les Cybercars

Nous avons introduit les différents problèmes liés au transport appliqués aux modes de transports ordinaires (Bus, tramway, métro, etc.) ainsi que les recherches qui s'apparentent aux problèmes émergents du transport à la demande.

L'objectif de cette thèse est de présenter un environnement qui fait côtoyer ses deux catégories de modes de transport et de fournir des approches de gestion du système de réseau combinant les modes fortement régulés et les modes libres. Nous avons choisi un cadre de travail qui correspond au mieux à la nouvelle démarche de gestion du trafic. Il s'agit de se baser sur les nouvelles normes de transport tenant compte des spécificités

des transports intelligents.

Ces normes ont fait l'objet de l'architecture ACTIF que nous détaillons dans la suite.

### 2.4.1 L'architecture ACTIF

La plateforme ACTIF (Aide à la Conception des systèmes de Transport interopérables en France) est une architecture cadre de l'application des STI en France.

L'objectif global étant de favoriser l'interopérabilité, ainsi cette architecture permet de relier les différents éléments des STI en guise de fournir un modèle générique.

A travers deux types de constructions qui sont les diagrammes fonctionnels et les diagrammes de flux, ACTIF fournit un modèle qui ne tient pas compte des technologies utilisées mais de l'architecture des composants. Ce cadre considère la présence d'un environnement externe au réseau de transport à savoir : les utilisateurs humains (opérateurs, voyageurs), les systèmes électroniques de commande des véhicules, les banques et traitements financiers et les infrastructures de télécommunication. ACTIF est un outil puissant qui obéit aux normes des STI ; il permet d'aider les autorités de transport à monter des projets d'amélioration ou de création de plateformes efficaces à l'ère des STI. La figure 2.7 présente la structure du modèle ACTIF. Dans cette architecture, le système de transport est composé de neuf domaines caractérisant le transport qui sont :

- transport public,
- paiement électronique,
- gestion de fret et flotte,
- aide à la conduite,
- gestion des urgences,
- information sur les déplacements,
- gestion du trafic,
- respect de la réglementation,
- gestion des données partagées.

Dans l'architecture ACTIF nous retrouvons neuf domaines fonctionnels répartis comme suit :

a) Fournir des moyens électroniques de paiement :

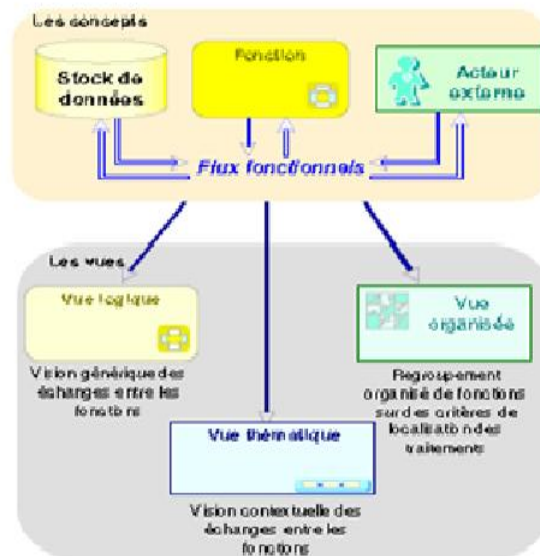


Figure 2.7: Structure externe du modèle ACTIF (source: [www.its-actif.org](http://www.its-actif.org))

Ce domaine fonctionnel comprend les fonctions qui permettent aux utilisateurs des services de transports d'acquies des droits d'accès à ces services puis d'y accéder effectivement dans des conditions contractuelles déterminées.

b) Gérer les services d'urgence et de sécurité :

La gestion des services d'urgence et de sécurité comprend les fonctions permettant aux Services d'Urgence de répondre aux incidents. Ce domaine doit être possible de donner la priorité à ces véhicules soit localement à chaque point de contrôle du réseau routier soit sous forme d'itinéraire à l'intérieur du réseau.

c) Gérer les infrastructures de transport et le trafic :

Nous retrouvons dans ce domaine les fonctionnalités permettant de gérer le trafic en zones urbaines et/ou inter-urbaines. Ce domaine est formé de fonctionnalités capables de détecter et de gérer les conséquences d'événements, de générer et de mettre en œuvre des stratégies de gestion de trafic et de gestion des déplacements, de superviser l'occupation des parkings et des aires de service, de gérer les équipements techniques des ponts et tunnels, ainsi que l'entretien et la maintenance du réseau et des équipements associés,

d) Exploiter les transports publics :

Ce domaine fournit des fonctionnalités de gestion des Transports Publics. Il inclut la gestion des tableaux de service et la génération d'informations que l'on peut mettre à la disposition des voyageurs,

e) Fournir des systèmes avancés d'assistance pour le conducteur :

Les systèmes avancés d'assistance ont pour objectif de contrôler les véhicules empruntant le réseau routier. Dans ce domaine, une fonction de supervision permanente des équipements de bord de route et embarqués (capteurs, systèmes de contrôle automatiques, etc.) relatifs à l'Assistance aux Conducteurs est élaborée,

f) Fournir des informations et gérer la mobilité multimodale :

Ce domaine offre des fonctionnalités capables de fournir à tous les types de voyageurs des informations sur les conditions de circulation et sur les autres modes de transport, ainsi que des fonctions de conseil et de calcul d'itinéraires et de planification du déplacement,

g) Faire respecter les réglementations :

La fonction principale dans ce domaine est de fournir une interface avec les Autorités d'Application de la Réglementation. Cette interface comporte des informations sur la fraude et les infractions détectées par des fonctions appartenant à d'autres domaines. Le type de fraude et d'infractions inclut, sans toutefois s'y limiter, les dépassements de vitesse, la mauvaise utilisation de voies et l'observation incorrecte d'autres commandes transmises aux conducteurs,

h) Gérer le fret et les flottes de véhicules :

Ce domaine se base sur trois niveaux qui, traités de manière synchronisées et par l'intermédiaire de processus itératifs, demeurent nécessaires au bon fonctionnement des opérations de transport commercial de fret dans un environnement ITS. Ces niveaux sont

- la gestion de la demande de transport de marchandises,
- la gestion globale de l'offre de transport de marchandises,
- la gestion continue des composants individuels de l'offre de façon à satisfaire la demande.

i) Gérer les données globales partagées :

La gestion des données globales partagées consiste à stocker les données statiques indis-

pensables pour le fonctionnement des systèmes de type Systèmes d'Aide à la Gestion du Trafic (SAGT) ou SAEIV (Système d'Aide à l'exploitation et à l'Information des Voyageurs).

La notion de référentiel comprend la gestion des données statiques qui permettent de décrire des réseaux.

En se basant sur le modèle ACTIF, nous proposons dans la suite une modélisation du système multimodal de transport intégrant les Cybercars.

#### **2.4.2 Modélisation d'un système de transport intégrant les Cybercars**

En analysant les domaines fonctionnels cités ci-dessus, il s'avère que des flux de données font la liaison entre certaines fonctions où on retrouve les transports publics et les services partagés. En effet, dans ACTIF, on désigne par partages de véhicules les services bénévoles ou payants :

- véhicules partagés sans chauffeur mis à disposition du public par des organismes publics et privés,
- covoiturage,
- taxis individuels ou collectifs,
- services d'ambulances,
- Etc.

Ce rapprochement entre les services de transport public et les services partagés s'effectue dans le but de réaliser une adéquation entre l'offre et la demande. Nous avons donc opté pour un modèle (figure 2.8) qui regroupe à la fois les transports publics et les cybercars et qui veille à les faire collaborer afin d'assurer une mobilité durable. Le modèle proposé relie des sous-domaines fonctionnels du modèle ACTIF où nous pouvons distinguer des flux de données qui interagissent entre eux. Ce modèle incorpore notamment un acteur externe qui est l'*Offreur de véhicules partagés*. En effet, le modèle ACTIF propose, autre que les transports publics, d'autres alternatives pour satisfaire les

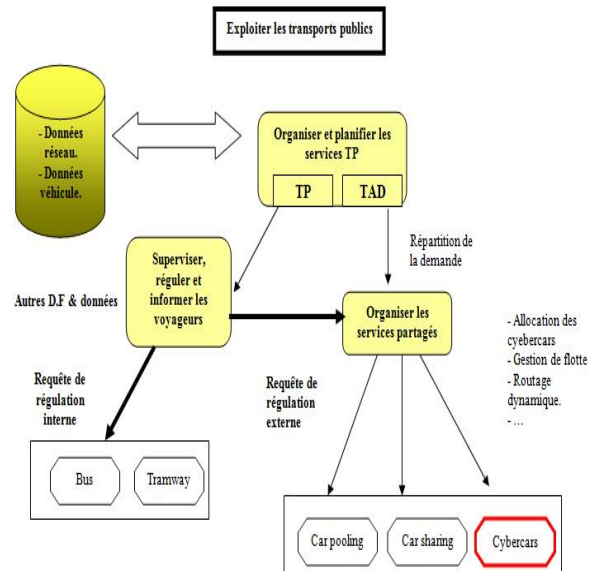


Figure 2.8: Modélisation selon ACTIF du système de gestion des transports publics intégrant les Cybercars

demandes des usagers. Il peut s'agir de particuliers qui utilisent leurs véhicules pour des fins de covoiturage ou bien des artisans ou autres organismes qui fournissent aux usagers des véhicules avec ou sans conducteur et avec ou sans services associés. D'où la possibilité d'assurer ces services de transport au moyen des Cybercars. Ce nouveau service peut également être assuré par le Carpooling et bien entendu le Carsharing.

La liaison entre les offreurs de véhicules partagés et les transports publics s'effectue au niveau du domaine fonctionnel " *Exploiter les transports publics* " (II.4.1.d) représenté par la figure suivante : L'organisation dynamique de ce service se fait en ajustant les déplacements des modes de transport public en fonction de la demande tout en assurant un rapprochement offres demandes.

#### ***Répartition de la demande en transport :***

Les autorités de transport classifient la demande en déplacement selon leur étendue dans le temps :

- demande prévue à l'avance (long terme)

- demande occasionnelle (moyen terme)

- demande urgente (court terme)

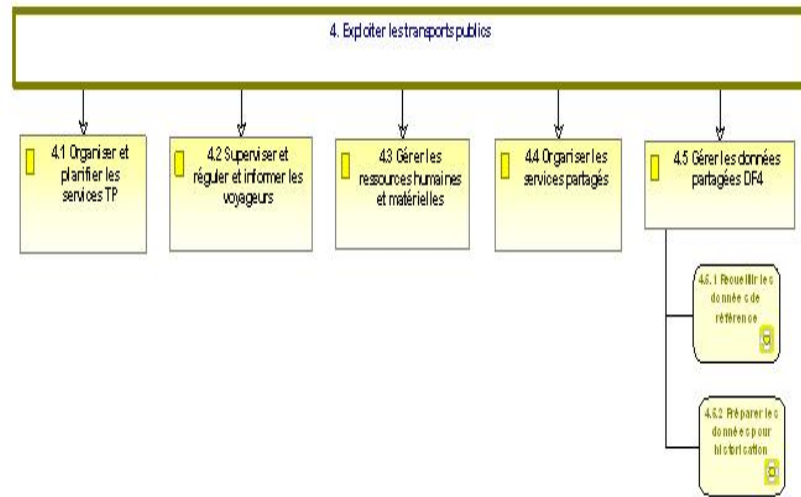


Figure 2.9: Domaine fonctionnel: Exploiter les transports publics

La phase de planification est l'étape en amont dans un système de gestion de transport. Elle consiste à établir une recette prévisionnelle du trafic et ceci à travers des données telles que : l'état des lieux des modes de transport et de l'infrastructure, les orientations futures des développements urbains et les flux de déplacements.

Les données de planifications concernent les transports publics, les services réguliers, les services spéciaux et les services à la demande. Elles seront diffusées par la suite sous forme de planning d'affectation des ressources humaines et matérielles. La présence d'un incident dans le réseau de transport urbain implique plusieurs actions/réactions qui doivent être gérées par le régulateur. Ce dernier a la tâche de générer des actions de régulation qu'il communiquera aux acteurs du réseaux à partir des données de supervision et de régulation et les communications qu'il a avec les conducteurs entre autres.

L'enchaînement classique d'un scénario d'exploitation débute par un signalement par un conducteur de la présence d'un incident qui mènera à l'arrêt du véhicule concerné. Le régulateur intervient donc en engageant des procédures d'agrégation de données et en se référant à la situation actuelle pour fournir une action de décision parmi celles

répertoriées dans Transmodel<sup>1</sup>: la référence européenne pour les modèles conceptuels de données dans le secteur des transports publics Cette action va entraîner une modification des courses planifiées auparavant: les conducteurs et les voyageurs en seront informés.

Nous distinguons dans notre modèle deux types de requêtes de régulation :

### ***Les requêtes de régulation internes (RRI)***

Les actions de décision qui impliquent des véhicules de transport publics (tramway, bus) sont considérées comme des Requêtes de Régulations Internes. A titre d'exemple, la suppression ou la création de course, la résorption, le haut le pied hors ligne, etc.). Les actions relatives aux modes bus et tramway sont détaillées ultérieurement en III.3.5. Dans des cas où des perturbations simultanées surviennent, le recours à d'autres alternatives s'avère fructueux. Des études ont montré que les perturbations les plus critiques sont celles où le tramway subit un incident. L'arrêt immédiat des rames comme procédure d'urgence entraîne des opérations lourdes pour rétablir l'ordre car l'injection de nouvelles rames provenant du dépôt n'est souvent pas la solution efficace. D'autre part, lorsque des perturbations touchent des lignes différentes, l'horizon de régulation est considérablement élargi. Dans ce cas, les actions de retard/avance qu'on applique pour les bus demanderont plus de temps pour rétablir le fonctionnement normal de marche de services de transport selon la longueur de la ligne affectée.

Ces raisons mènent à la conclusion qu'il est judicieux d'apporter de nouvelles mesures de régulation aux réseaux de transport urbains.

### ***Les requêtes de régulation Externes (RRE)***

Au niveau de l'exploitation des transports publics, nous distinguons un flux de donnée " action de régulation " qui pourrait s'introduire comme une entrée pour le recueil de la demande en services partagés. C'est à ce niveau que l'interaction entre les transports publics et les services partagés sera active. En effet, l'organisation des services partagés

---

<sup>1</sup>[www.transmodel.org](http://www.transmodel.org)



se fait en trois fonctions :

- recueil de l'offre et de la demande,
- organisation du partage des véhicules,
- adressage du rapprochement offre/demande aux intéressés.

C'est au niveau du recueil de l'offre et de la demande des services partagés qu'une requête de régulation externe est envoyée par le régulateur dans le but de déclencher une stratégie d'exploitation visant à faire intervenir les cybercars pour résoudre une perturbation détectée.

La flotte de cybercars peut néanmoins subir des perturbations, des approches de résolution du problème de routage basées sur des algorithmes bio-inspirés font l'objet de recherche de l'équipe SP de l'université de Valenciennes et [MDS<sup>+</sup>07].

### 2.4.3 Outil Simplifié de Création d'Architectures multiprojets (OSCAR)

Le portail de l'architecture ACTIF inclut outre la description des normes sur les systèmes de transports intelligents un outil logiciel appelé OSCAR (figures 2.10 et 2.11) qui permet de créer des architectures nouvelles pouvant être soit indépendantes du modèle global soit inspirées de modèles existants. La construction d'un projet s'effectue selon



Figure 2.10: Logiciel Oscar

six étapes :

1. définition des entités internes
2. définition des entités externes
3. définition des projets
4. définition des liens
5. réalisation des diagrammes
6. génération des documents

## **2.5 Vers la mise en place d'un système de transport intelligent basé sur la l'intégration des Cybercars**

La résolution des perturbations qui peuvent affecter le réseau de transport public à travers un processus de régulation nécessite le recours à des stratégies d'exploitation avancées et en adéquations avec les exigences du développement durable. Dans ce contexte, nous proposons d'intégrer les cybercars dans le processus de régulation des systèmes de transports publics à travers la mise en place d'une stratégie d'exploitation avancée assurant le transfert des passagers pour remédier aux perturbations. Il s'agit d'utiliser une manœuvre de régulation suite à la demande d'une RRE, nous avons baptisé cette manœuvre " système Noria " que nous détaillons en III.3.5.3.

## **2.6 Conclusion**

Au cours de ce chapitre, nous avons visité différentes méthodes d'optimisation de problèmes multiobjectif et modèles de conception pour les systèmes de transport. En effet, la régulation d'un système de transport qui intègre une flotte de cybercars implique différents critères (objectifs) à prendre en compte dans le processus d'optimisation. Ces critères sont dictés par les autorités de transport dans le but d'assurer une qualité de

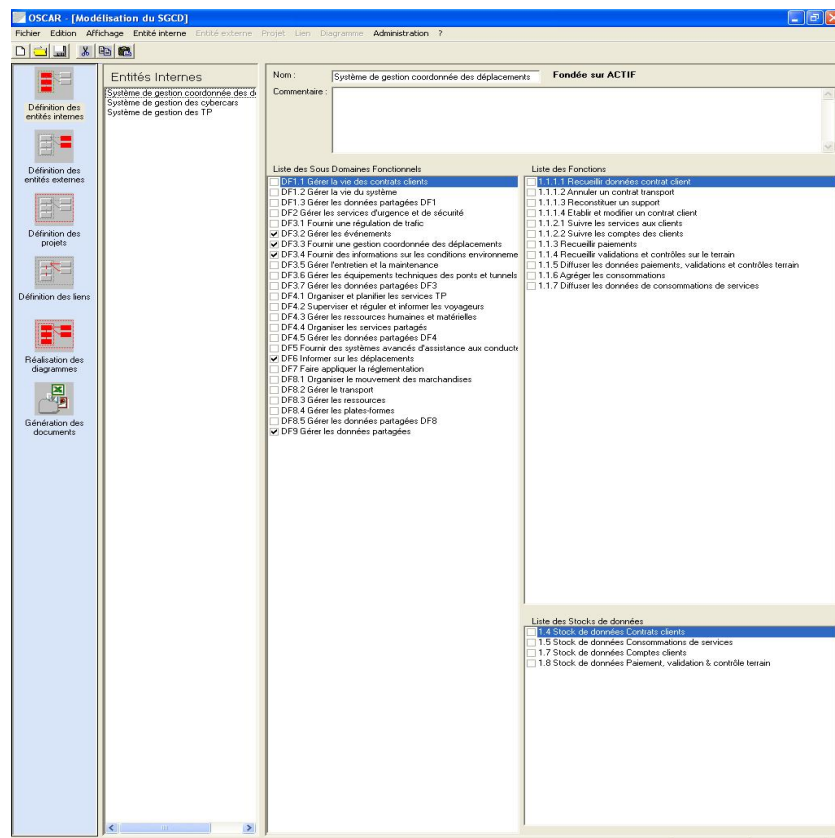


Figure 2.11: Logiciel Oscar

service aux usagers à la hauteur des attentes des clients et des fournisseurs de service de transport. Dans le chapitre suivant, nous abordons l'approche proposée de régulation à travers la mise en place d'un système d'aide multicritère à la décision où nous intégrons le système Noria.

## **CHAPITRE 3**

### **SYSTÈME D'AIDE MULTICRITÈRE À LA DÉCISION PROPOSÉ ET ÉVALUATION DES CRITÈRES DE RÉGULATION PAR L'INTÉGRALE DE CHOQUET**

#### **3.1 Introduction**

Le problème de régulation des systèmes de transport nécessite des procédures complexes pour pallier aux perturbations multiples qui surviennent de façon aléatoire dans les réseaux de transports. Ces perturbations causent ainsi des retards par rapport aux tableaux de marches théoriques affichés aux utilisateurs et dégradent de ce fait la qualité de service. La présence d'actions de régulation (qui concernent les bus et le tramway) comme moyen de résorber les retards et de ramener le fonctionnement normal du trafic, n'exclut tout de même pas l'incapacité de ces actions de répondre aux exigences de la demande accrue de voyageurs. En effet, les moyens de transports fortement régulés obéissent à des contraintes assez rigides (limites de l'infrastructure, obligation de suivre les tableaux de marches, limitations des ressources et du personnel, etc). Nous proposons ainsi d'optimiser l'intervention du régulateur à l'aide d'un système d'aide à la décision informatisé, réactif, qui ne se contente pas d'apporter des actions de régulation faisant intervenir les moyens de transports publics mais qui étend les alternatives d'actions à la proposition d'actions de régulations externes via la mise en place de système noria. En premier lieu il s'agit de trouver les alternatives possibles qui, à une configuration du réseau perturbé, apporteront des modifications susceptibles de rétablir la configuration " normale ", mise en place après la phase initiale de planification. Ce chapitre est formé comme suit : le paragraphe suivant introduit l'interaction entre les moyens de transport dans un cadre global.

En paragraphe III.3 nous détaillons la structure des systèmes de gestion d'un réseau de transport basé sur les STI. Nous détaillons également dans ce paragraphe les composants de ces systèmes à savoir les systèmes d'aide à l'exploitation, les systèmes d'aide

à l'information et nous terminons par l'impact des perturbations sur le système de gestion.

Dans le paragraphe III.4, nous présentons la structure des systèmes de gestion du réseau des transports à la demande. En paragraphe III.5, nous présentons les manœuvres de régulation relatives aux bus et au tramway ainsi que la stratégie d'exploitation avancée que nous proposons. Le besoin d'un système d'aide à la décision comme élément à part entière vu la complexité des démarches de régulation, nous mène à présenter l'approche d'agrégation des critères dans le paragraphe III.6. La formulation mathématique du problème d'intégration des cybercars dans un système de transport multimodal ainsi que les détails de l'algorithme d'optimisation multiobjectif proposé font l'objet du paragraphe III.7

### 3.2 L'intermodalité au cŒur des transformations du paysage multimodal

Les réseaux de transport actuels deviennent de plus en plus fortement maillés combinant ainsi des modes guidés tels que le Bus, le Métro, le Tramway et des modes qualifiés de libre ou non guidés et qui néanmoins possèdent un traçage prédéfini mais qui demeure flexible comme les autobus, les vélos ou voitures en libre service.

La présence de ces différents modes dans un même lieu traduit la notion de *multimodalité* (figure III.1). On parle également de multimodalité entre deux lieux lorsqu'il existe une infrastructure qui les relie (une route, un chemin de fer). Nous signalons également que ce terme est utilisé lorsque la plateforme des modes de transport varie : passage de modes de transport terrestres à des modes de transports aériens ou maritimes.

Le besoin croissant de mobilité dans les milieux urbains pousse les passagers à emprunter plusieurs modes de transport dans le cadre d'un même déplacement, cet acheminement est appelé : *chaîne de transport* tandis que le déplacement des personnes est caractérisé par l'intermodalité (par analogie on parle de transport combiné pour le transport de marchandises). L'échange entre ces modes s'effectue dans les *pôles d'échanges* ou les *nœuds de correspondance* où s'effectue le plus souvent un *transfert modal* (trans-

bordement de passagers). Plusieurs raisons d'ordre économiques, environnementales et politiques ont fait que les autorités de transport encouragent de plus en plus les déplacements intermodaux au détriment de l'usage des voitures privées. Les autorités orientent ainsi leurs stratégies d'exploitation en incitant les usagers à travers une information multimodale plus riche et adaptée aux besoins en déplacements en favorisant le transport à la demande comme un maillon important dans la chaîne de transport. Afin de favoriser les concepts d'intermodalité et de multimodalité, les autorités de transports mettent en place des systèmes de gestion des réseaux de transport publics ainsi que les systèmes de gestion des TAD. Dans la suite, nous présentons la structure de chacun de ces systèmes de gestion.

### **3.3 Structure des systèmes de gestion des réseaux de transport publics**

#### **3.3.1 Evolution des systèmes de gestion**

Les systèmes de gestion des réseaux de transports publics ont vécu plusieurs transformations qui accompagnent les avancées technologiques en matière de communication et d'échanges d'informations. Gérer une flotte de véhicules consistait auparavant de suivre ces véhicules de manière personnalisée lors de leur passage par les stations. Les agents qui assurent la surveillance remontent ensuite l'information au poste centralisé de contrôle lorsqu'ils aperçoivent des perturbations considérables. L'évolution de la radiophonie et la mise en place de systèmes de communications embarqués dans les véhicules de transport ont fait croître considérablement la réactivité des régulateurs face aux perturbations.

Les systèmes de gestion actuels s'inspirent des technologies avancées et se reposent sur les systèmes de transports intelligents, nous présentons dans la suite les fonctionnalités des systèmes de gestion.

#### **3.3.2 Structure basée sur les STI**

Actuellement, il existe des modèles normalisés de systèmes d'aide à l'exploitation avec des fonctionnalités riches et des moyens de communications performants. Nous

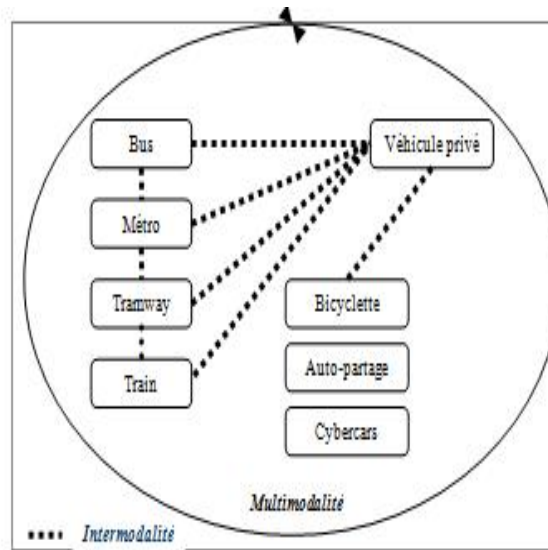


Figure 3.1: Interaction entre les moyens de transport de surface

présentons dans la suite, le Système d'Aide à l'Exploitation (figure III.2) qui rentre sous l'égide de la plateforme ACTIF (paragraphe II.4.1) en respectant les architectures métiers d'un Système de Transport Intelligent.

L'architecture ACTIF permet entre autres de fournir les flux et les stocks de données et entre les différents acteurs (figure III.3). En effet, la supervision, la régulation et l'information des voyageurs fait intervenir les différents acteurs suivants :

- *le régulateur* : c'est un élément clé dans le système de gestion du transport. En effet, il assure la communication depuis et vers le conducteur, recueille les données incidents ainsi que les données terrain. Ces données serviront d'entrée au module de régulation dans le but de s'aligner avec les données de planification suite à la présence d'incidents.
- *Les autorités de transport* : reçoivent les données sur les services effectuées ainsi que les indicateurs de qualité de service. Ces indicateurs permettront d'évaluer l'efficacité du système de gestion mis en place. Des pénalités peuvent être infligées aux compagnies de transport lorsque la qualité de service se dégrade considérablement.
- *Les équipements de terrain d'information ou de commande* : la diffusion de l'information aux voyageurs s'effectue par le moyen de ces équipements.



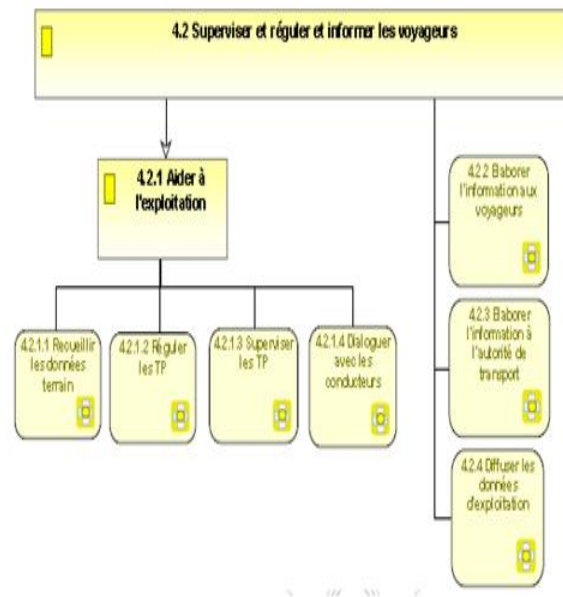
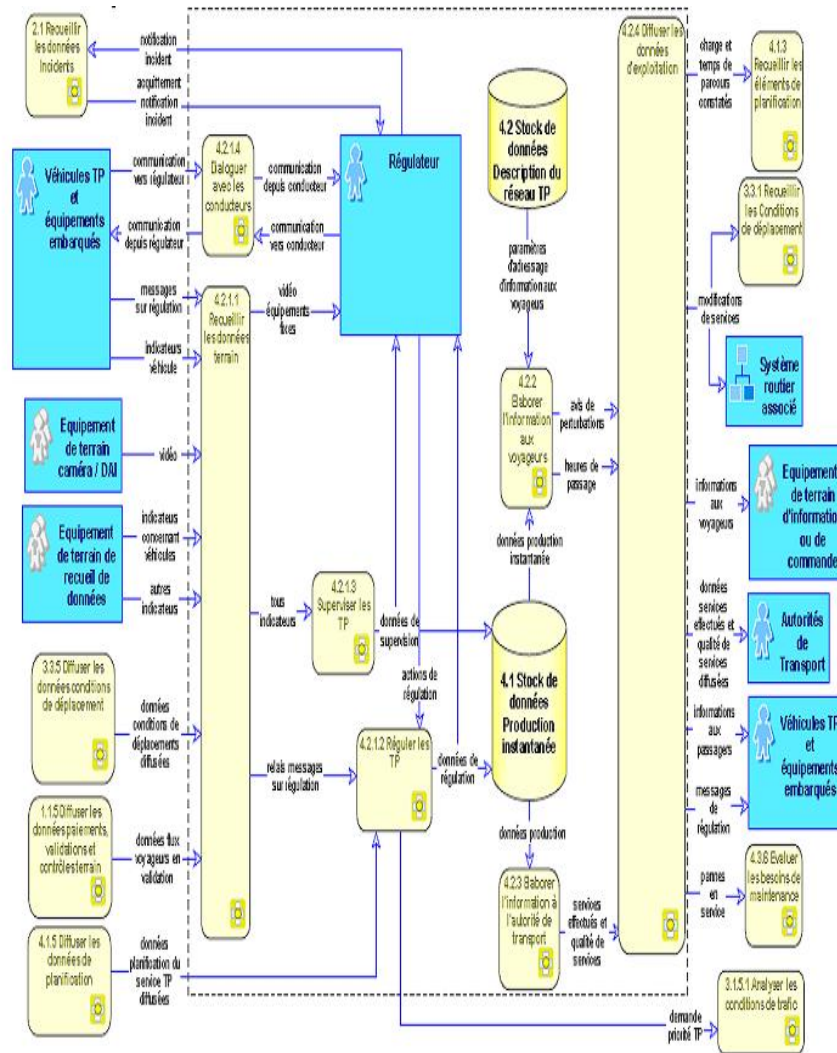


Figure 3.2: Diagramme fonctionnel du système d'aide à l'exploitation selon l'architecture ACTIV

- *Les véhicules TP et équipements embarqués* : nous retrouvons cet élément en début et fin de la chaîne de la régulation. En effet, les équipements embarqués dans les véhicules transmettent l'information sur les éventuels incidents et permettent l'échange de dialogue entre les conducteurs et les régulateurs. Une fois les procédures de régulation ont été validées par le régulateur, ces équipements transmettent l'information aux passagers empruntant ces véhicules ainsi que les messages de régulation indiquant aux conducteurs les manœuvres à faire.

- *Équipement de terrain caméra /DAI et Équipement de terrain de recueil de données* : Ces deux éléments transmettent des indicateurs concernant les véhicules pour assurer la fonction de supervision des transports publics. Dès lors, un système de gestion de transport présente une composante principale qui est représentée par Système d'Aide à l'Exploitation et à l'Information Voyageurs (SAEIV).



### 3.3.3 Le Système d'aide à l'exploitation et à l'information Voyageurs

Les objectifs de ce système sont essentiellement:

- La réduction du coût d'exploitation,
- L'amélioration de la qualité de service,
- L'analyse en temps différé du fonctionnement des TP,
- La régulation en temps réel en faisant face aux perturbations.

Afin d'accomplir au mieux ces objectifs, un SAEIV est décomposée en deux fonctions distinctes mais toujours communicantes. Il s'agit du SAE et du SAEIV que nous détaillons dans la suite.

#### 3.3.3.1 Le système d'aide à l'exploitation (SAE)

Suite à la phase de planification et l'élaboration des marches de service, il est nécessaire d'assurer un suivi des démarches d'exploitation du réseau pour superviser les ressources et le bon déroulement du trafic. Ce suivi s'effectue dans un poste central de commande (PCC) qui regroupe le personnel " régulateur ", une personne qui représente le service commercial, des téléviseurs pour observer les stations équipées d'un système de vidéosurveillance et des liaisons radios (figure III.4) Les principales fonctions développées dans un SAE sont :

- Localiser les véhicules dans le réseau : cette procédure consiste à déterminer les positions théoriques d'un véhicule qui assure un déplacement le long du réseau. Cette position est corrigée ensuite par rapport à la position réelle du véhicule grâce au repérage physique (le véhicule est équipé d'un compteur qui s'incrémente à chaque passage par une balise installée sur la ligne), certains SAE font référence au signal d'ouverture/fermeture des portes à chaque station.
- Assurer une communication entre le PCC et les véhicules : il s'agit d'échanger des informations entre le PCC et les conducteurs.
  - de la part du PCC : envoyer des informations sur la ligne, le véhicule, le service, des instructions relatives aux actions de régulation
  - de la part du conducteur : informer sur les perturbations,

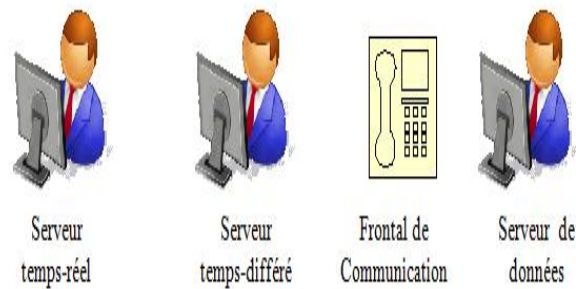


Figure 3.4: Composition du Poste central de commande

demander des détails sur un service, signaler un incident, demander une intervention.

- Assurer les correspondances : c'est un maillon important dans la mesure de la qualité de service d'un réseau comportant des correspondances entre les lignes d'un même mode de transport ou entre différents modes pour un même trajet. La vigilance vis-à-vis des horaires de correspondance fait qu'une intervention au niveau de la centrale de réservation peut s'effectuer s'il existe un écart entre l'horaire théorique et l'horaire réel de la correspondance.
- Assurer une communication entre le PCC et les voyageurs : les informations destinées aux voyageurs sont envoyées soit dans les véhicules même à travers des affichages indiquant la ligne, la destination, l'horaire ou bien dans les stations par des affichages qui mentionnent si besoin est les éventuelles correspondances, les changements d'horaires ainsi que des informations sur les éventuelles perturbations. Cette communication peut s'effectuer également via des informations sonores, le recours à cette éventualité se fait lorsqu'il s'agit d'une perturbation importante ou pour informer un bon nombre de voyageurs. Les visites que nous avons effectuées dans le PCC du fournisseur de transport à Valenciennes "TransVilles" nous ont permis de dégager certaines limites qui préconisent donc le besoin d'améliorer certains détails.

- Passer du support papier actuellement utilisé comme références et retour d'expériences à un archivage électronique,
- Assister les régulateurs dans leur prise de décision,
- Evaluer les actions de décision en fonction des critères de qualité fixés par la compagnie de transport.

### **3.3.3.2 Le système d'aide à l'information (SAI)**

L'objectif de base de ce système est d'assurer une information fiable et continue pour les voyageurs mais également pour les conducteurs. Le système d'aide à l'information permet aux régulateurs dans le PCC de visualiser les données et les éditer. ★ emplacement des informations : des supports à l'intérieur des véhicules, sur les bornes d'informations dans les espaces voyageurs, dans les arrêts,

★ prévisionnelles (temps d'attente, horaires) ou de temps-réel : perturbations, itinéraires, etc.

★ statiques ou dynamiques.

Le SAI et le SAE opèrent de façon continue en surveillant le réseau, lorsque des incidents sont détectés par Le SAI ce dernier transmet au SAE les informations sur les incidents, une démarche de régulation est donc déclenchée. Nous étudions, dans la suite, les significations d'incidents (perturbations) ainsi que la démarche suivie dans le passage du mode d'exploitation normal au passage au mode perturbé.

### **3.3.4 Le passage du mode normal au mode perturbé**

Le fonctionnement normal du réseau consiste à suivre les tableaux de marche théoriques (qui indiquent l'arrivée des véhicules aux stations) ainsi que les affectations du personnel et des ressources matérielles (des véhicules sont mis en circulation, d'autres sont en réserve dans les dépôts).

Ce mode de fonctionnement peut être affecté par des perturbations qui touche les lignes de bus/métro/tramway.

### 3.3.4.1 Les perturbations : définition et classification

*Une perturbation* est un événement aléatoire qui survient dans un réseau de transport causant ainsi un passage d'un mode de fonctionnement normal à un mode de fonctionnement perturbé. L'aspect le plus visible de cette perturbation réside dans le non-respect des tableaux de marches théoriques.

Il existe plusieurs façons de classifier les perturbations.

◆ Classification par niveau d'impact:

Coquio[Coq08] définit trois niveaux dans lesquels la perturbation peut avoir lieu, à savoir :

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

◆ Classification fournisseur du transport /usagers:

Ould Sidi[Oul06] classifie les perturbations selon le milieu qu'elles affectent, il désigne ainsi les perturbations qui surviennent dans les véhicules ou le personnel de la compagnie de transport par des perturbations internes, et celles qui surviennent au niveau du réseau par les perturbations externes.

◆ Classification de type impact spatio-temporel : nous proposons une classification plus généralisée en analysant l'impact de ces perturbations sur le trafic (Fig.3.5). Nous distinguons ainsi les perturbations qui ont pour effet de causer une ou plusieurs modifications du comportement des acteurs de transport et celles qui causent une ou des modifications affectant l'aspect général du trafic. Nous présentons dans ce qui suit le traitement des perturbations une fois qu'ils sont transmis vers le SAE

### 3.3.4.2 Les perturbations : manœuvres du SAE

La signalisation d'une perturbation dans le SAE se traduit par l'apparition d'alarmes avec des degrés de priorité différents. Selon la mesure de l'écart entre les tableaux de

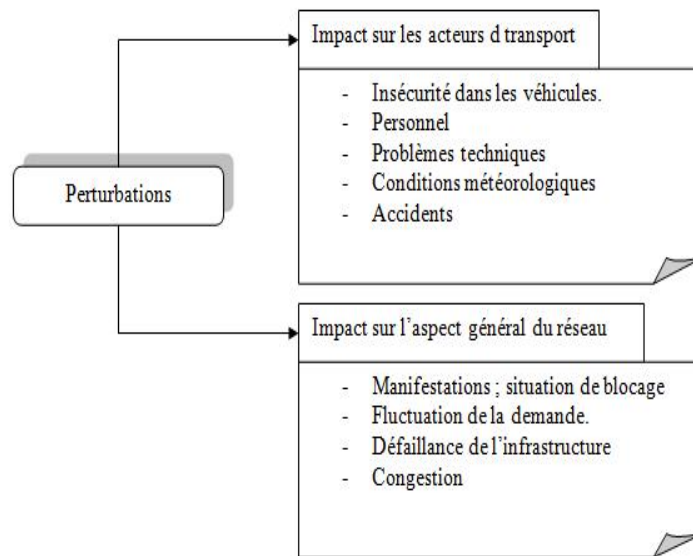


Figure 3.5: Classification des perturbations

marche théoriques et celles observées sur le réseau au moment de la perturbation, la criticité de la perturbation est définie.

Les retombées de ces perturbations sur le trafic sont :

- Avance / retard d'un véhicule
- arrêt de véhicule
- non disponibilité d'une partie du réseau

Dans ce qui suit, une perturbation est détectée pour tout incident qui cause un retard appartenant à l'intervalle [12,15] min. Cette valeur a été vérifiée auprès de TransVilles. Nous avons mentionné dans le paragraphe II.4.2 que les régulateurs se basent sur le référentiel européen Transmodel pour élaborer les procédures de régulation permettant de remédier aux perturbations. Ces manœuvres sont détaillés dans la suite.

### 3.3.5 Manœuvres de régulation

Les régulateurs distinguent selon le mode de transport adopté des procédures de régulations possibles.

### 3.3.6 Manœuvres pour le réseau de bus

- le Haut Le Pied hors ligne (HLP) : C'est la mise hors service d'un véhicule sur un parcours ou une partie du parcours. La compensation du retard se fait en empruntant un itinéraire plus rapide hors ligne régulière et en reprenant le service voyageurs en prochain terminus ou à un arrêt quelconque sur la ligne.

- le Direct En Ligne (DEL) : Le véhicule suit l'itinéraire de la ligne assurant uniquement les arrêts de descente pour les clients à bord,

- le Demi-Tour en ligne (DTEL): Suppression d'une partie de course pour remettre un véhicule sur son horaire théorique, à un point de retournement, suite à un retard important de ce véhicule,

- le Demi-Tour avec Echange de Conducteurs et de Véhicules (DTECV): Un véhicule en retard est rattrapé par le suivant moins chargé à l'heure. Le véhicule à l'heure transborde ses clients sur le véhicule en retard avec échange de conducteur. De ce fait, le véhicule en retard continue le service sur l'horaire du véhicule à l'heure. Le véhicule à l'heure a pris la numérotation du véhicule en retard, fait demi-tour et prend l'horaire théorique du véhicule en retard,

- le Dépassement et Service en Descente Uniquement (DSDU): Un véhicule en retard est rattrapé par le suivant à l'heure. Le deuxième passe devant le premier et assure le service normalement. Le véhicule dépassé continue la course mais n'assure que les arrêts descente,

- le Départ Retardé en Terminus (DRT) : Dans le cas où un véhicule ayant un retard supérieur à son battement au terminus d'arrivée, on retarderait le véhicule précédent au terminus d'arrivée de la moitié de la valeur du retard réel au départ réel du véhicule en retard,

- l'Echange Conducteurs et Véhicules (ECV): Cette mesure de régulation consiste en un nombre d'actions : ✓ Un véhicule en retard est rattrapé par le véhicule qui le suit, ✓ Transbordement des voyageurs du second véhicule sur le premier qui est plus chargé, ✓ Echange de conducteurs, des numéros de service (ainsi chaque conducteur conserve le sien). Le second véhicule, qui est vide, repart haut le pied, reprendre l'horaire théorique



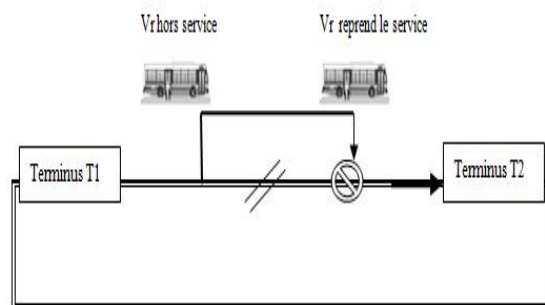


Figure 3.6: Haul le pied hors ligne

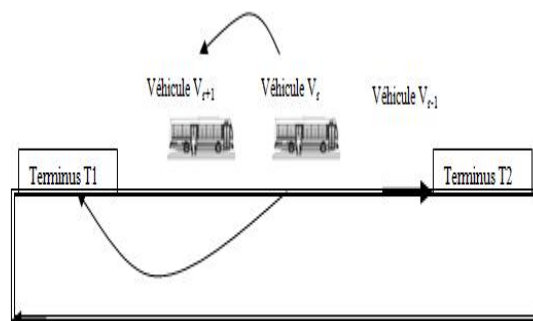


Figure 3.7: Direct en ligne

du premier qui lui continue les horaires théoriques du second.

- le RACcourci (RAC): Un véhicule en retard est à deux minutes devant le véhicule suivant qui est à l'heure. Le conducteur du véhicule en retard informe sa clientèle qu'il ne va pas desservir une partie de la ligne et que ceux qui désirent descendre sur la partie non desservie du parcours doivent passer dans le véhicule suivant qui est arrivée. Le véhicule en retard repart par le raccourci reprendre son horaire théorique en ligne.

- la Remise à l'Heure par Réserve et Disponible (RHRD) : Injection d'une réserve et d'un disponible sur l'horaire théorique d'un véhicule en retard ou en panne. On désigne par réserve le véhicule et par disponible le conducteur.

On distingue deux cas :

a) Premier cas : véhicule en retard

La réserve et le disponible entrent au plus vite sur l'horaire théorique du véhicule en retard, et assure le service de celle-ci. Le véhicule en retard finit sa course jusqu'au terminus.

Si la ligne ne comporte pas de boucle, la réserve assure le départ normal au terminus. Lorsqu'elle croise le véhicule en retard, on effectue l'échange de conducteurs en ligne. Le véhicule en retard devient réserve et la réserve devient le véhicule régulier.

Si la ligne comporte une boucle, la réserve assure le départ normal au terminus. Puisqu'elle repart par un itinéraire différent, elle ne croise pas de véhicule en retard. La réserve et le disponible effectuent la course. Le véhicule en retard et son conducteur deviennent réserve et disponible. Ils rentrent en HLP, par exemple au centre ville, et reprennent leur service à la course suivante en remplacement de la réserve et du disponible qui l'avaient assuré.

b) Deuxième cas : véhicule en panne

La réserve et le disponible entrent au plus vite sur l'horaire du véhicule en panne. La réserve devient par le fait, le véhicule régulier jusqu'à, éventuellement, son remplacement par le véhicule régulier dépanné à un point quelconque de la ligne (terminus ou point de régulation).

- la Régulation En Ligne (REL) : Méthode retardant proportionnellement deux à trois

véhicules devant un véhicule en retard, pour éviter la surcharge sur celui ci, et l'aider à ne pas accroître son retard en réduisant l'intervalle devant lui, puis en retardant proportionnellement deux à trois véhicules derrière le véhicule en retard afin de rétablir la régularité.

- la Régulation En Terminus (RET) : Elle consiste à effectuer des départs avancés ou retardés sur un terminus pour rétablir la régularité en ligne en agissant sur une ou deux véhicules en aval et une ou deux véhicules en amont du véhicule perturbé, suivant l'importance du retard de celui-ci. Le retour à l'horaire théorique s'effectue au terminus d'origine. Pour rétablir la régularité suite à un manque de véhicule en ligne (véhicule en panne, manque de conducteur, etc.).

Plusieurs procédures de base peuvent être combinées, de manière parallèle ou séquentielle et donnent ainsi des manœuvres plus complexes[Tra04].

### **3.3.6.1 Manœuvres pour le réseau de Tramway**

L'implantation du réseau de Tramway dans la ville de Valenciennes est assez récente, les régulateurs n'ont donc pas suffisamment de retour d'expériences sur les manœuvres à entreprendre pour les incidents de Tramway. Nous distinguons les manœuvres suivantes :

- Echange en fin de tour,
- Haut le pied,
- Remorquage/poussage,
- Vitesse limite : consiste à réduire la vitesse des rames du tramway pour maintenir une régularité entre le passage du tramway entre les stations
- Repli sur quai de réserve,
- Reprise de service,
- Attente agent.

Ces procédures de base peuvent également être combinées pour générer des procédures complexes[Fou02]. Pour des contraintes de simulation, et en accord avec TransVilles, la priorité était d'intégrer la manœuvre Régulation En Ligne appelée aussi " retombe "

et d'adapter certains manœuvres de bus au Tramway. Ainsi, les actions de régulation effectives pour le Tramway sont :

- Direct en Ligne,
- Départ retardé en Terminus,
- Retombe,
- Absorption en Terminus.

### **3.3.6.2 Manœuvre pour le Cybercar : Système Noria**

#### ***Définition***

Noria est un terme qui vient à la base de l'arabe na'ura et que les espagnols ont repris par la suite. La notion de Noria désigne à la base une machine hydraulique qui est utilisée dans le processus de l'irrigation. Elle assure une rotation sans fin sur un cours d'eau afin de faire parvenir l'eau d'un endroit à un autre.

En logistique, par analogie au procédé hydraulique, la Noria désigne un processus de relais entre deux points donnés, cela permet d'éviter à certains moyens de transport de longues distances. Les applications de ce procédé sont variables, elles s'étendent du domaine militaire aux démarches d'approvisionnement. Nous citons à titre d'exemple :

- l'approvisionnement des organismes dans certaines villes urbaines que les gros transporteurs ne peuvent pas assurer,
- La livraison en points relais des commandes par correspondance,
- Les véhicules utilitaires sont équipés de plateaux amovibles, afin de réduire la rupture de charge et de pouvoir repartir à vide ou avec un autre plateau,
- Les interventions militaires procèdent dans les endroits de combat à la mise en place d'un système de noria militaire où des camions procèdent au transfert des munitions aux troupes à partir d'un pont aérien.

Dans le cadre de la régulation du système de transport, nous proposons d'intégrer le processus de Noria comme une action élémentaire préconisée par le régulateur pour résoudre des situations de perturbations du système. Cette démarche s'intégrera dans le processus global de l'optimisation pour donner lieu à des classes de décision dont

l'insertion dans la stratégie d'exploitation sera évaluée au cours d'une phase en aval.

### 3.3.7 Les critères de régulation

Afin de favoriser une décision par rapport à une autre, nous tenons essentiellement compte des critères de régulation. Il est à mentionner que ces critères sont plus ou moins subjectifs vu qu'ils répondent aux exigences de la clientèle d'une part et des entrepreneurs des compagnies de transport d'autre part. Le régulateur, en collaboration avec les autres acteurs concernés dans le domaine du transport collectif, cerne les critères selon leurs importances et leur impact sur le trafic. Nous distinguons cinq critères dont la formulation mathématique est présentée dans l'annexe I.

**Régularité** : Ce critère vise à minimiser le temps d'attente des voyageurs aux arrêts et équilibrer les charges entre les véhicules. Ainsi, la régularité permet d'assurer la régularité des intervalles de temps qui séparent les passages successifs des véhicules à une même station.

**Correspondance** : Le but est de minimiser le temps de correspondance des voyageurs en transit entre les différentes lignes du réseau.

**Ponctualité** : consiste à minimiser la durée totale des trajets à bord des différents véhicules selon les charges de ces derniers.

**Les kilomètres commerciaux** : il s'agit de minimiser l'écart entre la distance théorique et réelle parcourue 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.

**La qualité de service** : La mesure de la qualité de service peut être différente d'une compagnie de transport à une autre mais, ces dernières sont toutes d'accord sur l'importance de ce critère. TransVilles a choisi 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.

La composition des systèmes de gestion des réseaux de transport à la demande diffère de celle des systèmes de gestion des réseaux de transports publics. Cet écart est dû principalement au fait que souvent l'exploitation des réseaux publics et ceux du TAD se

font de façon parallèle ce qui induit une non-communication entre les fournisseurs de ces types de transport; par la suite, chaque entité gère son système de manière différente.

### 3.4 Structure des systèmes de gestion du réseau de TAD

Des études sur le marché des TAD ont montré qu'il n'existe pas de logiciels dédiés à l'exploitation de la flotte. Le suivi des courses s'effectue grâce à des logiciels de bureautiques (tableur, base de données). Toutefois, cette branche est entrain d'évoluer afin de réduire le temps et le coût de gestion de ces systèmes. Les fonctionnalités de ces logiciels varient selon les besoins et peuvent couvrir, outre les réservations, les paiements et l'information voyageurs, des plateformes qui essayent de répondre aux mobilités des voyageurs en s'interconnectant avec d'autres fournisseurs de service de transport, on parle dans ce cas de *Centrale de mobilité*.

Fonctionnalités des systèmes de gestion des TAD :

- Localisation des véhicules automatisés,
- Gestion des paiements électroniques,
- Gestion des ressources (disponibilité des véhicules, types, capacités).
- Gestion de l'infrastructure (caractéristiques du réseau, positionnement des parking, arrêts flexibles),
- Prise de décision : génération des itinéraires, affectations des ressources,
- Règlementation et qualité de service : durée maximale du trajet, durée du parcours origine/destination, taux de rotation le plus large pour l'enlèvement et le retour du véhicule.

Nous citons à titre indicatif des exemples de logiciels de gestion de TAD :

1) MobiTer qui cible le TAD en milieu rural ou périurbain avec des limites concernant l'optimisation des itinéraires.

2) PERSONALBUS paraît le logiciel le plus sophistiqué puisqu'il possède plusieurs variantes : PERSONALBUS-ZTL est la variante qui gère le TAD dans les endroits urbains qui ne sont pas atteignables par les transports publics réguliers, il ne se base pas sur un système centralisé contrairement à la majorité des systèmes de gestion mais offre un service direct au client en analysant sa requête de déplacement et en lui offrant l'offre qui lui est adéquate.

3) OPTITOD : utilisé dans la gestion du TAD dans la communauté de Douai (région Nord-Pas-de-Calais).

Ces logiciels ne possèdent pas de composants de régulation proprement dits, ils sont à la limite entre des logiciels d'informations voyageurs et d'interfaçage avec les fournisseurs des services de TAD.

### 3.5 Vers un Système Informatique d'Aide à la Décision (SIAD)

Contrairement au domaine du transport, le domaine de la logistique et de la gestion des entreprises ont connu un développement assez remarquable dans les méthodes et les applications d'aide à la décision.

Des plateformes conjuguent le traitement, l'analyse et la classification des données afin de fournir en ultime étape des tableaux de bords, des statistiques parlants permettant d'orienter les choix du décideur.

A l'image du SIAD de gestion, l'élaboration d'un SIAD de transport s'avère prometteuse vu les limites observées dans les PCC signalés en § III.3.3.1.

Le système d'aide à la décision représenté actuellement par la composante "régulateur" d'un SAE doit se distinguer pour valoriser les décisions à entreprendre et apporter une assistance aux régulateurs. Cette assistance doit dépasser le simple fait d'énumérer des actions de décision mais en les sélectionnant et les évaluant selon des critères pertinents pour n'en sortir que "*La bonne séquence de décisions*" d'où notre proposition de distinguer une composante de Système d'Aide à la Décision par rapport au SAE (Modèle 2 de la figure 3.8)[MHT06].

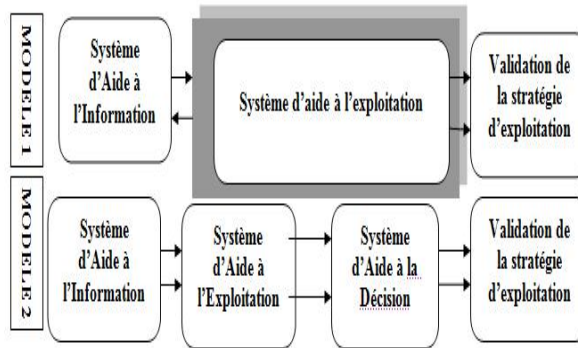


Figure 3.8: Apport de la nouvelle approche de régulation

### 3.6 L'aide multicritère à la décision et les outils d'évaluations

#### 3.6.1 Définition de l'aide multicritère à la décision

Il n'existe pas à notre connaissance une définition généralisée ou universelle de l'aide multicritères à la décision. Néanmoins, certains termes reviennent dans les définitions proposées : on parle souvent de notion de critères, de prise de décision, de problèmes multiobjectifs. Roy[Roy85] a détaillé les bases de l'aide multicritère à la décision en mettant l'accent sur la notion d'" *axes de signification* " qui permettent de cerner les préférences communes aux différents acteurs. Il est primordial de définir les actions potentielles qui représentent les objets de la décision engendrant des conséquences ou impacts sur l'environnement du problème. Par la suite, les parties prenantes explicitent leurs préférences appelées aussi points de vue, afin d'évaluer ces actions potentielles. Dans certains cas, où une évaluation de type quantitative est recherchée, la classification des actions potentielles en fonction des préférences permettent de dégager un degré de satisfaction qui permet d'en retenir certains. Dans d'autres cas, un processus d'agrégation s'avère nécessaire. Il permet de tirer partie des préférences et des axes de signification.

Dans ce contexte, Debrincat mentionne dans son rapport portant sur les potentialités pour l'évaluation des projets de transports collectifs en île-de-France:

L'aide multicritère à la décision fait intervenir une famille cohérente de critères devant



satisfaire des propriétés d'intelligibilité, afin de favoriser la communication et la logique (exhaustivité, cohésion et non redondance).

La décision multicritère est le fruit de combinaison et de fusion d'informations affectées par des préférences sur certains critères donnés. La combinaison des informations disponibles, souvent incomplètes ou partiellement erronées, tient compte des éventuelles coalitions, conflits ou coordinations qui existent entre les sources d'informations.

Le rôle du décideur est de trouver *la meilleure solution* issue de la combinaison des attributs (solutions partielles), en tenant compte des critères et en appliquant les opérateurs d'agrégation et de comparaison mis à sa disposition. La multitude des critères nous mène à une décision multicritères.

### **3.6.2 Domaines d'application**

Les applications de la décision multicritère ont deux principales issues. Nous constatons qu'on ne peut pas dresser une liste exhaustive de tous les domaines d'applications, on énumère ci-dessous les plus connus :

- Transport, l'infrastructure (aide à la décision),
- Gestion des ressources humaines et matérielles,
- Environnement,
- Opérations d'achats (aide à la décision),
- Allocation de ressources, planification, contrôle aérien (décision automatique).

Le preneur de décision se trouve face à un problème présentant plusieurs critères. La décision qu'il va prendre va dépendre étroitement de la manière avec laquelle il a agrégé ces critères pour aboutir à une évaluation globale.

Nous présentons dans ce qui suit, les différentes approches d'agrégation.

### **3.6.3 Agrégation multicritère**

Nous pouvons ramener un problème de décision multidimensionnel à un problème monodimensionnel en agrégeant les fonctions d'utilité élémentaires associées à chaque conséquence. Pour parvenir à la décision adéquate, il est important d'appliquer le

bon opérateur d'agrégation. De nos jours, l'agrégation peut être appliquée selon deux approches distinctes :

- ★ Approche ordinale (relationnelle).
- ★ Approche cardinale (globale).

### 3.6.3.1 Approche ordinale (ou relationnelle)

Cette approche consiste à comparer pour chaque critère les candidats potentiels par paire. Ainsi, nous obtenons une relation de préférence pour chaque critère. Il suffit par la suite d'agréger ces relations de préférence afin d'obtenir une nouvelle relation pour l'ensemble des critères.

Cette approche a donné lieu à la définition de nombreuses méthodes dont on énumère ELECTRE, MELCHIOR, PROMETHEE, PAPPAC.

Rigo [RHA<sup>+</sup>07] a réalisé un processus d'évaluation nommé LODA (Logistic Optimization and Decision Aiding) de la chaîne intermodale du transport à travers une combinaison qualitative et quantitative touchant à plusieurs domaines de performances (économie, environnement, sécurité et logistique). Pour ce faire, il a opté pour la méthode multicritère PROMETHEE. La limite majeure de cette approche est qu'elle ne permet pas d'avoir un ordre total entre les candidats potentiels.

### 3.6.3.2 Approche cardinale (globale)

Le but de cette approche est de parvenir à un classement des candidats : chaque candidat/décision pouvant être évalué(e) par rapport à chaque critère. L'évaluation globale de chaque candidat est ensuite obtenue par l'agrégation des ces évaluations dites *marginales*. Le fait de fusionner ou d'agréger ces évaluations dans le cadre d'une évaluation globale nous permet d'établir un classement total qui permet, à son tour, de prendre une décision sans oublier qu'elle peut masquer des problèmes de cohérence des critères sous-jacents.

Nous citons à titre d'exemple certaines approches globales : Goal programming, MAUT

(Multiple Attribute Utility Theory) et UTA(Utilités Additives).

L'approche cardinale camoufle de façon considérable le poids affecté aux critères considérés. Selon les approches citées précédemment, les critères sont agrégés moyennant des opérateurs variés que nous détaillons dans ce qui suit.

### 3.6.4 Les opérateurs d'agrégation

Dans la suite on désigne par  $\vee$  l'opérateur max. et par  $\wedge$  l'opérateur min.

Un opérateur d'agrégation  $\Phi$  est considéré comme une fonction de  $[0, 1]^n$  dans  $[0, 1]$ , c'est-à-dire qui agrège  $n$  quantités. Ce qui peut se traduire par :

$$\forall j \in 1, 2, \dots, n; a_j \in [0, 1]$$

$$\Phi : [0, 1]^n \rightarrow [0, 1] (a_1, a_2, \dots, a_n) \rightarrow a = \Phi(a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (3.1)$$

Il s'agit en fait de trouver une satisfaction globale  $a$  représentative d'une collection de satisfactions marginales  $a_1, a_2, \dots, a_n$ .

#### 3.6.4.1 Les propriétés des opérateurs d'agrégation

Nous présentons les propriétés fondamentales d'un opérateur d'agrégation [Gra96]:

a) L'unanimité pour les valeurs extrêmes (UVE) ou encore la condition aux limites:

$$\Phi(0, \dots, 0) = 0; \Phi(1, \dots, 1) = 1$$

Cette propriété peut être généralisée, la propriété plus forte étant l'idempotence qui signifie que le traitement sur la fonction la laisse inchangée.

$$\Phi(a, \dots, a) = a \forall a \in [0, 1]$$

b) La Continuité :  $\Phi$  est une fonction continue de  $a_1, a_2, \dots, a_n$  La continuité assure la robustesse de la fusion. c) La Monotonie : Non décroissance par rapport à chaque argument. Si  $b_i > a_i$  alors

$$\Phi(a_1, a_2, \dots, a_{i-1}, b_i, a_{i+1}, \dots, a_n) \geq \Phi(a_1, a_2, \dots, a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, \dots, a_n) \forall i \quad (3.2)$$

Elle est dite stricte si on a l'inégalité stricte à droite.

Cela signifie autrement que si un candidat satisfait un critère mieux qu'un autre, il est normal que son score global soit plus élevé.

d) Commutativité (anonymat, neutralité) :

$$\Phi(a_1, a_2, \dots, a_n) = \Phi(a_{\sigma(1)}, a_{\sigma(2)}, \dots, a_{\sigma(n)}) \quad (3.3)$$

Avec  $\sigma$  permutation quelconque sur  $1, 2, \dots, n$

e) Associativité : Si  $\Phi$  est défini pour deux arguments, cette propriété permet d'étendre sa définition à trois arguments :

$$F^{(3)}(a_1, a_2, a_3) = F^{(2)}(F^{(2)}(a_1, a_2), a_3) = F^{(2)}(a_1, F^{(2)}(a_2, a_3)) \quad (3.4)$$

Généralisation :

$$F^{(n)}(a_1, a_2, a_n) = F^{(2)}(F^{(n-1)}(a_1, a_2), a_{n-1}, a_n) = F^{(2)}(a_1, F^{(n-1)}(a_2, \dots, a_n)) \quad (3.5)$$

f) Compromis :

$$\bigwedge_{i=1}^n a_i \leq \Phi(a_1, \dots, a_n) \leq \bigwedge_{i=1}^n a_i \quad (3.6)$$

g) Stabilité pour les transformations ordinales : Nous considérons ici que  $\Phi$  est défini sur  $\mathbb{R}$ . Soit  $f$  une fonction continue, strictement croissante de  $\mathbb{R}$  dans  $\mathbb{R}$  ; Alors

$$\Phi(f(a_1), \dots, f(a_n)) = f(\Phi(a_1, \dots, a_n)) \quad (3.7)$$

Un cas particulier est la *stabilité pour le changement d'échelle linéaire* :

$$\Phi(ra_1 + t, \dots, ra_n + t) = r(\Phi(a_1, \dots, a_n)) + t \quad (3.8)$$

h) Stabilité comparative pour les transformations ordinales :  $f$  étant une fonction con-

tinue, strictement croissante de  $\mathbb{R}$  dans  $\mathbb{R}$

$$\Phi(a_1, \dots, f(a_n)) < f(\Phi(b_1, \dots, b_n)) \Rightarrow \Phi(f(a_1), \dots, f(a_n)) = \Phi(f(b_1, \dots, b_n)) \quad (3.9)$$

Après avoir dressé les différentes propriétés qualifiant un opérateur d'agrégation, nous citons quelques opérateurs.

### 3.6.4.2 Quelques opérateurs d'agrégation

Vu leur multitude, nous énumérons sans prétendre à l'exhaustivité les différents opérateurs rencontrés dans la revue de la littérature [Mar98], [Gra96] : Le choix d'un opérateur au détriment d'un autre réside dans un problème décisionnel s'effectue selon plusieurs approches. Nous distinguons comme principales approches :

★ Approche " pragmatique " :

Elle consiste à effectuer un test un grand nombre d'opérateurs d'agrégation et à comparer leurs résultats sur des problèmes particuliers,

★ Approche " axiomatique " :

Il s'agit dans ce type d'approche de construire les classes d'opérateurs d'agrégation selon leurs propriétés mathématiques. Il s'avère d'après nos recherches que cette approche est la plus utilisée dans les cas pratiques,

★ Approche " intuitive " :

Intuitivement, nous déduisons les propriétés satisfaisantes des opérateurs d'agrégation qu'on répertorie par la suite. D'après les trois approches largement adoptées pour distinguer les opérateurs d'agrégation (i.e. : pragmatique, axiomatique, intuitive), ces derniers peuvent être découpés selon leurs attitudes en trois classes.

a) Les opérateurs conjonctifs:

Ils jouent le rôle d'un opérateur logique ET. Ainsi, on n'obtient un résultat d'agrégation élevé que si et seulement si tous les éléments à agréger sont élevés.

$$\Phi^{(2)}(1, a) = a, \forall a \in [0, 1] \quad (3.10)$$

la famille des *normes triangulaires ou t-normes*, souvent notées par  $\perp$ , fait partie des opérateurs conjonctifs.

Ces opérateurs ont un comportement décisionnel strict, pessimiste ou encore sévère. Le fait de vouloir satisfaire tous les critères simultanément est un comportement de type conjonctif, où les critères influents ne seront pas forcément ceux qui sont les mieux satisfaits.

b) Les opérateurs de disjonction :

Le rôle de tels opérateurs est d'assurer la fonction d'un opérateur logique OU. Le résultat de l'agrégation s'élève dès qu'un des éléments à agréger soit élevé.

$$\Phi^{(2)}(0, a) = a, \forall a \in [0, 1] \quad (3.11)$$

Parmi les opérateurs de disjonction, nous retrouvons la famille des *co-normes triangulaires ou t-conormes*.

Ce type d'opérateur reflète un comportement " tolérant " ou encore un raisonnement agrégatif optimiste. Un comportement décisionnel disjonctif attribue une importance élevée aux extrêmes en privilégiant les critères les mieux satisfaits puisque la bonne satisfaction d'un critère est suffisante.

c) Les opérateurs de compensation :

Certains opérateurs autorisent le fait qu'un candidat qui satisfait faiblement un critère soit contrebalancé par le fait qu'il existe un autre critère fortement satisfait. La non-adéquation au premier critère est donc " compensée " par la bonne satisfaction du deuxième critère. Dans ce sens, les opérateurs de type moyenne permettent souvent de bénéficier de l'effet de compensation : les meilleurs éléments et les moins bons s'équilibrent lors de la procédure d'agrégation.

d) Les opérateurs de moyenne arithmétique pondérée (somme pondérée) :

Il est défini par :

$$\Phi(a_1, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^n w_i a_i \quad (3.12)$$

Où les  $w_i \in [0, 1]$  sont les poids tel que  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ . D'autres types de moyennes existent et peuvent s'écrire sous la forme :

$$\Phi(a_1, a_2, \dots, a_n) = f^{-1} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(a_i) \right] \quad (3.13)$$

Avec  $f$  une fonction continue et strictement monotone. Généralement, les opérateurs de type moyenne ont un comportement ayant tendance à ramener l'évaluation globale vers le centre des évaluations marginales. Ils permettent souvent de bénéficier de l'effet de compensation des éléments les moins bons par les meilleurs éléments. Ce qui explique le résultat intermédiaire fourni par ce type d'opérateurs qui est, à son tour, un inconvénient majeur puisqu'il permet de pallier des éventuels inconvénients majeurs par les qualités des autres critères.

#### **Propriétés :**

Les moyennes généralisées sont idempotentes, continues, strictement monotones, vérifient la propriété du compromis. Seule la somme pondérée vérifie la stabilité au changement d'échelle linéaire. La somme pondérée a également des limites, l'exemple suivant illustre le fait qu'un tel opérateur masque le critère conflictuel entre les alternatives  $w_j$ : désigne le poids.

$a, b, c, d$ : désigne les critères

En effet,

$$u(a) = 100 > u(b) = 50$$

$$u(c) = 100 > u(d) = 50$$

$(a, b)$  et  $(c, d)$  sont comparés de la même façon alors qu'il y'a un gros conflit entre les critères sur  $c$  et  $d$ . Parmi les limites de la somme pondérée est qu'elle peut favoriser les alternatives extrêmes. De même qu'une faible variation des poids peut entraîner de

	$w_j$	a	b	c	d
u1	0.5	100	50	200	0
u2	0.5	100	50	0	100
u		100	50	100	50

Figure 3.9: Exemple d'application de la somme pondérée

grandes conséquences sur la préférence globale.

e) La somme pondérée ordonnée (OWA) : Les opérateurs d'agrégation OWA(Ordered Weighted Averaging Operators) ont été introduits par Yager[Yag04] Ils sont définis comme suit :

$$OWA_w(a_1, a_2, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^n w_i a_{(i)} \quad (3.14)$$

avec

$w$  un vecteur de poids,  $w_i \in [0, 1]$  tel que  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$

$(i)$  est une notation indiquant une permutation des indices telle que:  $a_{(1)} \leq \dots \leq a_{(n)}$

Il est important de noter les cas particuliers suivants sont importants :

$w_1 = 1$  (donc  $w_i = 0, i > 1$ ) : opérateur minimum ;

$w_n = 1$  (donc  $w_i = 0, i < n$ ): opérateur maximum ;

$w_i = 1$  pour  $i$  donné : statistique d'ordre  $i$  ;

Si  $n$  est impair, la médiane est définie par  $w_{\frac{n+1}{2}} = 1$ . Sinon, la médiane est définie par:  $w_{\frac{n}{2}} = w_{\frac{n}{2}+1} = \frac{1}{2}$  Ces opérateurs fréquemment utilisées permettent dans le cadre de l'agrégation multicritères de représenter le concept suivant : le décideur peut agir sur l'agrégation en imposant une satisfaction plus ou moins stricte de l'ensemble des critères, ainsi on peut représenter les nuances allant de " tous les critères doivent être satisfaits " à " au moins un critère doit être satisfait ".



*Propriétés :*

Idempotents, continus, monotones, neutres, et stables pour le changement d'échelle linéaire.

f) Le minimum et le maximum pondérés :

$w$  un vecteur de poids,  $w_i \in [0, 1]$  tel que  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$

$$\min_w(a_1, \dots, a_n) = \bigwedge_{i=1}^n [(1 - w_i) \vee a_i] \quad (3.15)$$

$$\max_w(a_1, \dots, a_n) = \bigvee_{i=1}^n [(1 - w_i) \wedge a_i] \quad (3.16)$$

### 3.6.5 Limitations des opérateurs d'agrégation usuels

M, P et L désignent les notes en mathématiques (critères); M : notes en Maths, P : notes en physique, L : notes en littératures. Ei : désigne les étudiants et  $i=1..3$  : désignent les alternatives.

Nous attribuons les coefficients 3 aux M et P, 2 aux L.

Un premier calcul des scores en adoptant la moyenne pondérée fournit les résultats du tableau III.2.

Le directeur n'est pas du tout satisfait du résultat, car il voit que E3 (bon en P comme en L) est meilleur que E1 (excellent en M mais mauvais en L).

Il procède au changement des coefficients affectés aux matières mais sans succès. Il retrouve le même classement pour E1 et E3 ce qui ne l'arrange pas.

	M	P	L	Score
E1	18	16	10	15.25
E2	10	12	18	12.75
E3	14	15	15	14.60

Figure 3.10: Exemple illustratif des limites de la moyenne pondérée

Les intégrales floues offrent la solution à de tels problèmes.

Nous pouvons, en effet, formaliser la situation par les règles suivantes :

- Les M et P sont plus importants.
- Les M et P sont plus au moins similaires (les étudiants bons dans ces matières ne doivent pas être beaucoup favorisés).
- Nous favorisons par contre les étudiants qui sont bons en M et en L (qui sont rares !).

Comme la somme pondérée, les opérateurs et méthodes d'agrégation cités auparavant ne sont pas capables de représenter les interactions entre les critères (oppositions, redondances, etc.), afin de résorber ces points faibles, on se propose d'utiliser les intégrales floues.

### 3.6.6 Les intégrales floues

C'est au début des années quatre-vingt-dix, que l'intégrale de Sugeno a été employée comme outil d'agrégation pour calculer un score moyen global, tenant compte des importances de critères exprimés par une mesure floue. Des années après, Murofushi et Sugeno[Sug74] proposent d'employer l'intégrale de Choquet qui est une extension de l'intégrale de Lebesgue classique et de la somme pondérée. Ainsi, les intégrales floues ont été rapidement adoptées parmi des praticiens. Plus tard, les propriétés des intégrales de Choquet et Sugeno ont été étudiées en profondeur ainsi que leurs relations avec les opérateurs OWA dans leur forme additive usuelle ou encore le minimum pondéré qui a été découvert suite à des recherches appliquées[DP86]. La difficulté qui a ralenti l'application des mesures floues est certainement leur complexité exponentielle, puisque l'on doit définir un nombre réel pour chaque sous-ensemble de jeu de critères et aussi trouver un moyen d'évaluer ces nombres soit par élection experte (mais vient alors le problème de la signification réelle de ces nombres, sans parler du fardeau du décideur dans une telle situation), ou bien par l'optimisation. C'est la raison pour laquelle la plupart du temps dans des applications, les cas particuliers de mesures floues ont été employés, ayant besoin seulement de la définition d'une distribution (linéaire dans sa complexité) et un paramètre, tels que les mesures  $\perp$ -décomposables, les  $\lambda$ -mesures, les mesures de possibilité [Zad78], etc.

Des mesures si simples sont incapables d'exprimer des phénomènes d'interaction homogènes entre des critères. C'est la raison pour laquelle Grabisch[Gra96] a proposé le concept de la mesure  $k$  - additive, rapprochant le vide entre des mesures décomposables et des mesures ordinaires floues.

Dans le cas discret, nous considérons les intégrales comme un opérateur d'agrégation du type moyenne. Pour introduire le concept d'intégrale floue[Dan94], on se propose d'abord de définir une mesure floue appelée capacité.

**Définition :** Capacité ou mesure floue:

On appelle capacité ou mesure floue[Cho53], toute fonction  $\mu : P(N) \rightarrow [0,1]$  vérifiant les deux conditions :

$$\mu(\emptyset) = 0$$

$$\mu(N) = 1$$

$$A \subseteq B \Rightarrow \mu(A) \leq \mu(B)$$

$\mu$  représente l'importance ou le pouvoir de coalition  $A$  (groupe de sources).

\* On dit qu'une mesure floue est *additive* si  $\mu(A) = \sum_{i \in A} \mu(i)$  pour tout  $A$  dans  $P(N)$ .

\* On dit qu'une mesure floue est *cardinale ou symétrique* si  $\mu(A) = \mu(B)$  chaque fois que  $|A| = |B|$ .

D'autre part, Il est possible d'étendre les mesures floues, définies sur l'ensemble des parties de  $N$ , à l'ensemble des ensembles flous de  $N$ . Si  $P(N)$  désigne l'ensemble des ensembles flous sur  $N$ ,  $f_A$  désigne sa fonction d'appartenance.

**Définition :** *mesure floue d'un ensemble flou*[Gra96]

On définit, une mesure floue d'un ensemble flou  $N$ , par une fonction

$$\mu : \tilde{P}(N) \rightarrow [0, 1]$$

vérifiant les deux conditions :

$$\mu(\emptyset) = 0$$

$$\mu(N) = 1$$

$$f_A(i) \leq f_B(i) \text{ pour tout } i \in N \text{ implique } \mu(A) \leq \mu(B); \text{ pour } A, B \in \tilde{P}(N)$$

Afin d'expliquer la mesure  $k$ -additive d'après Grabish, il faut tout d'abord introduire la notion de transformant de Möbius.

*Définition : Transformant de Möbius*

Soit  $\mu$  une fonction de jeu dans  $X$ . Le transformant de Möbius de  $\mu$  est une fonction d'ensemble dans  $X$  défini par :

$$m(A) = \sum_{B \subset A} (-1)^{|A/B|} \mu(B) \forall A \subset X$$

$|A/B|$  : Le cardinal de la différence d'ensemble.

*Définition : mesure  $k$ -additive*

Une mesure floue  $\mu$  est dite  $k$ -additive si:

Son transformant de Möbius  $m(A) = 0$  pour tout  $|A| > k$

Et il existe au moins un sous-ensemble de  $X$  d'exactly  $k$  éléments tel que  $m(A) \neq 0$ .

Une définition plus simplifiée est de considérer que la notion de mesure  $k$ -additive est telle que les indices d'interactions sont nuls pour tout sous-ensemble de plus de  $t$  éléments. Ainsi, une mesure 1-additive est une mesure additive au sens ordinaire.

*Définition : Indice d'interaction entre 2 coalitions* Soit  $\mu$  une mesure floue dans  $X$ . L'indice d'interaction entre les éléments  $i, j \in X$  est défini par :

$$I_{i,j} = \sum_{k \subset X, i,j} \frac{(n - |k| - 2)! |k|!}{(n-1)!} [\mu(k \cup i, j) - \mu(k \cup i) - \mu(k \cup j) + \mu(k)]$$

Nous avons trouvé au cours de la revue de la littérature que Grabisch[Gra96] a su étendre cet indice à n'importe quelle coalition. La définition précédente devient par la suite :

*Définition : Indice d'interaction entre 2 coalitions* Soit  $\mu$  une mesure floue dans  $X$ .

L'indice d'interaction entre les éléments  $i, A \in X$  est défini par :

$$I(A) = \sum_{B \subset X/A} \frac{(n - |B| - |A|)!|B|!}{(n - |A| + 1)!} \sum_{C \subset A} (-1)^{|A/C|} \mu(C \cup B)$$

Grabisch[Gra96] a établi les différents indices de Shapley (Tableau III.3) pour chaque critère ainsi que l'indice d'interaction pour deux critères données relatives aux opérateurs de la somme pondérée, de l'OWA, le minimum, le maximum (III.6.4.2).

*Définition : Intégrale de Choquet* Soit  $\mu$  une mesure floue dans  $X$ , dont les éléments sont dénotés  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . L'intégrale de Choquet discrète d'une fonction :

$$C_\mu(f) = \sum_{i=1}^n (f(x_{(i)}) - f(x_{(i-1)})) \cdot \mu(A_{(i)}) \quad (3.17)$$

(i): indique une permutation tel que  $0 \leq f(x_i) \leq \dots \leq f(x_n)$

$A_{(i)} = x_{(i)}, \dots, x_{(n)}$  et  $f(x_{(0)}) = 0$  *Propriétés :*

L'intégrale de Choquet est idempotente, continue et monotone et stable pour les changements l'échelle linéaire.

Compte tenu des indices d'interaction et de l'indice de Shapely présentées précédemment en III.6.6, l'Intégrale de Choquet peut s'exprimer comme suit :

$$C_\mu(a) = \sum_{I_{ij} > 0} (a_i \wedge a_j) I_{ij} + \sum_{I_{ij} < 0} (a_i \vee a_j) |I_{ij}| + \sum_{i=1}^n a_i \left( I_i - \frac{1}{2} \sum_{j \neq i} |I_{ij}| \right) \quad (3.18)$$

L'Intégrale de Choquet est composé d'une partie linéaire définie par l'indice de Shapley, d'une partie traduisant la complémentarité entre les critères et d'une partie exprimant la redondance entre les critères.

### 3.6.7 Relation de l'intégrale de Choquet avec divers opérateurs d'agrégation classiques

À travers cette expression on retrouve la similarité avec les autres opérateurs, grâce au type de l'interaction. On distingue les cas suivants :

Opérateur	Indice de Shapley pour $i$	Indice d'interaction pour $i,j$
Somme pondérée	$w_i$	0
OWA	$1/n$	$\frac{w_n - w_1}{n-1}$
minimum	$1/n$	$1/(n-1)$
maximum	$1/n$	$-1/(n-1)$

Figure 3.11: Indices de shapley et d'interaction pour divers opérateurs

\*Interaction positive : une agrégation conjonctive (min)

\*Interaction négative : une agrégation disjonctive (max)

En réalité, il existe un dilemme auquel est parvenu Grabisch, il s'agit de parvenir à effectuer une agrégation pour une mesure 2-additive.

*Interprétation :*

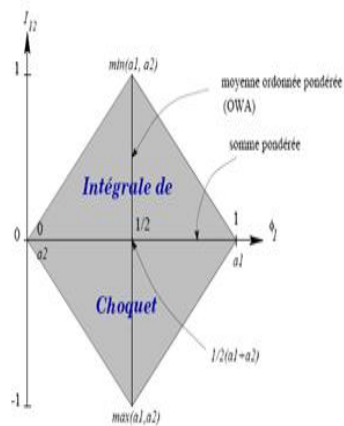


Figure 3.12: Interprétation de l'intégrale de Choquet en terme d'indice d'interaction (Source: Grabisch, 2002)

Le plan de la Fig.3.6.7 contenant le graphique  $(I_{12}, \Phi_1)$  est suffisant pour représen-

ter convenablement l'interprétation de l'intégrale de Choquet en terme d'indices d'interaction vu que  $\Phi_1 = 1 - \Phi_2$ . On observe dans ce graphique que sur l'axe horizontal, on perçoit la somme pondérée et sur l'axe vertical la moyenne ordonnée pondérée (OWA), les extremums de cet axe présentent le minimum et le maximum. L'intégrale de Choquet couvre le losange en gris. Cela montre clairement que pour  $k=2$ , toute intégrale de Choquet peut s'écrire comme une combinaison convexe d'un minimum, d'un maximum, et de deux dictateurs (les extremums de l'axe horizontal).

### 3.6.8 Choix de l'opérateur d'agrégation

Une façon simple de construire une mesure floue  $\mu$  (paragraphe III.6.6) est de considérer un opérateur d'agrégation, vérifiant la monotonie et l'unanimité pour les valeurs extrêmes, et de poser :

$$\mu(A) = X(f_A(1), \dots, f_A(n)), \forall A \in \tilde{P}(N) \quad (3.19)$$

L'intégrale de Choquet et l'intégrale de Sugeno vérifient la propriété remarquable:

$$C_\mu(\sigma_A) = \mu(A), \forall A \subset N \quad (3.20)$$

$\sigma_A = (\sigma_A^1, \dots, \sigma_A^n)$  avec:  $\sigma_A^i = 1$  si  $i \in A$  et 0 sinon. Après avoir donné une présentation des approches d'agrégation multicritères classiques ainsi que leurs limites, on se propose d'étudier plus profondément l'intégrale de Choquet ainsi que son apport dans l'évaluation multicritère.

En revenant à l'exemple précédent (tableau III.1), on va recalculer les scores attribués aux étudiants. Pour cela on attribue les mesures floues aux matières comme suit :

\*Interactions entre les critères : Soient  $i$  et  $j$  deux critères dont on veut étudier l'interaction, on considère l'importance de  $i$  et  $j$  pris ensemble, on distingue les cas suivants :

$$1^{er} cas : \mu(i, j) > \mu(i) + \mu(j)$$

Dans ce cas, il existe une synergie ou encore une complémentarité entre i et j

$$2^{me} cas : \mu(i, j) < \mu(i) + \mu(j)$$

Entre i et j on conclut qu'il y'a une synergie négative ou encore une redondance

$$3^{me} cas : \mu(i, j) = \mu(i) + \mu(j)$$

Les critères i et j sont indépendants.

Nous essayons de traduire les préférences du directeur, pour cela on considère les mesures floues associées aux matières comme suit:

$$\mu(M) = \mu(P) = 0.45$$

$$\mu(L) = 0.3$$

Calculons:

$$\mu(M, P) = 0.5 < \mu(M) + \mu(P) = 0.9$$

$\implies$  Redondance

$$\mu(M, L) = \mu(M = P, L) = 0.9 > \mu(M) + \mu(L) = 0.75$$

$\implies$  Complémentarité

On classifie les notes pour chaque candidat selon un ordre de permutation :

$$E1_L < E1_P < E1_M$$

Si on considère l'étudiant E1:

$$\begin{aligned} C_\mu(E1) &= [\mu(L, P, M) - \mu(P, M)] \cdot E1_L + [\mu(P, M) - \mu(M)] \cdot E1_P + [\mu(M)] \cdot E1_M \\ &= [1 - 0.5] \cdot 10 + [0.5 - 0.45] \cdot 16 + [0.45] \cdot 18 \\ &= 13.9 \end{aligned}$$



Le candidat E2 quand à lui présente l'ordre de permutation suivant :

$$E2_M < E2_P < E1_L$$

$$\begin{aligned} C_\mu(E2) &= [\mu(M, P, L) - \mu(P, L)] \cdot E2_M + [\mu(P, L) - \mu(L)] \cdot E2_P + [\mu(L)] \cdot E2_L \\ &= [1 - 0.9] \cdot 10 + [0.9 - 0.3] \cdot 12 + [0.3] \cdot 18 \\ &= 13.6 \end{aligned}$$

Pour l'élève E3, l'ordre de permutation de ses notes est de :  $E3_M < E3_P < E3_L$

$$\begin{aligned} C_\mu(E3) &= [\mu(M, P, L) - \mu(P, L)] \cdot E3_M + [\mu(P, L) - \mu(L)] \cdot E3_P + [\mu(L)] \cdot E3_L \\ &= [1 - 0.9] \cdot 14 + [0.9 - 0.3] \cdot 15 + [0.3] \cdot 15 \\ &= 14.9 \end{aligned}$$

Ainsi les scores des étudiants en application de l'intégrale de Choquet.

	M	P	L	Score global
E1	18	16	10	13.9
E2	10	12	18	13.6
E3	14	15	15	14.9

Figure 3.13: Application de l'intégrale de Choquet

On constate suite à cette application que l'intégrale de Choquet a permis de respecter les préférences désirées par le directeur. En effet, l'étudiant E1 n'est plus très favorisé par rapport aux autres étudiants, l'étudiant E2 est toujours dans le dernier rang ce qui satisfait la tendance scientifique de l'école.

### **3.6.9 Limites de l'intégrale de Choquet**

Malgré les avantages apportés par l'intégrale de Choquet, ce nouvel outil possède certaines limites tel que sa complexité exponentielle ou encore lorsqu'on traite des données ordinales : cas où le nombre de critères est important, le nombre d'alternatives est trop grand. Dans ce cas, l'intégrale de Choquet n'est pas le plus adapté. Nous présentons dans ce qui suit, notre approche de résolution d'un problème de régulation intégrant les Cybercars.

## **3.7 Formulation du problème**

Nous proposons de réaliser un système d'aide à la décision qui vient compléter les SAE et SAI de façon plus visible en apportant des alternatives aux actions de décision courantes. Le but est de favoriser l'interfaçage entre les TP et les Cybercars. L'avantage d'avoir recours à une action de régulation externe est de réduire la charge sur les véhicules de TP, et parvenir à réduire le temps d'attente des passagers en mode perturbé.

Nous proposons de faire intervenir les cybercars dans le processus de régulation à travers la mise en place d'un système noria (III.3.5.3) qui va assurer le transfert des passagers d'un point de perturbation donné au prochain nœud d'injection dans le réseau multimodal.

La démarche proposée de résolution du problème de régulation (figure III.10) s'effectue suivant quatre étapes fondamentales : - La détection et l'identification de la perturbation : au cours de cette phase, nous évaluons la criticité de la perturbation.  
- La génération des décisions de régulation : une phase de construction des décisions s'effectue afin de fournir au régulateur les stratégies d'exploitations possibles en

fonction des données sur le réseau et sur la perturbation.

- L'évaluation des décisions : Une agrégation multicritère par le moyen de l'Outil de l'Intégrale de choquet permet d'évaluer les stratégies d'exploitations candidates pour donner lieu à l'action de régulation qui répond au mieux aux exigences du régulateur.
- L'activation de la stratégie d'exploitation retenue : le régulateur humain demeure l'élément clé dans le processus de la prise de décision. La validation d'une action de décision ne peut s'effectuer que par un régulateur humain. d'assurer la validité de cette

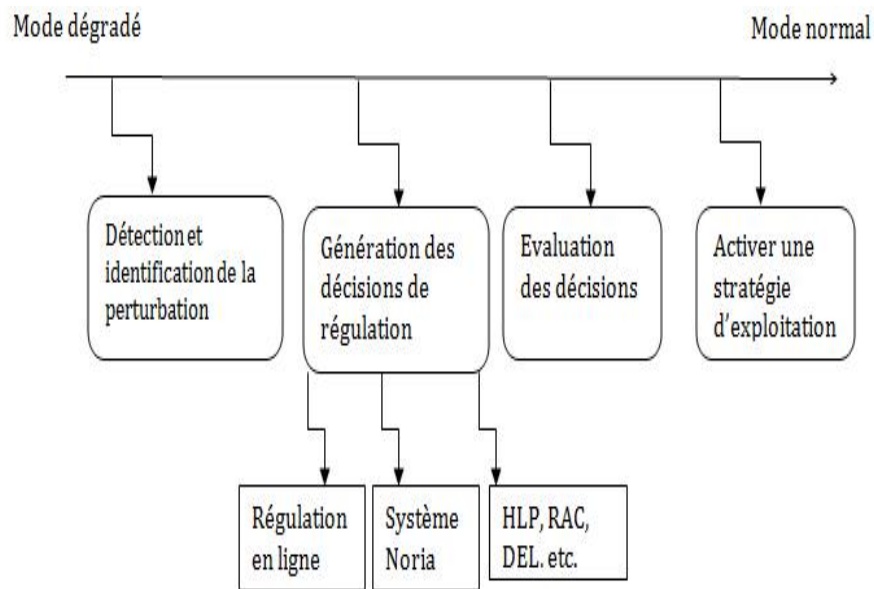


Figure 3.14: Approche proposée de régulation

proposition, nous détaillons cette action de régulation et son intégration dans le système d'aide à la décision [MHS<sup>+</sup>08]]. Nous définissons le problème comme suit :

-  $D_t = d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_n$  décrit l'ensemble des positions de perturbations dans un réseau à un instant  $t$ .

-  $C_t = c_1, c_2, \dots, c_j, \dots, c_m$  représente l'ensemble des véhicules Cybercars disponibles.

-  $N_t = n_1, n_2, \dots, n_k, \dots, n_p$  correspond à l'ensemble des nœuds de réinjection dans le réseau.

-  $V_i^l$  représente le  $i$ ème véhicule de la ligne  $l$ ,

- $S_k^r$  la même station de la ligne,
- Chaque Cybercar est caractérisé par une capacité  $C_{cyb}$ , une vitesse de pointe  $V_{cyb}$ .
- Un service noria correspond à un déplacement entre un point  $d_i \in D$  et un point  $n_k \in N$  utilisant une ressource  $c_j \in C$ .

*La détermination du périmètre de la perturbation nous renseigne sur une ou plusieurs lignes perturbées, l'ensemble des véhicules concernés par la perturbation ainsi que sur le nœud de réinjection du transfert modal.*

### 3.7.1 Détermination du périmètre de la perturbation

L'horizon spatio-temporel adapté au problème est donné de telle façon qu'une fois un incident détecté, on pourrait retrouver les véhicules et les stations concernés par cette perturbation. On pourrait dans ce cas être informé de la zone de perturbation concernée d'une part, du TMT (Tableau de Marche Théorique) concernant les véhicules et les stations en question d'autre part, ainsi que de l'estimation des horaires de passage dans l'état perturbé du réseau (sans régulation) ce qui constitue le TMP (Tableau de Marche Perturbé)

Fayech[Fay03] propose une représentation graphique illustrée par la figure III.8 de la construction de l'horizon à partir de l'instant de perturbation. Sachant que le SAI envoie au SAE une trame d'informations sous la forme : " A l'heure  $hh:mm$ , une perturbation est détectée au niveau du  $nIJud$   $di$ , impliquant le véhicule, causant un retard de  $x$  minutes ". Une perturbation est donc caractérisée par :

- La ligne et la course touchées.
- La première station affectée.
- La durée estimée de la perturbation (retard).
- Le nombre de passagers dans le véhicule perturbé.
- L'intervalle courant (en minutes) entre le véhicule perturbé et le véhicule qui le suit.
- Le nombre de passagers dans le véhicule qui suit le véhicule perturbé.
- La nature de la perturbation Panne ou Retard.
- L'heure de détection de la perturbation (heure de pointe ou non)

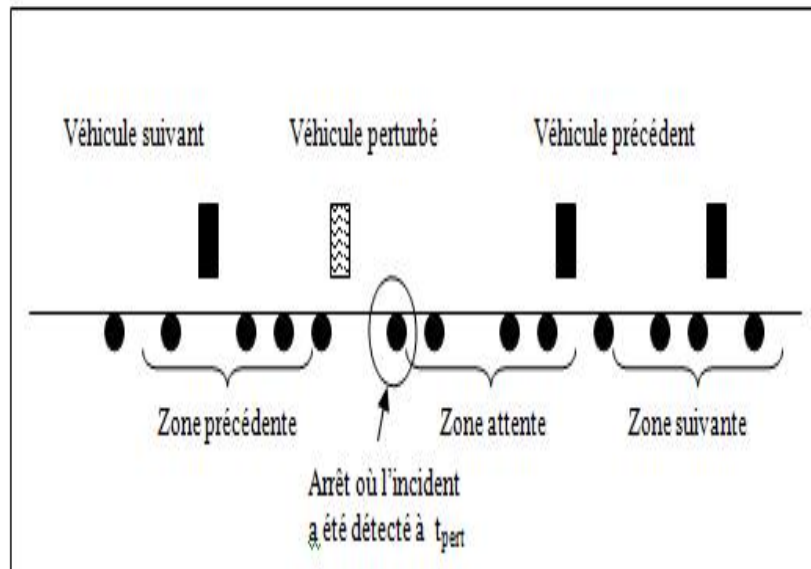


Figure 3.15: Construction de l'horizon à partir de l'instant  $t_{pert}$

Nous adoptons dans la détermination du périmètre de la perturbation, une approche géométrique qui a été initialement introduite par Cure[CF84] pour la régulation en terminus (III.3.5.1), (figure III.9) et qui a été améliorée par la suite par Ould Sidi[Oul06]. Nous présentons en annexe II, les détails du calcul des bornes délimitant l'horizon de la régulation.

### 3.7.2 Construction des décisions

La construction des décisions réalisables s'effectue par un raisonnement inductif. À travers un moteur d'inférence, qui à partir d'une base de connaissance, une base des règles, génère les solutions réalisables.

Nous donnons dans la suite les éléments de base sur lesquelles s'appuie le raisonnement :

- La fréquence de la ligne.
- La ligne et le sens.
- La valeur du retard du véhicule perturbé.

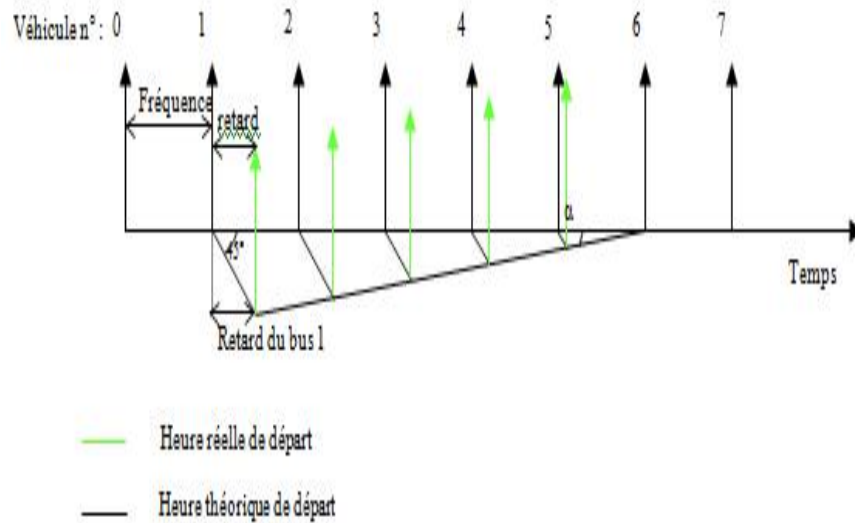


Figure 3.16: Principe de la régulation en terminus

- L'heure de la journée.
- Si la perturbation cause un blocage ponctuel ou un blocage général.
- La visibilité ou non du véhicule suivant le véhicule perturbé.
- Les conditions météorologiques (beau temps/ mauvais temps).
- L'horaire de la perturbation.
- La durée estimée de l'action.
- Le nombre de véhicule de réserve et de chauffeurs disponibles.

Des données statiques sont comprises dans la base de connaissance à savoir : le battement, la charge, le report, la capacité maximale, le nombre de stations de la ligne.

Contrairement aux autres classes de décision, la régulation en ligne est la plus appréciée par les régulateurs vu sa facilité d'exécution. Néanmoins, afin de parvenir à générer un tableau de marche régulé qui va mener au bout d'un certain temps au tableau de marche théorique à partir du TMP, cela nécessite une intervention sur les horaires de départ et d'arrivée des véhicules tout en optimisant le temps de parcours total et en respectant les contraintes du réseau. Pour ces raisons, il serait plus adéquat de générer la

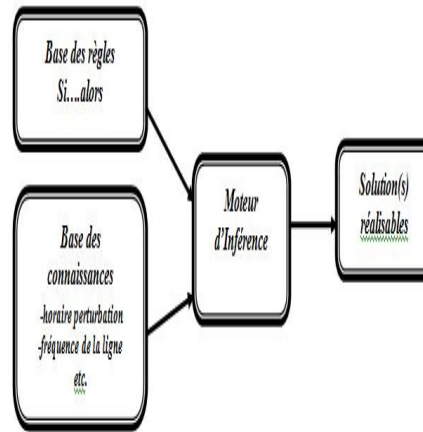


Figure 3.17: Principe de construction des décisions

décision de régulation en ligne par un algorithme d'optimisation multiobjectif.

### 3.7.3 Algorithme évolutionnaire de régulation

#### 3.7.3.1 Détermination de la variable de décision

Coder les solutions d'un problème de décision implique le recours à une variable qui exprime une instruction à donner à un véhicule lors de son passage par la station où la perturbation a été détectée. En effet, la régulation en ligne ne prend pas en considération les instants antérieurs à la perturbation.

Le codage (figure III.11) doit représenter à chaque instant le véhicule concerné, la station concernée et l'action à entreprendre. De ce fait, nous avons eu recours à un codage sous forme de tableau dont les lignes correspondent aux stations et les colonnes aux véhicules. Le contenu de chaque case correspond à l'instruction à exécuter. Ce codage a été élaboré par Aloulou [Alo99]. Une instruction envisageable à donner au conducteur peut être soit une demande de retarder le véhicule donc de s'arrêter pour une période donnée à la station ou d'avancer plus rapidement le véhicule ce qui correspond à une manœuvre d'accélération ou de ne rien changer au comportement du conducteur et donc de ne rien faire.

Dans un cas réel, il est quasiment exclu de demander à un chauffeur d'accélérer. La

		stations j							
Véhicules i		.	.	.	..	.	..	..	.
		.	.	.	.	.	.	.	.
		.	.	.	.	.	.	.	.
		.	.	.	.	.	.	.	.
		.	...	.	.	.	.	.	.
		.	.	.	.	.	.	.	.
		.	.	..	.	..	.	.	.

Figure 3.18: Représentation du chromosome de l'algorithme OptReg

régulation en ligne consiste donc à maintenir une certaine forme de régularité entre les véhicules tout en les retardant.

### 3.7.3.2 Calcul des horaires de départ et d'arrivée des véhicules

Afin de fournir le tableau de marche régulé, il est important d'établir une relation entre les horaires de départ et d'arrivée de et vers les stations.

Comme une décision de régulation en ligne consiste à agir sur les temps d'arrêt et sur la durée du parcours. Alors l'horaire de départ du véhicule  $V_i^l$  de la station  $S_i^l$  notée par  $td_{ij}^l$  est la somme de l'horaire d'arrivée  $ta_{ij}^l$  du temps d'arrêt prévu ( $ts_{ij}^l$  et à la modification en unité de temps à rajouter : ce qui donne

$$td_{ij}^l = ta_{ij}^l + a_{ij}^l \times (ts_{ij}^l + \epsilon_{ij}^l) \quad (3.21)$$

L'horaire d'arrivée de  $V_i^l$  à la station  $S_j^l$  est établi à partir de l'horaire de départ de la dernière station desservie avant  $S_j^l$ , de la durée normale de parcours,  $t_{ikj}^l$ , correspondant aux conditions réelles d'exploitation, entre  $S_k^l$  (arrêt précédent de  $V_i^l$  à  $S_j^l$ ) et  $S_j^l$  et la modification en unité de temps. Ce qui permet d'avoir :

$$ta_{ij}^l = td_{ik}^l + x_{ikj}^l \times (t_{ikj}^l + \delta_{ikj}^l) \quad (3.22)$$



### 3.7.3.3 Initialisation de la population

La population des solutions doit se trouver sur la zone de régulation, il faut donc limiter la génération aux bornes inférieures et supérieures de la zone. Si les décisions primaires font défaut, nous avons recours à une génération aléatoire des solutions.

### 3.7.3.4 Evaluation de la population

Les critères qui sont affectés par la régulation en ligne sont la régularité et la correspondance. Les kilomètres commerciaux et la qualité de service (III.3.6) ne le sont pas vu que la distance parcourue reste la même et les paramètres de la mesure de la qualité de service ne sont pas modifiés.

L'évaluation de ces critères s'effectue au moyen de l'Intégrale de Choquet (III.6.6).

Cette étape va nous fournir l'individu optimal ainsi que le tableau de marche optimal.

Nous désignons par :

MP et MN respectivement Mode Perturbé et Mode Normal.

$f_q(x)$  : le critère d'évaluation.

$f_q^*$ : la borne inférieure du critère  $\forall x \in \Omega, f_q(x) \geq f_q^*$ , où  $\Omega$  est l'espace des solutions réalisables et  $1 \leq q \leq 5$  (correspondant aux nombres de critères).

$B^q$ : Sous-ensembles des bonnes solutions selon le  $q^{ime}$  objectif.

$M^q$ : Sous-ensembles des mauvaises solutions selon le  $q^{ime}$  objectif.

$f(x) \in [f_1^*, +\infty[ \times \dots \times [f_5^*, +\infty[$  la fonction associée à chaque solution réalisable  $x$ .

$f_q^{pert}$ : La valeur du  $q^{ime}$  critère juste après la détection de la perturbation.

**1ère étape : détermination des bornes inférieures** Cette étape consiste à déterminer pour chaque critère  $f_q(x)$  une borne inférieure  $f_q^*$  telle que:  $\forall x \in \Omega ; f_q(x) \geq f_q^*$ , où  $\Omega$  est l'espace des solutions réalisables et  $1 \leq q \leq 5$ . L'utilisation de ces bornes va nous permettre aussi d'évaluer et de juger les solutions obtenues avec précision.

**2ème étape : homogénéisation des objectifs** Les critères d'évaluation n'ont pas toutes les mêmes unités de mesure, ce qui risque de créer des différences de plages

de variation entre les fonctions objectifs.

La logique floue permet d'homogénéiser les objectifs en associant une fonction  $f(x)$  chaque solution réalisable. Le but est de proposer pour chaque vecteur  $f(x)$ , une fuzzification de ces composants  $f_q(x)$  selon leurs positions dans les intervalles  $[f_q^*, f_q^{pert}]$ .

La fuzzification est appliquée en utilisant la fonction d'appartenance, comme le montre la Fig 3.19 Par la suite, à chaque vecteur  $f(x)$  nous associons deux vecteurs  $\bar{f}_B(x)$  et  $\bar{f}_M(x)$  tels que:  $\bar{f}_B(x) = (\mu_1^B(f_1(x)), \dots, \mu_5^B(f_5(x)))^T$

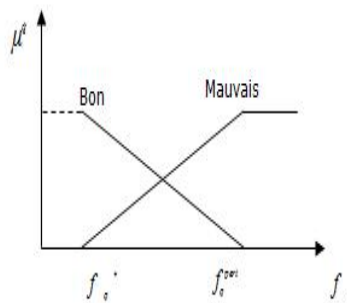


Figure 3.19: Fonction d'appartenance utilisée par la fuzzification

$\bar{f}_M(x) = (\mu_1^M(f_1(x)), \dots, \mu_5^M(f_5(x)))^T$   
 $\mu_q^B(f_q(x)) = \frac{f_q^{pert} - f_q(x)}{f_q^{pert} - f_q^*}$  si  $f_q(x) \in [f_q^*, f_q^{pert}]$   
 $\mu_q^B(f_q(x)) = 0$ , si  $f_q(x) \geq f_q^{pert}$  Ensuite, la qualité de chaque solution  $x$  est caractérisée par le vecteur  $\bar{f}_B(x)$  dont toutes les composantes sont homogènes, puisqu'elles appartiennent toutes au même intervalle  $[0,1]$  et sont toutes sans dimension.  $\mu_q^B(f_4(x)) = 1$  et  $\mu_q^B(f_5(x)) = 1$

**3ème étape : formulation de la fonction d'évaluation globale** La fonction globale d'évaluation utilisée est une agrégation de toutes les fonctions objectifs et peut être formulée comme suit :

$$F(x) = \sum_{q=1}^{q=5} w_q \cdot f_q(x) \text{ où } w_q \in [0, 1], \forall 1 \leq q \leq 5 \text{ est le poids de la } q\text{ième fonction objectif.}$$

$\sum_{q=1}^{q=5} w_q = 1$  En combinant les équations, nous pouvons maintenant ramener l'optimisation

multiobjectif à la maximisation du critère global suivant :

$F(x) = \sum_{q=1}^{q=5} w_q \cdot \mu_q^B(f(x))$  Suivant la méthode de détermination des différentes valeurs de poids de la fonction floue proposée, deux approches ont été utilisées[Kac03].

La première est une approche agrégative utilisant l'expression de la fonction globale pour trouver une solution selon les préférences du régulateur. La seconde est une approche basée sur la notion de 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 ses préférences.

**4ème étape : détermination de la direction de recherche** Dans ce paragraphe, nous traitons le cas où le régulateur peut exprimer ses préférences. De telles préférences sont généralement à caractère subjectif et pourraient être bien représentées en utilisant la logique floue. Dans cette optique, nous utilisons une application simple de la logique floue pour calculer les différents poids des fonctions objectifs, selon les choix évoqués par le régulateur. Deux cas sont considérés :

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

$$w_q = \frac{N_q}{\sum_{q=1}^{q=5} N_q}, \forall 1 \leq q \leq 5$$

**2ème cas :** le régulateur évoque ses préférences par un classement relatif des critères. Dans ce cas, à chaque critère, nous associons un nombre  $R_q \in 1, \dots, 5$  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. Suivant son rang, un critère peut être dans l'un des sous-ensembles flous : P (le sous-ensemble des critères prioritaires) et P (le sous-ensemble des critères non prioritaires), selon la fonction d'appartenance suivante (voir Fig.3.20):

$$\mu^P(R_q) = (1 - \frac{R_q}{6}); \forall 1 \leq q \leq 5 \quad (3.23)$$

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 in-

tensifie la priorité de certains critères. Pour intégrer ce concept d'intensification, nous

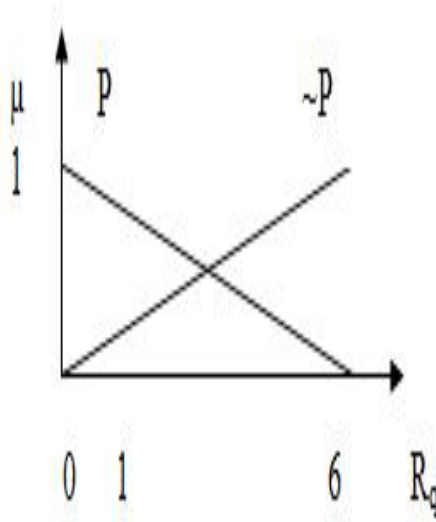


Figure 3.20: Les fonctions d'appartenance pour les critères

proposons une petite modification de la fonction précédente. Ainsi, elle sera remplacée par la fonction décrite dans l'équation suivante :

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

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:

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

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

$$w_q = \frac{N_q}{\sum_{q=1}^{q=5} N_q}, \forall 1 \leq q \leq 5$$

La figure 3.21

Algorithme I. Pseudo-code de fitness
<b>Etape 0</b> : Initialisation des critères de régulation
<b>Etape 1</b> : Déterminer les valeurs de ces critères après la détection de la perturbation
<b>Etape 2</b> : Fuzzification des critères
<b>Pour</b> chaque critère $f_q(x)$ <b>faire</b>
<b>Si</b> $f_q(x) > f_q^*$ , alors:
$\mu_q^B(f(x)) = 1$
<b>Si</b> $f_q^* < f_q(x) < f_q^{pert}$ alors :
$\mu_q^B(f_q(x)) = \frac{f_q^{pert} - f_q(x)}{f_q^{pert} - f_q^*}$
<b>Sinon</b>
$\mu_q^B(f(x)) = 0$
<b>Fin Pour.</b>
<b>Etape 3</b> : calculer la fonction coût total

Figure 3.21: Pseudo code de fitness

### 3.7.3.5 L'opérateur de sélection

L'opérateur de sélection utilisé étant la sélection par roulette de Goldberg amélioré à savoir "la sélection par les restes et remplacement " ce qui permet une meilleure diversité des individus. Les phases de cette opération sont détaillées dans la (figure III.14). ce qui permet une Dans la suite, E désigne la partie entière d'un nombre.meilleure diversité des individus. Les phases de cette opération sont détaillées dans Fig.3.22.

Dans la suite, E désigne la partie entière d'un nombre.

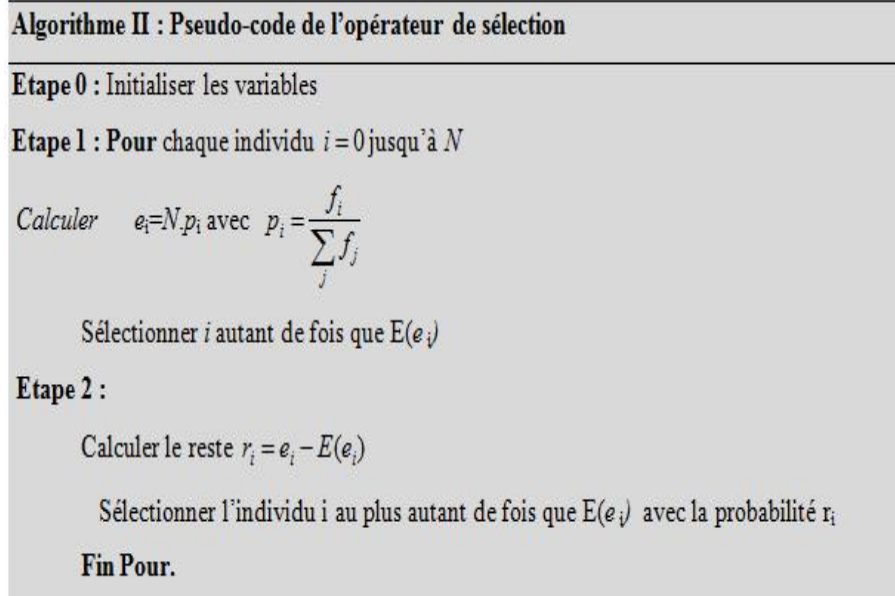


Figure 3.22: Pseudo code de l'opérateur de sélection

### 3.7.3.6 L'opérateur de croisement contrôlé

L'aspect matriciel du chromosome donne à priori le choix d'effectuer l'opération de croisement sur les lignes des stations ou celles des véhicules.

Le principe d'un croisement uniforme est d'établir un masque binaire généré aléatoirement de la même longueur que les génotypes. Si à la  $i$ ème position, il y a un 0, on conserve les symboles sinon on les échange. (voir Fig.3.23)

### 3.7.3.7 L'opérateur de mutation contrôlée

Pour diversifier les solutions, nous effectuons une mutation avec une probabilité  $p_{mut}$ .

A l'image de l'opérateur de croisement, la mutation est contrôlée (algorithme IV) Fig.3.24 afin d'éviter le cumul des retards. Notre approche consiste à évaluer les solutions réalisables au moyen de l'Intégrale de Choquet.

Algorithme III : Pseudo-code du croisement uniforme contrôlé 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 $s$ ;
<b>Pour</b> $i = 0$ jusqu'à $v-1$
<b>Pour</b> $j = 0$ jusqu'à $s-1$
Calculer pour le véhicule $i$ la somme des retards $SR[i]$ ;
<b>Tant que</b> $SR[i] > \text{limite du retard toléré pour le véhicule } i$ , alors
Choisir aléatoirement une station $j$ ;
Si décision à $j > 0$ , la décrémenter de 1 et décrémenter $SR[i]$ ;
<b>Fin tant que</b> ;
Idem pour $e_2$ ;
<b>Fin Pour</b>
<b>Fin Pour</b>

Figure 3.23: Pseudo code de l'opérateur de croisement uniforme

### 3.7.3.8 L'algorithme évolutionnaire de régulation

L'algorithme de régulation regroupe les étapes citées précédemment (initialisation de la population, sélection, croisement contrôlé, mutation contrôlée, évaluation par l'intégrale de Choquet. Fig. 3.25 Après avoir détaillé l'algorithme de la régulation en ligne, nous nous intéressons à l'algorithme du système Noria

## 3.8 Algorithme d'insertion du système NORIA

Comme la régulation en ligne, le système noria est une classe de décision qui est facile à mettre en place vu qu'elle ne requiert pas de modifications dans le trajet des véhicules défaillants ou bien l'engagement de personnels en plus. Le système de gestion des cybercars peut être indépendant de celui gérant le système de transport multimodal. Leur utilité est essentiellement plus élevée lorsque la nature de la perturbation est une panne ou une défaillance indéterminée et que le retard est estimé à plus des 12min tolérables par le fournisseur du service de transport; d'autre part les voyageurs qui descendent d'un bus en panne auront l'impression d'avoir moins attendu en sachant qu'ils

**Algorithme IV : Pseudo-code de la mutation contrôlée**

```

Pour  $i = 0$  jusqu'à  $v - 1$ 
    Pour  $j = 0$  jusqu'à  $s - 1$ 
        Choisir aléatoirement les allèles du chromosome à muter
        Muter les individus avec une probabilité  $p_{mut}$ 
    Fin Pour ;
Pour  $e_i$  calculer pour le véhicule  $i$  la somme des retards  $SR[i]$ ;
    Tant que  $SR[i] > \text{limite du retard toléré pour le véhicule } i$ , alors
        Choisir aléatoirement une station  $j$  ;
        Si décision à  $j > 0$ , la décrémenter de 1 et décrémenter  $SR[i]$ ;
    Fin tant que ;
Fin pour.

```

Figure 3.24: Pseudo code de l'opérateur de mutation contrôlée

seront transportés directement que s'ils savent qu'ils auront à attendre à la même station le même type de véhicule qui a subi l'incident. En effet, l'impact de la situation du trafic sur les voyageurs influe considérablement sur la qualité de prestations offertes à l'utilisateur.

Du point de vue théorique, la situation est plus complexe, en effet, l'efficacité du système Noria dépend de façon directe du choix des stations qui vont jouer le rôle de point d'enlèvement et le point de réinjection au réseau multimodal. Il faut donc trouver le couple optimal de stations (origine/destination). De plus, la régulation en ligne et la régulation par système Noria constituent des problèmes multiobjectifs NP-difficiles.

Il ne s'agit pas de traiter un problème dial-a-ride, en effet, l'allocation et la réallocation des cybercars constitue un autre volet du projet "cœur de ville".

La comparaison de l'efficacité de la mise en place du système Noria se fait par rapport aux autres actions de régulation du bus et du tramway.



**Algorithme V : Pseudo code de l'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.]

Figure 3.25: Pseudo code de l'algorithme de régulation

### 3.8.1 Les contraintes des cybercars

- Chaque cybercar a un seul point de départ et un seul point de destination.
- Chaque cybercar a une capacité maximale  $C_{cyb} \leq C_{cyb_{max}}$ .

En pratique :

- Les cybercars peuvent parcourir de courtes distances, nous écartons donc les parcours qui sont supérieurs à 5Km.
- Ils circulent à vitesse moyennes voisinant les 4m/s, soit 15Km /h.
- Ils ont une capacité maximale de 6 personnes.

### 3.8.2 Les critères du système Noria

Les caractéristiques d'un cybercar sont différentes de celles des moyens de transports classiques. L'encouragement des autorités de transport à favoriser les moyens dits " propres " par rapport aux autres modes particulièrement dans les centres villes des villes urbaines ainsi que le développement des sociétés de services partagées, toutes ces raisons ont permis d'établir en se basant sur les rapports d'évaluation des projets Cybercar <sup>1</sup> et CyberMove <sup>2</sup> et en coordination avec les différentes équipes du projet " cIJur de ville " des critères d'évaluation du système Noria. Ces critères sont :

- Régularité : ce critère consiste à essayer d'établir une certaine régularité entre les cybercars chargés de transporter les personnes qui sont descendus d'un autre moyen de transport et qui s'apprêtent à utiliser le système noria. Notons que les cybercars peuvent être commandés en mode (leader, suiveurs) sous forme d'un train de cybercars. Cela réduira la charge des passagers en attente; dans l'algorithme utilisé, nous envisageons cette possibilité pour permettre plus de fiabilité au système.
- 2) Les kilomètres commerciaux : les sociétés de services partagés sont en pleine immersion dans les centres villes des pays industrialisés, leur viabilité, malgré l'appui des autorités du transport et les lois sur le développement durables, reste lié aux bénéfices de ces sociétés. Il est donc nécessaire de contrôler le déplacement de ces véhicules dans le but d'optimiser le nombre et la qualité de la flotte mise à disposition des voyageurs.

Ce paramètre peut changer de façon continue vu que le calcul se fera à chaque fois sur la distance parcourue sur une ligne fictive reliant l'endroit de perturbation ou nœud de réinjection, le caractère flexible des cybercars fait que ces lignes diffèrent à chaque fois contrairement au bus et au tramway où la reconfiguration du réseau ne s'effectue pas de façon systématique.

- Coût environnemental : le respect de l'environnement et la réduction de l'énergie

---

<sup>1</sup>[www.cybercar.org](http://www.cybercar.org)

<sup>2</sup>[www.cybermove.org](http://www.cybermove.org)

font partie des critères les plus importants dans la prise des décisions de l'utilisation des cybercars, l'émission du CO<sub>2</sub> est réduite par rapport aux autres modes de transport publics, néanmoins ces véhicules sont alimentés par l'énergie électrique ou l'énergie hybride selon les modèles et la rationalisation de cette consommation s'avère primordiale.

- 4) La qualité de service : le confort des personnes demeure un des facteurs qui leur permettra de juger de l'efficacité de ce nouveau moyen de transport, nous avons opté pour la minimisation du nombre de correspondances que le passager aura à faire pour continuer son trajet à partir du point où il a emprunté le cybercar [MHS<sup>+</sup>08].

### 3.8.3 Principe

Le principe du système Noria se base sur l'intervention des véhicules au niveau des stations perturbées. Les Cybercars ramènent donc les personnes en attente vers d'autres stations où ils peuvent reprendre normalement leur course habituelle sur la même ligne. Si cela n'est pas possible, les cybercars se chargent de les ramener à une station d'une ligne proche qui a une correspondance avec la première ligne au niveau du sens destination.

#### *Flux des passagers*

Le flux des passagers en attente d'être ramené vers le prochain de nJud de réinjection sera absorbé au fur et à mesure et sera considéré de la même façon que les passagers dans une station en attente de l'arrivée d'un bus qui a subi un retard.

### 3.8.4 Algorithme

Le principe de cet algorithme est d'opérer par rapport à la zone de régulation et de vérifier si cette ligne est en correspondance avec d'autres lignes. Si c'est le cas, la priorité est donnée afin d'assurer cette correspondance. Sinon, les voyageurs seront transférés vers la station qui a l'emplacement le plus optimal respectant les contraintes des cybercars d'une part et la distance entre le lieu du ramassage et celui qui les ramèneraient à

poursuivre leur trajet. Fig.3.26

Algorithme du système Noria
<p><b>Etape 0</b> : Initialisation de la population ; génération de la population initiale <math>P</math> à partir de la zone de régulation et les données sur les lignes</p> <p>Evaluation des individus de la population en utilisant l'intégrale de Choquet</p> <p><b>Etape 1</b> : sélection des meilleurs individus et création d'une population intermédiaire <math>P'</math>.</p> <p><b>Etape 2</b> : croisement</p> <p>Choisir de façon aléatoire deux parents de <math>P'</math>.</p> <p>Faire un croisement avec une probabilité <math>p_{cross}</math>.</p> <p>Insérer les parents et enfants non croisés dans <math>P</math>.</p> <p>Contrôler l'opérateur de croisement</p> <p><b>Etape 3</b> : Mutation</p> <p>Faire une mutation d'individus de <math>P</math> choisis aléatoirement avec une probabilité <math>p_{mu}</math></p> <p>Contrôler l'opérateur de mutation</p> <p><b>Etape 4</b> : Evaluation</p> <p>Calculer pour chaque individu le coût et garder les <math>n</math> meilleurs individus</p> <p><b>Etape 5</b> : si le Critère d'arrêt est atteint on arrête l'algorithme sinon on reprend à partir de l'étape 1.</p>

Figure 3.26: Pseudo code de l'algorithme de régulation

On obtient un couple optimal de stations  $(S_{depart}, S_{arrive})^*$  qui va être envoyé sous forme de commande au système gérant les cybercars.

L'évaluation des solutions s'effectue en tenant compte des:

- ◆ correspondances de la ligne affectée ;
- ◆ distances entre les stations de la ligne dans le sens de charge et les stations de la ligne en correspondance sinon la ligne la plus proche.

### 3.8.5 Evaluation de l'action de régulation externe

Nous supposons que le régulateur a exprimé ses préférences en attribuant les scores aux différents critères : régularité, kilomètres commerciaux, coût environnemental et qualité de service à travers une matrice qui renferme les poids donnés à chaque critère. En effet, le calcul de l'évaluation des critères s'effectue à partir d'une matrice symétrique qui exprime les interactions et les importances marginales entre les critères qui interviennent dans l'évaluation.

$$I_{ij} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{12} & a_{23} & a_{33} & a_{34} \\ a_{13} & a_{24} & a_{34} & a_{44} \end{pmatrix}$$

Sur cette matrice la diagonale présente le vecteur poids de chaque critère, la partie supérieure de la matrice exprime les interactions entre ces critères qui peuvent être soit indépendants, en synergie positives, en synergie négative.

### 3.9 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté les différentes structures des systèmes de transports existants.

Les systèmes existants sont des systèmes dépourvus de module d'aide à la décision qui permettent de réagir de façon efficace et quasi-instantanée aux perturbations du trafic. Ces limites nous ont induit à affiner le système de régulation et d'évaluation des décisions proposée par Ould Sidi en complétant sa mise en œuvre au sein du partenaire industriel Transvilles et de compléter les procédures de régulations auparavant théoriques. De plus, nous avons intégré une nouvelle composante qui s'ajoute au système de régulation proposé à savoir proposer une action de régulation innovante qui fait appel à l'utilisation d'un système Noria. Ce système consiste à utiliser les Cybercars comme moyen pour absorber le flux des passagers suite à la détection de perturbations sur le réseau multimodal.

Après avoir présenté l'approche de régulation proposée, nous illustrons les différents algorithmes proposés à travers des scénarios réels de perturbations.

## CHAPITRE 4

### SIMULATIONS ET RÉSULTATS

#### 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous montrons la faisabilité de nos travaux de recherche par le biais de simulations qui illustrent les algorithmes présentées dans le paragraphe III.7.

De ce fait, nous présentons en premier lieu le langage de programmation utilisé en justifiant notre choix. Par la suite, nous présentons nos résultats concernant la phase de construction des décisions admissibles issues de la base de règles. La régulation en ligne qui est une décision que les régulateurs utilisent assez souvent, sera construite à partir d'un algorithme évolutionnaire; puis évaluées selon les critères déterminés par l'outil de l'intégrale de Choquet.

Les scénarii de perturbations ont été inspirés d'un contexte réel à savoir les perturbations aléatoires qui surviennent dans le réseau de transport de Valenciennes.

#### 4.2 Outil informatique utilisé

L'algorithme d'aide à la décision doit posséder une certaine compatibilité avec les logiciels d'aide à l'exploitation présents dans les PCC. Au cours du projet SART (Système d'Aide à la Régulation du Transport) qui est une partie intégrante de notre travail où nous avons complété la mise en œuvre des actions de régulation Bus/tramway dans le système de régulation du réseau de transport Valenciennois, l'équipe de recherche du LAMIH de l'université de Valenciennes a pu simuler le réseau de transport de Valenciennes en utilisant QUEST (Queuing Event Simulation Tool) qui est un logiciel de simulation de la société Delmia. Fig. 4.1 Ce logiciel permet de visualiser en 3D le modèle à simuler, ce qui facilite le suivi du comportement du modèle. Il offre la possibilité de communiquer avec d'autres logiciels via des sockets appelées " connecteurs de réseau ". Grâce à cette modélisation, nous pouvons observer l'avancement des véhicules le



Figure 4.1: Modélisation du réseau de transport Valenciennois par QUEST (Source: T.Bonte)

long des lignes. L'avantage de cette simulation est qu'elle permet aux régulateurs de visualiser l'application des stratégies d'exploitation sans que cela ne requière des compétences spécifiques.

### 4.3 Validation de l'algorithme de construction des décisions

Les scenarii de perturbations vont permettre de tester l'algorithme de construction des décisions. Ces décisions vont par la suite être évaluées.



Table 4.I: Description du scénario 1

Incident 1	Retard	Station	Heure	Véhicule	Sens
-	Tramway	Marie Anzin	06:01	Tram4	1

#### 4.3.1 Scénario 1: Une perturbation

Le scénario illustré par le tableau 4.I décrit la présence d'un incident de type "retard tramway", l'heure de cet incident correspond à une heure creuse. L'algorithme de construction des décisions fournit les solutions réalisables suivantes :

- Absorption en terminus
- Régulation en ligne
- Direct en ligne
- Départ retardé en terminus

La collaboration avec l'INRETS, le laboratoire LAMIH de l'université de Valenciennes a permis de mettre en IJuvre une interface homme-machine (IHM) qui permet de fournir au régulateur un système d'aide à la décision informatisé. Sur cette interface, nous observons :

- 1) La liste des perturbations : dans cette zone de la fenêtre IHM, lorsqu'une perturbation affecte une ligne du réseau, elle s'affiche dans la liste (le véhicule qui a subi l'incident, l'horaire où la perturbation a été détectée, la durée du retard, la ligne affectée, la destination qui nous renseigne sur le sens du véhicule, la course et la station où la perturbation a été détectée).
- 2) La liste des décisions réalisables : une fois la perturbation sélectionnée, le système affiche dans cette zone la liste des décisions réalisables (un code de la décision suivi du nom complet de la décision, un code couleur à l'image de l'évaluation de chaque critère en plus d'une évaluation globale).
- 3) La liste des véhicules : il s'agit dans cette zone d'afficher, la liste des véhicules qui

**Liste des perturbations**

Véhicule	Horare	Durée	Ligne	Destination	Course	Station	Lignes touchées
0104	06:01:15	00:05:00	TRAM(1)	UNIVERSITE	3	MAIRIE ANZIN	

**Liste des décisions**

Abbréviation	Classe de décision	RT	CR	PT	KM	QS	Global %
AET	ADSORPTION EN TERMINUS	●	●	●	●	●	13
REL	REGULATION EN LIGNE + EN TERMINUS	●	●	●	●	●	67
DEL	DIRECT EN LIGNE	●	●	●	●	●	34
DRT	DEPART RETARDE AU TERMINUS	●	●	●	●	●	43

**Véhicules**

**Services**

**Horaires**

**Actions possibles**

Port ouvert : 1000

Figure 4.2: Interface SAD

sont concernés par la décision sélectionnée.

4) La liste des services : cette liste donne l'ensemble des services qui sont liés aux véhicules concernés par la décision.

5) Les horaires : dans cette zone, on observe l'affichage des horaires théoriques et des horaires régulés pour le service sélectionné.

6) Validation : c'est au régulateur de valider l'action de décision qu'il juge la plus adéquate. Le code couleur choisi permet d'éviter de nombreuses données numériques, cela facilite l'interprétation de l'évaluation. Ce code passe par des paliers du vert au noir, du meilleur au médiocre.

Nous observons que lors de l'évaluation le score de la régulation en ligne (67) Nous rap-

pelons que la régulation en ligne consiste à retarder deux à trois véhicules en amont et en aval du véhicule perturbé dans le but d'assurer une régularité du service.

Nous observons que lors de l'évaluation le score de la régulation en ligne (67%) est largement au dessus des autres scores. Nous rappelons que la régulation en ligne consiste à retarder deux à trois véhicules en amont et en aval du véhicule perturbé dans le but d'assurer une régularité du service.

### 4.3.2 Scénario 2: Incidents en heure creuse

#### 4.3.2.1 Description du scénario

Ce scénario consiste à traiter plusieurs perturbations simultanées, dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau :

Table 4.II: Description du scénario 2

-	Type	Durée du retard	Station	Heure	Véhicule	Sens charge
Incident 1	Panne	–	Poterne	09:28	Bus 62	Non
Incident 2	Retard	5 min	Florales	09:28	Bus 11	Non
Incident 3	Retard	5 min	St-Catherine	09:28	Tram 9	Oui
Incident 4	Retard	18 min	Aerodrome	09:29	Bus 17	Oui

#### 4.3.2.2 Construction des décisions

La construction de la décision tient compte de la position de la perturbation par rapport à la ligne affectée.

En effet, l'incident 1 est arrivé au niveau de la *fin de ligne*.

En toute logique, l'algorithme de construction de décision propose comme solutions réalisables:

- Absorption en terminus.
- Injection de réserve

*L'incident 2* est survenu simultanément au niveau de la fin de la ligne également. La solution réalisable pour cet incident est ;

- Absorption en terminus

*L'incident 3* qui affecte la ligne de Tramway a eu lieu en milieu de ligne. Les solutions item Absorption en terminus. réalisables sont :

- Absorption en terminus
- Régulation en ligne
- Direct en ligne
- Départ retardé en terminus

*L'incident 4* a eu lieu en milieu de ligne. L'algorithme de construction des décisions nous propose les actions réalisables suivantes:

- Absorption en terminus
- Direct en ligne
- Demi-tour avec échange de conducteurs et de véhicules

L'intervention du système Noria va s'effectuer sur l'incident 1 et 4, la nature de l'incident étant respectivement une Panne et un retard de 18min Dans ce cas de figure, la solution " Absorption en terminus " a un score plus important que celui du " système Noria ".

**4.3.2.2.1 l'incident 1 et l'incident 4** On constate que *l'incident 1* a eu à la station Poterne destination Tertiales en sens 2 et en fin de ligne donc on début de ligne. *Incident 4*

Le retard a été observé au niveau de la station " Aéroport " en direction de " Gare de Valenciennes ".

Le système Noria a proposé le couple de station (Poterne, Clemenceaux).

Ce retard a eu lieu en milieu de ligne. L'algorithme du système Noria propose (Aérodrome, St-Christophe).

En effet, la station Poterne assure une correspondance avec les lignes 513 et 604, ces lignes relient Valenciennes à Quéréning et Artres (à l'Est de Valenciennes) tandis que la ligne 62 ramenait les passagers plutôt vers l'Ouest.

$(S_{12}^{17}, S_{11}^{23})$  La station  $S_{11}^{23}$  et  $S_{14}^{27}$  correspondent à la même station. Nous constatons que l'algorithme n'a pas pris en considération cette correspondance, mais a cherché une station qui se rapproche le plus du parcours théorique de la ligne 62.

#### 4.3.2.3 Evaluation des décisions

**4.3.2.3.1 Evaluation de l'incident 1** Après différentes simulations, nous avons fixé la matrice d'évaluation de l'Intégrale de Choquet comme suit  $I_{ij} =$

$$\begin{pmatrix} 0.3 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & -0.1 & 0 \\ 0 & -0.1 & 0.1 & 0.05 \\ 0 & 0 & 0.05 & 0.4 \end{pmatrix}$$

Table 4.III: Evaluation de l'incident 1

classes de décision	$\mu(AT)$	$\mu(TT)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$	Score global
AET	0.22	0.86	0.14	1	1	0.61
-	-	$\mu(CE)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$	Score global
NS	-	1	0	0.3	0.75	0.5

Dans ce cas de figure, la solution " Absorption en terminus " a un score plus important que celui du "système Noria".

**4.3.2.3.2 Evaluation de l'incident 4** Le retard a été observé au niveau de la station " Aérodrome " en direction de " Gare de Valenciennes ". Ce retard a eu lieu en *milieu de ligne*.

L'algorithme du système Noria propose (Aérodrome, St-Christophe) ( $S_{12}^{17}, S_{11}^{23}$ ) La station  $S_{11}^{23}$  et  $S_{14}^{17}$  correspondent à la même station.

Table 4.IV: Evaluation de l'incident 1

classes de décision	$\mu(AT)$	$\mu(TT)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$	Score global
DEL	0.7	1	0	1	0.6	0.59
-	-	$\mu(CE)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$	Score global
NS	-	1	0.53	1	1	0.74

La mise en place du système Noria a un score global de 0.74 bien plus élevé que la solution du Direct en Ligne. Cela s'explique notamment par le rapprochement des stations.

### 4.3.3 Scénario 3: Incidents en heure de pointe

#### 4.3.3.1 Description du scénario

Ce scénario consiste à traiter plusieurs perturbations simultanées, dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau :

Table 4.V: Description du scénario 2

-	Type	Durée du retard	Station	Heure	Véhicule	Sens charge
Incident 1	Retard	5min	Postillon	11:42	Bus 15	Non
Incident 2	Panne	—	Albert I	11:43	Bus 63	Non

#### 4.3.3.2 Construction des décisions

**4.3.3.2.1 Incident 1** Le retard observé au niveau de la station " Postillon " est survenu en fin de ligne qui a pour destination " Crespin " L'algorithme de construction des décisions propose :

- Absorption en terminus

**4.3.3.2.2 Incident 2** La ligne 11 a été affectée par une perturbation détectée au niveau de la station " AlbertI " dans le sens qui a pour destination " Maing Rucart ". Il s'agit d'une station se trouvant en début de ligne. L'algorithme de construction des décisions propose les solutions réalisables suivantes:

- Absorption en terminus
- Injection Reserve

Les deux perturbations sont critiques.

Nous traitons l'incident 1 avec l'algorithme du système Noria qui propose ( $S_{28}^{15}, S_{23}^{16}$ ) ou encore (Postillon, Quardouble).

#### 4.3.3.3 Evaluation des décisions

Table 4.VI: Evaluation de l'incident 1

classes de décision	$\mu(AT)$	$\mu(TT)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$	Score global
AET	0.27	1	0	0.75	0.3	0.44
-	-	$\mu(CE)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$	Score global
NS	-	1	0.3	0.75	1	0.45

**4.3.3.3.1 Evaluation de l'incident 1** Dans ce cas de figure, les deux actions de régulation se rapprochent de point de vue score global. Dans ce cas le régulateur aura le choix entre la classe de décision qui présente le score le plus important vis-à-vis du critère individuel qu'il choisira.

**4.3.3.3.2 Evaluation de l'incident 2** L'algorithme du système Noria nous propose la solution ( $S_5^{63}, S_7^{63}$ ). En effet il est possible d'emprunter la ligne 62 qui a un parcours très proche de la ligne 63 comme  $S_5^{62} = S_7^{63}$

Les solutions proposées par l'algorithme de construction des décisions ne sont pas aussi performantes que la mise en place d'un système Noria entre deux stations proches positionnées dans le centre ville.

Table 4.VII: Evaluation de l'incident 1

classes de décision	$\mu(AT)$	$\mu(TT)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$	Score global
AET	0.67	1	0	01	0.1	0.45
-	-	$\mu(CE)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$	Score global
NS	-	1	0.27	1	1	0.70

#### 4.4 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous nous sommes intéressés à plusieurs cas de figures selon des situations différentes. Il s'agit de traiter des scénarii à une ou plusieurs perturbations simultanées, en heure de pointe ou en heure creuse. Dans chaque situation, nous avons fourni les actions de décision réalisables selon le contexte grâce à l'algorithme de construction des décisions. Les perturbations les plus critiques ont été traitées par l'algorithme du système Noria afin de trouver les solutions envisageables pour résorber la perturbation. Une évaluation de l'action de décision retenue dans chaque volet a constitué l'étape finale sachant que le régulateur humain garde toujours le contrôle sur la validation de ces actions de régulation. Le but du système de régulation et évaluation n'étant pas de remplacer le régulateur humain mais de l'assister en particulier dans les situations les plus critiques.



## CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans cette thèse, nous avons proposé un système d'aide à la régulation et à l'évaluation des systèmes de transports multimodaux. Cette proposition vient en réponse au besoin des régulateurs d'être assistés dans leur prise de décision face aux perturbations aléatoires qui affectent, à n'importe quel moment de la journée, le réseau multimodal. La difficulté réside essentiellement de faire un choix de régulation quand des perturbations simultanées affectent le réseau. Certaines stations forment des nœuds de correspondance, ainsi si la ligne est affectée, la perturbation va avoir des répercussions sur les correspondances.

Nous avons élaboré un état de l'art sur les cybercars, un nouveau mode de transport à la demande, où nous avons montré que l'orientation actuelle des autorités de transport des pays industrialisés est dans la mise en place de systèmes favorisant le développement durable et permettant de faire des économies d'énergie considérables tout en apportant une diversification de modes au profit d'une mobilité intelligente. Un maillon important des objectifs de cette orientation consiste à réaliser une complémentarité entre les cybercars et les transports publics actuels. Il ne s'agit pas en effet de concurrencer les TP mais d'interagir avec eux. La construction d'un système de gestion de transport qui assure cette intégration repose sur différents éléments passant de la modélisation du système, à l'optimisation des problématiques qui lui sont liées. De ce fait, nous avons abordé les différentes approches de modélisation des systèmes de transport ayant chacun un objectif plus restreint que la simple reproduction du système. La modélisation coïncide généralement avec les objectifs visés qu'il s'agisse de représenter des flux de passagers ou de se focaliser sur les correspondances entre les lignes ou encore d'assurer une continuité dans l'information pour les voyageurs. Le système de régulation et d'évaluation proposé a nécessité également de positionner le problème de régulation par rapport aux problèmes d'optimisation multiobjectifs. Ainsi nous avons développé une méthode de résolution basée sur les algorithmes évolutionnaires pour élaborer un algorithme de régulation en ligne et un algorithme de système Noria.

Nous avons préconisé l'usage d'un outil d'agrégation multicritère puissant pour as-

sister les régulateurs à savoir les intégrales de Choquet, capables de tenir compte des éventuelles interactions entre les critères.

L'intégration des cybercars dans ce processus de régulation et d'évaluation s'est effectuée par le développement d'un algorithme de mise en place d'un système noria qui va assurer le transfert des usagers du lieu de la perturbation vers le nIJud de réinjection dans le réseau multimodal de façon optimale.

Afin de valider toutes ces approches, nous avons présenté différents scénarios qui traitent des perturbations simultanées où nous avons détaillé la démarche consistant à proposer en premier lieu les solutions réalisables aux moyens d'actions de régulation des modes bus et tramway. Puis, en faisant appel à l'algorithme du système noria. L'évaluation de ces actions a permis de montrer que l'intégration des cybercars comme action de régulation s'avère une solution prometteuse qui ouvre le chemin à un développement plus pointu des processus de complémentarité entre les cybercars et les transports publics. Ces recherches dégagent en plus des retombées scientifiques citées précédemment, des perspectives envisageables : L'implantation de cette approche en milieu industriel demeure la plus importante comme elle assure la valorisation du système de régulation et d'évaluation proposé. La coordination avec les laboratoires de recherche qui se focalisent sur les aspects techniques propres aux cybercars permettra d'ajuster les contraintes de ce système et de ces caractéristiques de la façon la plus réaliste possible. Nous envisageons également d'améliorer les algorithmes proposés en assurant une approche basée sur l'exploration et l'exploitation de l'espace de recherche pour fournir de meilleurs résultats optimaux. Concernant l'intégration des cybercars dans le système multimodal, le fait qu'il s'agit d'un sujet d'actualité et dont les voies de recherches sont quasi vierges à cet instant, plusieurs recommandations sont à prendre en considération comme le développement des études stratégiques sur les emplacements des flottes de cybercars par rapport à la carte des déplacements intermodaux, ce qui va optimiser l'intervention des cybercars. D'autres axes de recherche comme le routage des cybercars, le traitement des perturbations au sein de la flotte de cybercars, les problèmes d'allocation et de réallocations des cybercars sont des perspectives à creuser, entre autres dans le cadre du PPF " cIJur de ville " et des projets qui assureront sa continuité dans le

futur.

## **LISTE DES ABBRÉVIATIONS**

<i>PDU</i>	Plan de Déplacement Urbain
<i>STI</i>	Système de Transport Intelligent
<i>STC</i>	Système de Transport Cybernétique
<i>ACTIF</i>	Aide à la Conception des Systèmes de Transport Interopérables
<i>TAD</i>	Transport à la demande
<i>SAE</i>	Système d'Aide à l'Exploitation
<i>SAI</i>	Système d'Aide à l'Information
<i>SAEIV</i>	Système d'Aide à l'Exploitation et à l'Information Voyageurs
<i>TM</i>	Tableau de Marche
<i>TMP</i>	Tableau de Marche Perturbé
<i>TMR</i>	Tableau de Marche Régulé
<i>TMT</i>	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
$V^H$	Ensemble des véhicules considérés dans l'horizon
$S_k^r$	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 $S_k^l$
$\varepsilon_{ij}^l$	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 $S_j^l$
$ArrtPrec(V_i^l, S_j^l)$	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 pour destination $S_k^l$

## BIBLIOGRAPHY

- [Abr98] T. Abrahamsson. Estimation of origin-destination matrices using traffic counts- a literature survey. Technical report, International Institute for Applied Systems Analysis, 1998.
- [Alo99] M.A. Aloulou. Application des algorithmes génétiques à la régulation du trafic des bus. Master's thesis, Rapport de DEA en Informatique Industrielle à l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 1999.
- [And96] E. Anderson. Personal rapid transit: A response to professor vukan r. vuchic. 1996.
- [ANR04] G. Ambrosino, J. Nelson, and M. Romazzo. *Demand Responsive Transport Services: Towards the flexible Mobility Agency*. ENEA, 2004.
- [AT04] C.Kolski A. Trabelsi, H. Ezzedine. Architecture modeling and evaluation of agent-based interactive systems. *IEEE SMC*, 2004.
- [ATGBE02] A. Abbas-Turki, O. Grunder, R. Boukhek, and A. Elmoudni. Modular controlled stochastic petri nets for the connection monitoring. In *Proceedings of the world Automation Congress, Fourth International Symposium on intelligent automation and control ISIAC030*, 2002.
- [Bar03] V. Barichard. *Approches hybrides pour les problèmes multi-objectifs*. Informatique, Université d'Angers, Novembre 2003.
- [BGE03] R. Bouyekhf, A.O. Grunder, and A. Elmoudni. Modelling performance evaluation and planning. *Transportation Reviews*, 23(1):51, 2003.
- [Bur99] H. Burwitz. Survey on the bremer karte plus autocard. *University of Bremen*, 1999.

- [Car98] M. Caradec. *Modélisation des systèmes de production à haute cadence multiproduits par les Réseaux de Petri Lots Colorés*. PhD thesis, Université de Montpellier 2, 1998.
- [CF84] C. Cure and B. Foraste. Systèmes d'aide à l'exploitation et algorithmes de régulation. *Revue Recherche Transport Sécurité*, page 14, 1984.
- [Cho53] G. Choquet. *Théorie des capacités*. 1953.
- [CL04] J.F. Cordeau and G. Laporte. The dial-a-ride problem darp, variants modelling issues and algorithms. *4OR A Quarterly Journal of Operations Research*, 1(2):89, 2004.
- [CMN] T. G. Crainic, F. Malucelli, and M. Nonato. Optimization models and algorithms for an integrated demand responsive feeder bus system, handling uncertainty in the analysis of traffic and transportation systems, journal =.
- [Coq08] J. Coquio. *La performance adaptative des systèmes de transports collectifs. Modélisation, mesures de vulnérabilité et évaluation quantitative du rôle de l'information des voyageurs dans la régulation des situations perturbées*. PhD thesis, Université François Rabelais de Tours, 2008.
- [CPR] E. Grislin-Lesturgeon C. Petit-Rozé. *Organisation et applications des SMA*, chapter Système d'information à base d'agents, page 307.
- [CS02] Y. Colette and P. Siarry. *Optimisation multiobjectif*. 2002.
- [Dan94] R. Dannenberg. *non-additive Measure and Integral*. 1994.
- [Del00] X. Delorme. *Optimisation combinatoire et problèmes de capacité d'infrastructure ferroviaire*. Master's thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2000.
- [Dg05] B. Descotes-genon. *Problème de logistique inverse: Utilisation d'une méta-heuristique dans une application de transport de marchandises:*

La logistique dans les transports. *RER, Revue de l'électricité et de l'électronique*, page 34, 2005.

- [DP86] D. Dubois and H. Prade. Weighted minimum and maximum operations in fuzzy set theory. *Information Sciences*, 39:205, 1986.
- [DP93] J. Dearien and M. Plum. The capital, energy, and time economics of an automated, on demand transportation system. *IECEC*, 1993.
- [DR59] G.B. Dantzig and J.H. Ramser. The truck dispatching problem. *Management Science*, page 80, 1959.
- [DS04] M. Dorigo and T. Stutzle. *Ant Colony Optimization*. 2004.
- [eLL03] Z. Zhou et L. Li. Single hoist cyclic scheduling with multiple tanks: A material handling solution. *Computers and operations Research*, page 811, 2003.
- [Fay03] B. Fayeche. *Régulation des réseaux de transport multimodal: Systèmes multi-agents et algorithmes évolutionnistes*. PhD thesis, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2003.
- [Fou02] J.M Fourage. Recensement des pannes pour le tramway. Technical report, 2002.
- [Fre00] A. Freville. Méthodes de recherche locale. In *Journées AFPLC*. Ecole des mines de Nantes, 2000.
- [Gen06] A. Choquet Geniet. *Les réseaux de Petri Un outil de modélisation*. 2006.
- [GGaET99] M. Gendreau, F. Guertin, and J-Y Potvin and E. Taillard. Parallel tabu search for real time vehicle routing and dispatching. *Transportation sciences*, 4(33):381, 1999.



- [GGPS02] M. Gendreau, F. Guertin, J-Y Potvin, and R. Séguin. Neighborhood search heuristic for a dynamic vehicle dispatching problem with pickups and deliveries. Technical report, Centre de recherche sur les transports Université de Montréal, 2002.
- [Gha98] A. Ghaffari. Modélisation d’une ligne de métro en tenant compte du flux des passagers. Master’s thesis, Université des sciences et technologies de Lille, 1998.
- [Glo89] F. Glover. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers and operations research*, 5:533, 1989.
- [Gol89] D.E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. 1989.
- [Gra96] M. Grabisch. The application of fuzzy integrals in multicriteria decision making. *European journal of Operational research*, page 445, 1996.
- [HT98] S. Harms and B. Truffer. The emergence of a nationwide carsharing cooperative in switzerland. a case study of the project strategic niche management as a tool for transition to a sustainable transportation system. Technical report, EAWAG, 1998.
- [Kac03] I. Kacem. *Ordonnancement multicritère des jobs-shops flexibles: Formulation, bornes inférieures et approche évolutionniste coopérative*. PhD thesis, Université de Lille I, 2003.
- [Kam07] M.A. Kamoun. *Conception d’un système d’information pour l’aide au déplacement multimodal: Une approche multi-agent pour la recherche et la composition des itinéraires en ligne*. PhD thesis, Ecole centrale de Lille, 2007.
- [KDGH07] G. Kiechle, K.F Doerner, M. Gendreau, and R.F. Hartl. Dynamic dial a ride and emergency transportation problems. In *Preprints of Triennial Symposium on transportation analysis*, 2007.

- [KGV83] S. Kirkpatrick, C.D. Gellat, and M.P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. *Science*, page 671, 1983.
- [Lac05] P. Lacomme. Méthodes exactes et approchées pour l'optimisation des systèmes à moyens de transport. Technical report, Rapport HDR, 2005.
- [Lai02] H. Laichour. *Modélisation multi-agent et aide à la décision: application à la régulation des correspondances dans les réseaux de transport urbain*. PhD thesis, Université des sciences et de technologies de Lille, 2002.
- [LWB96] C.F. Liaw, C.C. White, and J.L. Bander. A decision support system for the bimodal dial-a-ride problem. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1996.
- [Mar98] J.L. Marichal. *Aggregation operators for multicriteria decision aid*. PhD thesis, Université de Liège, 1998.
- [MC02] K. Mesghouni and 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*, 2002.
- [MDS<sup>+</sup>07] A. Melki, F. Dimustruscu, Y. Sallez, T. Berger, and S. Hammadi. Interaction des transports publics et des cybercars dans un contexte urbain. *IEEE Logistique et Transport LT sousse*, 2007.
- [MHS<sup>+</sup>08] A. Melki, S. Hammadi, Y. Sallez, T. Berger, and C. Tahon. Advanced approach for the public transportation regulation system based on cybercars. *RAIRO Revue: Operations Research*, 2008.
- [MHT06] A. Melki, S. Hammadi, and C. Tahon. Hierarchic decision support system approach with evaluation of decision classes of a traffic transportation network. *IEEE SMC Taiwan*, Octobre 2006.

- [MTH07] A. Melki, C. Tahon, and S. Hammadi. Strategic challenges and constraints of integration cybercar fleet in multimodal transportation network. *IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, Juin 2007.
- [Oth98] I. Othmani. *Optimisation multicritère: Ondements et concepts*. PhD thesis, Université de Grenoble, 1998.
- [Oul06] M. OuldSidi. *Contribution à l'amélioration des systèmes d'aide à la décision pour la régulation du trafic des réseaux de transport collectif*. PhD thesis, Ecole centrale de Lille, 2006.
- [Par04] C. Parey. Transports intelligents: Perspectives et réalités. Technical report, ATEC-ITS FRANCE, 2004.
- [PdLF01] M. Parent and A. de La Fortelle. Cybercars: Past, present and future of the technology inria. *INRIA*, 2001.
- [RHA<sup>+</sup>07] N. Rigo, R. Hekkenberg, A.Ndiaye, D. Hadhazi, G. Simongati, and C. Hargitai. Performance assessment for intermodal chains. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, page 283, 2007.
- [Roy85] B. Roy. *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. 1985.
- [Saa] M. Saade. *Structuration de processus et simulation: application aux transports urbains*. PhD thesis, Université Paris 6.
- [SMM02] 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. *Proceedings of World Automation Congress ISIAC028, WAC 2002*, 2002.
- [Sou] A. Soulhi. *Contribution de l'intelligence artificielle à l'aide à la décision dans la gestion des systèmes de transport urbain collectif*. PhD thesis.
- [Sug74] M. Sugeno. *Theory of fuzzy integrals ans its applications*. PhD thesis, Tokyo institute of technology, 1974.

- [Teg05] G. Tegner. On the track-prosperous public transport projects in stockholm. Technical report, Report from Transek Consultants, 2005.
- [Tes06] Tescult. Le projet auto+bus: Evaluation d’initiatives de mobilité combinée dans les villes canadiennes. Technical report, 2006.
- [Tra04] Transvilles. Les actions de régulation. Technical report, Transvilles, 2004.
- [VAG03] VAGverket. Make space for car-sharing- car sharing in sweden, its definition, potential and effects, it-solutions for administering it, and strategies to further its development. Technical report, Report, 2003.
- [Wie48] N. Wiener. Cybernetics, control and communication in the animal and the marchine. *MIT press*, 1948.
- [Yag04] R. Yager. Owa aggregation over a continuous interval argument with applications to decision making. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions*, 34:1952, 2004.
- [Zad78] L. Zadeh. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy sets ans systems*, 1978.
- [Zar03] H.M Zargayouna. Systèmes d’information de voyageurs: Conception d’un système multi-agent. Master’s thesis, Université paris IX Dauphine, 2003.
- [Zav99] R.M. Zavergiu. Un plan des systèmes de transport pour le canada: En route vers la mobilité intelligente. Technical report, Rapport sur le plan de promotion et de développement des ITS au Canada, 1999.
- [Zga07] H. Zgaya. *Conception et optimisation distribuée d’un système d’information d’aide à la mobilité urbaine: Une approche multi-agent pour la recherche et la composition des services liés au transport*. PhD thesis, Ecole centrale de Lille, 2007.
- [Zid06] K. Zidi. *Système interactif d’aide au déplacement multimodal (SIDAM)*. PhD thesis, Ecole centrale de Lille, 2006.

## Appendix I

### Document de base pour l'évaluation des décisions en fonction des critères

Comme nous l'avons mentionné précédemment, notre étude porte essentiellement sur la partie concernant l'évaluation des alternatives afin de parvenir à une décision optimale pour aider le régulateur dans ces choix.

On dispose d'un tableau qui regroupe les différentes appréciations des actions en fonction du critère et qui provient de TransVilles.

En réalité ce tableau regroupe plusieurs autres critères qui s'étendent de l'aspect technique, à l'aspect commercial mais dans notre évaluation nous n'avons tenu compte que des critères jugés plus intéressants par la compagnie de transport en question. Il est à mentionner également que le critère de correspondance est devenu récemment une priorité à satisfaire mais comme on ne dispose pas de l'appréciation donné à ce critère nous ne l'avons pas mentionné.

<div> <div>Actions</div> <div>Critères</div> </div>		1. Haut le pied hors lignes commerciales (HLP)	2. Direct en ligne	3. Demi-tour en ligne	4. Demi-tour avec échange de conducteurs et de véhicules	5. Dépassement	6. Départ retardé au terminus	7. Echanges de conducteurs et de véhicules	8. Raccourci	9. Remise à l'heure par réserve et disponible	10. Régulation en ligne	11. Régulation en terminus	12. Régulation en cascade
1. Régularité													
2. Ponctualité													
3. Qualité de service													
4. Kilomètres commerciaux													

Très bon

Bon

Médiocre

Mauvais

Figure I.1: Appréciation des actions en fonction des critères

## Appendix II

### Détermination de l'horizon 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 :

$$H = S^H \cup V^H$$

Notons  $S_k^r$  la kème station de la ligne r .

De même,  $V_i^l$  représente le ième 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 Fig. II.1). Nous

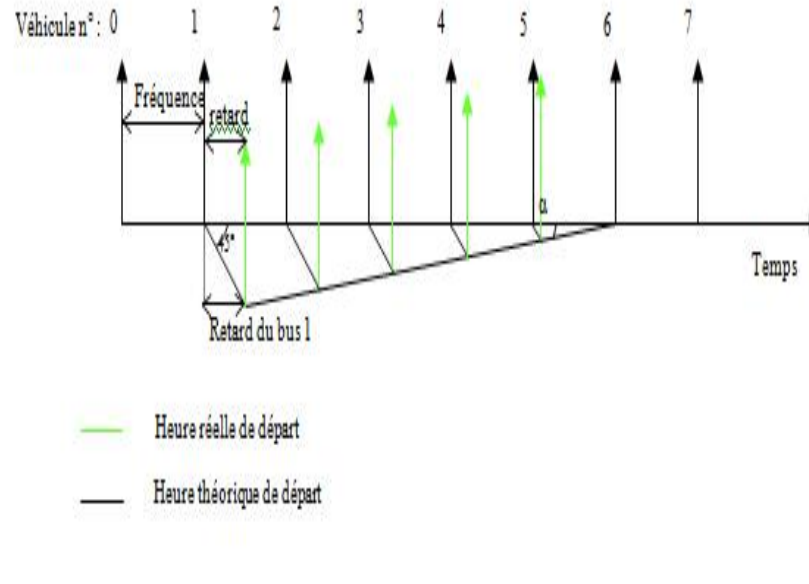


Figure II.1: Principe de la régulation en terminus

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 :

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

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:

$$n_0 = \frac{r(1 - \tan(\alpha))}{f \tan(\alpha)} \quad (\text{II.1})$$

$$et N_{up} = (E(n_0) + 1) + 1 \quad (\text{II.2})$$

$$(\text{II.3})$$

où  $r$  est le retard du véhicule perturbé,  $f$  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 :

$$N_{down} = N_{up} - 1 \text{ si } 0 < N_{up} \leq 3 \quad (\text{II.4})$$

$$= N_{up} - 2 \text{ si } 0 < N_{up} > 3 \quad (\text{II.5})$$

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

$$N_T = N_{up} + N_{down} + 1 \quad (\text{II.6})$$

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.



## Appendix III

### Formulation mathématique des critères de régulation

#### III.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.

##### III.1.1 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 :

$$\Delta t = t_{a_{i'j}}^l - t_{d_{ij}}^l$$

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  $S_j^l$ . Nous pouvons alors calculer l'attente des passagers pendant  $\Delta t$  [Alo99]:

$$attente(\Delta t, S_j^l) = \int_0^{\Delta t} \mu_{S_j^l}(t)(\Delta t - t)dt \quad (\text{III.1})$$

L'arrivée des voyageurs aux arrêts est souvent considérée comme un processus de Poisson non stationnaire. 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  $\frac{\Delta t^2}{2}$ :

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

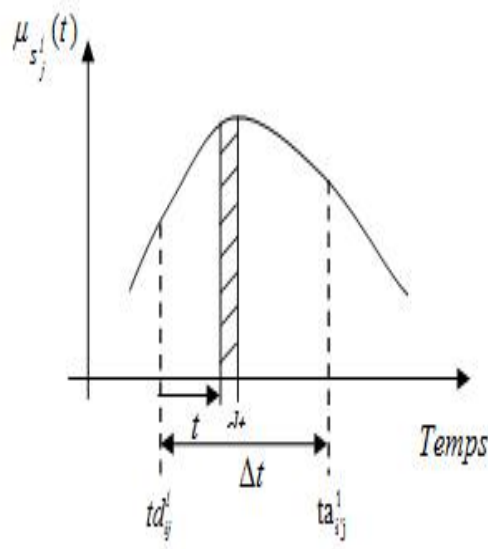


Figure III.1: Distribution des arrivées des passagers à un arrêt

### III.1.2 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  $\mu(\Delta t_I, S_j^l, S_k^l)$  le taux constant d'arrivée pendant  $\Delta t_I$  à la station  $S_j^l$  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 nIJud 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 :

$$attente(\Delta t, S_j^l, S_k^l) = \sum_{I=1}^N \mu(\Delta t_I, S_j^l, S_k^l) \times \Delta t_I \times \left( \frac{\Delta t_I}{2} + \sum_{I'=I+1}^N \Delta t_{I'} \right) \quad (\text{III.3})$$

Nous pouvons à ce stade calculer aussi le nombre de personnes  $N_{i'jk}^l$  qui montent à bord de  $V_{i'}^{l'}$  à  $S_j^m$  et qui ont  $S_k^r$  pour destination.

En effet, ce nombre est égal à celui des personnes qui attendent  $V_{i'}^{l'}$  pendant l'intervalle  $\Delta t$ .

$$N_{i'jk}^l = \sum_{I=1}^N \mu(\Delta t_I, S_j^l, S_k^l) \times \Delta t_I \quad (\text{III.4})$$

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 :

$$attente(S_j^l) = \sum_{V_i^l \in V^H} (a_{ij}^l \times \sum_{S_k^l > S_j^l} attente(ta_{i'j}^l - td_{ij}^l, S_j^l, S_k^l)) \quad (\text{III.5})$$

avec :  $\forall V_i^l \in V^H$  et  $V_{i'}^{l'} = Veh^+(V_i^l, S_j^l, S_k^l)$

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.

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

$$AT = \sum_{S_j^l \in S^H} \sum_{V_i^l \in V^H} (a_{ij}^l \times \sum_{S_k^l > S_j^l} attente(ta_{i'j}^l - td_{ij}^l, S_j^l, S_k^l)) \quad (\text{III.6})$$

avec  $\forall V_i^l \in V^H$  et  $V_{i'}^{l'} = Veh^+(V_i^l, S_j^l, S_k^l)$

### III.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  $y_{ii'j}^{ll'}$ , 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  $\rho_{ii'j}^{ll'}$ .

Le calcul du nombre de personnes descendant de  $V_i^l$  à  $S_j^l, N_{desc}$  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 :

$$AT = \sum_{V_i^l \in V^H} \sum_{V_{i'}^{l'} \in V^H} \sum_{S_j^l \in S^H} y_{ii'j}^{ll'} \times \omega_{ii'j}^{ll'} \times (td_{i'j}^{l'} - ta_{ij}^l) \quad (\text{III.7})$$

### III.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.

#### III.3.1 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 :

$$N_{mont_{ij}}^{lm} = \sum_{S_k^r > S_j^m} N_{ijk}^{lmr} + \sum_{V_{i'}^{l'} \in V^H} y_{i'ij}^{l'lm} \times \omega_{i'ij}^{l'lm} \quad (\text{III.8})$$

avec :

$N_{ijk}$ : le nombre de personnes montant à bord du véhicule allant de  $S_k^r$  à  $S_j^m$ ,  $\omega_{i'ij}^{l'lm}$  : le nombre de personnes en correspondance de  $V_{i'}^{l'}$  à  $V_i^l$ .

### III.3.2 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 de 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  $\omega_{i'ik}^{l'l}$ , avec un taux  $\lambda_{i'ik}^{l'l}$ . La formule suivante montre alors le nombre total de passagers qui descendent de  $V_i^l$  à  $S_j^l$  :

$$Ndesc_{ij}^l = \sum_{S_k^l < S_j^l} (N_{ijk}^l + \lambda_{i'ik}^{l'l} \times \omega_{i'ik}^{l'l}) \quad (III.9)$$

### III.3.3 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,  $Arrtprec(V_i^l, S_j^l)$ , le nombre de personnes qui montent à  $S_j^l$  et en ôtant celui des passagers qui en descendent. En notant  $S_j^l = Arrtprec(V_i^l, S_j^l)$ , 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 :

$$C_{ij}^l = C_{ij'}^l - Ndesc_{ij}^l + Nmont_{ij}^l \quad (III.10)$$

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

### III.3.4 Calcul de la durée totale du passager

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

$$RT = \sum_{V_i^m \in V^H} \sum_{S_j^m \in S^H} a_{ij}^l \times C_{ij'}^m \times (td_{ij}^m - td_{ij'}^m) \quad (III.11)$$

### III.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 :

$$KM = \sum_{V_i^l \in V^H} \sum_{S_j^l \in S^H} a_{ij}^{ll} \times a_{ij'}^{ll} \times d_i^l(S_j^l, S_{j'}^l) \quad (\text{III.12})$$

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.

### III.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. 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 :

$$QS = \max_{V_i^l \in V^H} (nchang(V_i^l), ntrans(V_i^l), nstat(V_i^l)) \quad (\text{III.13})$$

où  $nchang(V_i^l)$ ,  $ntrans(V_i^l)$  et  $nstat(V_i^l)$  sont respectivement les nombres d'échanges de véhicules et de conducteurs, de transbordements et de stations non desservies.

## Appendix IV

### Les contraintes de régulation

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  $S_j^l$ .

$$\sum_{k>j} x_{ijk}^l = a_{ij}^l \quad (\text{IV.1})$$

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.

$$\sum_{k<r} x_{ijk}^l = a_{ij}^l \quad (\text{IV.2})$$

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  $V_j^l$  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  $V_j^l$ .

$$(ta_{ij}^l - td_{ij}^l) \geq Inter_{min}^l \quad (\text{IV.3})$$

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,  $t_{smax}^l_{ij}$ , peut dépendre du véhicule  $V_i^l$  et  $S_j^l$  de la station concernés, comme illustré ci-dessous.

$$(td_{ij}^l - ta_{ij}^l) \geq t_{smax}^l_{ij} \quad (IV.4)$$

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 :

$$Trans_{min} \leq (td_{i'j}^{l'} - ta_{ij}^l) \times y_{ii'}^{ll'} \leq Trans_{max} \quad (IV.5)$$

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  $C_{max}^l_{ij}$ .

$$C_{ij}^l \leq C_{max}^l_{ij} \quad (IV.6)$$