

**N° d'ordre 3239**

**UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE  
U.F.R. I.E.E.A**

**THÈSE**

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR  
DE L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE**

*en Automatique et Informatique Industrielle*

présentée par

**Hakim LAÏCHOUR**

*Titre :*

**MODÉLISATION MULTI-AGENT ET AIDE À LA DÉCISION :  
APPLICATION À LA RÉGULATION DES CORRESPONDANCES  
DANS LES RÉSEAUX DE TRANSPORT URBAIN**

soutenue publiquement le **20 décembre 2002** devant le jury d'examen :

M. Philippe MATHIEU	Président	Professeur, USTL de Lille
M. Jean-Paul BARTHES	Rapporteur	Professeur, UTC de Compiègne
M. Christian TAHON	Rapporteur	Professeur, UVHC de Valenciennes
M. René MANDIAU	Directeur de recherche	Professeur, UVHC de Valenciennes
M. Salah MAOUCHE	Directeur de recherche	Professeur, USTL de Lille
M. Abdellah EL-MOUDNI	Examineur	Professeur, UTBM de Belfort-Montbéliard
M. Denis POMORSKI	Examineur	Professeur, USTL de Lille

*A la mémoire de mes grands-parents,  
A mon épouse Sandrine,  
A mes parents, ma sœur et mes frères,  
A toute ma grande famille,  
A mes amis.*

# TABLE DES MATIÈRES

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 : RÉSEAUX DE TRANSPORT URBAIN.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>8</b>
<b>1.2 MODÉLISATION DES RÉSEAUX DE TRANSPORT URBAIN .....</b>	<b>9</b>
1.2.1 <i>CONFIGURATION D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT URBAIN .....</i>	9
1.2.1.1 CONFIGURATION PHYSIQUE .....	9
1.2.1.2 CONFIGURATION HORAIRE .....	11
1.2.2 <i>EXPLOITATION D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT URBAIN.....</i>	12
1.2.3 <i>MOYENS DE RÉSERVES.....</i>	14
1.2.4 <i>OFFRE DE SERVICE.....</i>	14
1.2.5 <i>CONFECTION DES HORAIRES.....</i>	16
<b>1.3 SYSTÈMES D'AIDE À L'EXPLOITATION.....</b>	<b>17</b>
1.3.1 <i>HISTORIQUE .....</i>	17
1.3.2 <i>PRINCIPES DE BASE DE LA GESTION DES SYSTÈMES D'AIDE À L'EXPLOITATION .....</i>	18
1.3.2.1 INFORMATIONS D'UN SAE .....	18
1.3.2.2 RÔLE D'UN SAE.....	19
1.3.2.3 DÉTECTION DES PERTURBATIONS.....	19
1.3.3 <i>CARACTÉRISTIQUES D'UN SAE .....</i>	20
1.3.4 <i>FONCTIONS FONDAMENTALES.....</i>	21
<b>1.4 RÉGULATION .....</b>	<b>26</b>
1.4.1 <i>PERTURBATIONS ET LA RÉGULATION.....</i>	27
1.4.2 <i>DYNAMIQUE DE LA RÉGULATION.....</i>	28
1.4.3 <i>INTERVENANTS DANS LA RÉGULATION.....</i>	29
1.4.4 <i>TRAVAIL DU RÉGULATEUR .....</i>	30
1.4.4.1 ACQUISITION DES INFORMATIONS .....	30
1.4.4.2 PROJECTION DANS LE FUTUR.....	30
1.4.4.3 ANALYSE .....	30
1.4.4.4 PHASE DE DÉCISION .....	31
1.4.4.5 APPLICATION DE CETTE DÉCISION .....	31
1.4.5 <i>ECHANGES D'INFORMATIONS RELATIVES À LA RÉGULATION.....</i>	31
1.4.6 <i>ACTIONS DE RÉGULATION .....</i>	32
1.4.7 <i>LOGIQUES DE RÉGULATION .....</i>	35
1.4.7.1 LOGIQUE D'ENLÈVEMENT DE LA CHARGE .....	35
1.4.7.2 LOGIQUE DE RÉGULARITÉ .....	35
1.4.7.3 LOGIQUE DE PONCTUALITÉ .....	36
1.4.7.4 CONTRAINTE DE GESTION DU PERSONNEL.....	36
1.4.8 <i>CONTRAINTES DE LA RÉGULATION.....</i>	37

1.4.8.1	DEMANDE DE TRANSPORT .....	37
1.4.8.2	CONDITIONS DE CIRCULATION .....	37
1.4.8.3	TOPOGRAPHIE DE LA LIGNE.....	37
1.4.8.4	STRUCTURE D'EXPLOITATION .....	37
<b>1.5</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>37</b>

## **CHAPITRE 2 : SYSTÈMES MULTI-AGENTS.....39**

<b>2.1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>40</b>
2.1.1	<i>DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE...</i> .....	40
2.1.2	<i>...AUX SYSTÈMES MULTI-AGENTS</i> .....	41
<b>2.2</b>	<b>AGENTS ET SYSTÈMES MULTI-AGENTS.....</b>	<b>42</b>
2.2.1	<i>AGENTS</i> .....	42
2.2.1.1	NOTION D'AGENT .....	43
2.2.1.2	TYPLOGIE D'AGENTS .....	44
2.2.1.2.1	AGENTS RÉACTIFS .....	45
2.2.1.2.2	AGENTS COGNITIFS .....	46
2.2.1.2.3	AGENTS HYBRIDES .....	46
2.2.2	<i>SYSTÈMES MULTI-AGENTS</i> .....	47
<b>2.3</b>	<b>CONCEPTION DES SYSTÈMES MULTI-AGENTS.....</b>	<b>49</b>
2.3.1	<i>CONCEPTS</i> .....	50
2.3.2	<i>APPROCHES</i> .....	52
2.3.2.1	APPROCHE AALAADIN .....	53
2.3.2.1.1	AGENT .....	53
2.3.2.1.2	GROUPE .....	53
2.3.2.1.3	RÔLE .....	54
2.3.2.2	APPROCHE VOYELLES.....	54
2.3.2.2.1	COMPOSANTE AGENT.....	55
2.3.2.2.2	COMPOSANTE ENVIRONNEMENT .....	56
2.3.2.2.3	COMPOSANTE INTERACTION.....	57
2.3.2.2.4	COMPOSANTE ORGANISATION .....	60
2.3.2.3	DISCUSSION .....	62
2.3.3	<i>PROCESSUS DE DÉVELOPPEMENT D'UN SMA</i> .....	63
2.3.3.1	MÉTHODOLOGIES DE CONCEPTION DES SMA.....	65
2.3.3.1.1	MÉTHODOLOGIE GAÏA .....	66
2.3.3.1.2	MÉTHODOLOGIE MASE.....	67
2.3.3.1.3	DISCUSSION .....	68
2.3.3.2	PLATES-FORMES SMA .....	69
2.3.3.2.1	PLATES-FORMES UNIVERSITAIRES.....	69
2.3.3.2.2	PLATES-FORMES INDUSTRIELLES .....	71
<b>2.4</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>72</b>

## **CHAPITRE 3 : MODÉLISATION MULTI-AGENT D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT.....74**

<b>3.1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>75</b>
<b>3.2</b>	<b>TRANSPORT URBAIN ET SYSTÈMES MULTI-AGENTS.....</b>	<b>76</b>
3.2.1	<i>DOMAINES D'APPLICATION DES SYSTÈMES MULTI-AGENTS</i> .....	76
3.2.2	<i>APPLICATION DES SMA DANS LE DOMAINE DU TRANSPORT URBAIN</i> .....	78
3.2.2.1	Travaux de B. Soussaul .....	80
3.2.2.2	Travaux de F. Balbo .....	82
<b>3.3</b>	<b>MODÉLISATION DES RÉSEAUX DE TRANSPORT URBAIN .....</b>	<b>83</b>
3.3.1	<i>MODÈLES DU TRAFIC URBAIN</i> .....	84

3.3.1.1	MODÈLES DE PLANIFICATION .....	84
3.3.1.2	MODÈLES D'EXPLOITATION DU TRAFIC .....	86
3.3.1.3	CONVERGENCE ENTRE LES MODÈLES DE PLANIFICATION ET LES MODÈLES D'EXPLOITATION .....	86
3.3.1.4	DISCUSSION .....	87
3.3.2	<i>REPRÉSENTATION D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT</i> .....	87
3.3.2.1	DÉFINITION DU RÉSEAU.....	87
3.3.2.1.1	Topologie.....	88
3.3.2.1.2	HORAIRE.....	89
3.3.2.1.3	FLUX .....	90
3.3.2.2	REPRÉSENTATION DU RÉSEAU .....	90
3.3.2.2.1	REPRÉSENTATION GRADUELLE .....	91
3.3.2.2.2	REPRÉSENTATION VUE PAR LES CORRESPONDANCES .....	91
3.3.3	<i>MODÉLISATION MULTI-AGENT</i> .....	92
3.3.3.1	DESCRIPTION FONCTIONNELLE DU SYSTÈME.....	94
3.3.3.2	DESCRIPTION DES AGENTS.....	98
3.3.3.2.1	AGENT ACQUISITION.....	99
3.3.3.2.2	AGENT CORRESPONDANCE .....	99
3.3.3.2.3	AGENT SUPERVISEUR.....	100
3.3.3.3	DÉFINITION DES INTERACTIONS .....	100
3.3.3.3.1	AGENT ACQUISITION.....	100
3.3.3.3.2	AGENT CORRESPONDANCE .....	101
3.3.3.3.3	AGENT SUPERVISEUR.....	101
3.3.3.4	DESCRIPTION DE L'ORGANISATION .....	102
3.3.3.5	DÉFINITION DE L'ENVIRONNEMENT .....	104
<b>3.4</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>104</b>

## **CHAPITRE 4 : RÉGULATION DES CORRESPONDANCES.....105**

<b>4.1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>106</b>
<b>4.2</b>	<b>CORRESPONDANCES .....</b>	<b>107</b>
4.2.1	<i>NOTION DE CORRESPONDANCE</i> .....	108
4.2.2	<i>IMPACT DES CORRESPONDANCES SUR LES VOYAGEURS</i> .....	109
4.2.2.1	ALLONGEMENT DU TEMPS DE PARCOURS .....	110
4.2.2.2	ACCROISSEMENT DE LA COMPLEXITÉ DU DÉPLACEMENT .....	110
4.2.2.3	STRESS INDUIT .....	110
4.2.3	<i>GESTION DES CORRESPONDANCES</i> .....	111
4.2.4	<i>REPRÉSENTATION D'UN NŒUD DE CORRESPONDANCES</i> .....	112
<b>4.3</b>	<b>RÉGULATION .....</b>	<b>113</b>
4.3.1	<i>PROCESSUS DE LA RÉGULATION</i> .....	114
4.3.2	<i>COMPOSITION DES LOGIQUES DE RÉGULATION</i> .....	115
4.3.3	<i>IMPORTANCE DES LOGIQUES DE RÉGULATION</i> .....	116
4.3.4	<i>LOGIQUE DE CORRESPONDANCE</i> .....	117
4.3.5	<i>CRITÈRES DE LA RÉGULATION LIÉS AUX LOGIQUES DE RÉGULATION</i> .....	117
4.3.5.1	CRITÈRE RELATIF À LA LOGIQUE D'ENLÈVEMENT DE LA CHARGE .....	118
4.3.5.2	CRITÈRE RELATIF À LA LOGIQUE DE RÉGULARITÉ .....	118
4.3.5.3	CRITÈRE RELATIF À LA LOGIQUE DE PONCTUALITÉ .....	119
4.3.5.4	CRITÈRE RELATIF À LA LOGIQUE DE GESTION DU PERSONNEL .....	120
4.3.5.5	CRITÈRE RELATIF À LA LOGIQUE DE CORRESPONDANCE.....	120
4.3.6	<i>TYPES DE RÉGULATION</i> .....	121
4.3.6.1	RÉGULATION EN INTERVALLES .....	122
4.3.6.2	RÉGULATION EN HORAIRES .....	123
4.3.6.3	RÉGULATION MIXTE.....	124
<b>4.4</b>	<b>RÉGULATION DES CORRESPONDANCES .....</b>	<b>125</b>
4.4.1	<i>ALGORITHMES USUELS DE RÉGULATION DES RÉSEAUX D'AUTOBUS</i> .....	125
4.4.1.1	ALGORITHMES EN TERMINUS .....	125
4.4.1.1.1	ALGORITHME DE DÉPART PROGRAMMÉ.....	126

4.4.1.1.2	ALGORITHME DE DÉPART PROGRAMMÉ AVEC ANTICIPATION.....	126
4.4.1.1.3	DISCUSSION .....	127
4.4.1.2	ALGORITHMES EN LIGNE .....	127
4.4.1.2.1	ALGORITHME DE RÉGULATION À VUE.....	127
4.4.1.2.2	ALGORITHME DE RÉGULATION À VUE PAR ANTICIPATION .....	128
4.4.1.2.3	DISCUSSION .....	128
4.4.2	ALGORITHMES DE RÉGULATION DES CORRESPONDANCES.....	129
4.4.2.1	ALGORITHME FLOU.....	129
4.4.2.2	ALGORITHME PROPOSÉ .....	131
4.4.2.2.1	CRITÈRES DE DÉCISION DE PRISE DANS LA GESTION DES CORRESPONDANCES .....	133
4.4.2.2.2	ACTIONS DE RÉGULATION DES CORRESPONDANCES .....	134
<b>4.5</b>	<b>MODÈLE INTERNE D'UN AGENT CORRESPONDANCE.....</b>	<b>135</b>
<b>4.6</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>137</b>

## **CHAPITRE 5 : VALIDATION DE LA MODÉLISATION MULTI-AGENT.....138**

<b>5.1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>139</b>
<b>5.2</b>	<b>ARCHITECTURE DU SMA PROPOSÉ.....</b>	<b>141</b>
5.2.1	AGENT ACQUISITION.....	141
5.2.2	AGENT CORRESPONDANCE.....	142
5.2.3	AGENT SUPERVISEUR.....	143
5.2.4	COOPÉRATION ENTRE LES AGENTS CORRESPONDANCE.....	144
<b>5.3</b>	<b>IMPLÉMENTATION SOUS EM-PLANT .....</b>	<b>148</b>
5.3.1	AGENT ACQUISITION.....	148
5.3.2	AGENT CORRESPONDANCE.....	150
<b>5.4</b>	<b>RÉSEAU DE TRANSPORT URBAIN DE VALENCIENNES.....</b>	<b>153</b>
5.4.1	ARCHITECTURE DU RÉSEAU DE VALENCIENNES .....	153
5.4.2	GRAPHICAGE ET HABILLAGE DU RÉSEAU .....	156
5.4.3	ÉVALUATION DES TEMPS DE PARCOURS .....	157
5.4.4	MATÉRIEL DISPONIBLE .....	159
5.4.5	GESTION DU RÉSEAU .....	161
<b>5.5</b>	<b>DESCRIPTION DU RÉSEAU D'AUTOBUS DE MONTBÉLIARD.....</b>	<b>164</b>
<b>5.6</b>	<b>SCÉNARIIS APPLIQUÉS AUX CORRESPONDANCES.....</b>	<b>166</b>
5.6.1	SCÉNARIO1 : PERTURBATION SUITE À UNE PANNE DE BUS.....	167
5.6.2	SCÉNARIO2 : PERTURBATION DUE AU BLOCAGE D'UN BUS DANS LE TRAFIC.....	169
<b>5.7</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>170</b>

## **CONCLUSION & PERSPECTIVES.....172**

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....176**

## **ANNEXE A : TERMINOLOGIE LIÉE AU TRANSPORT URBAIN.....191**

## **ANNEXE B : DESCRIPTION DU LOGICIEL eM-Plant .....**

**199**

# INDEX DES FIGURES ET DES TABLEAUX

## CHAPITRE 1 : RÉSEAUX DE TRANSPORT URBAIN.....7

Figure 1.1 : Les structures de lignes.....	10
Figure 1.2 : Une liaison de raccordement.....	11
Figure 1.3 : La construction et l'évaluation du tableau de marche.....	13
Figure 1.4 : L'offre de service.....	15
Figure 1.5 : La régulation en boucle fermée.....	18
Figure 1.6 : Le fonctionnement d'un réseau en temps réel.....	27
Figure.1.7 : La dynamique de la ligne.....	28
Figure 1.8 : Les échanges relatifs à la régulation.....	32

## CHAPITRE 2 : SYSTÈMES MULTI-AGENTS.....39

Figure 2.1 : Le comportement d'un agent.....	44
Figure 2.2 : Une hiérarchie des agents.....	45
Figure 2.3 : La description d'un Système Multi-Agent (SMA).....	47
Figure 2.4 : Le modèle organisationnel d'AALADIN [Gutknecht & al., 98].....	53
Figure 2.5 : L'architecture interne d'un agent [Chaib-Draa, 96].....	56
Figure 2.6 : Le processus d'interaction au niveau macro-situation et micro-situation [Ferber, 95].....	58
Figure 2.7 : La relation entre Agent, Organisation et Interaction [Ferber, 95].....	61
Figure 2.8 : Les différents phases de conception d'une application SMA.....	64
Figure 2.9 : Les rapports entre les différents modèles de GAÏA [Wooldridge & al., 00].....	67
Figure 2.10 : Les différentes phases de MaSE [Delaoch & al., 00].....	68

## CHAPITRE 3 : MODÉLISATION MULTI-AGENT D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT.....74

Figure 3.1 : Modèles S-R-K de coordination multi-agent à trois niveaux.....	79
Figure 3.2 : Les grandes classes de modèles.....	87
Figure 3.3 : La composition d'un réseau de transport urbain.....	88
Figure 3.4 : La structure d'un réseau de transport.....	88
Figure 3.5 : Les types d'arrêts.....	89
Figure 3.6 : La hiérarchie des arrêts.....	89
Figure 3.7 : La représentation d'une ligne selon un TM.....	90
Figure 3.8 : Les flux dans un réseau de transport.....	90
Figure 3.9 : Une représentation d'un réseau de transport vue par les nœuds de correspondances.....	92
Figure 3.10 : L'état du réseau avant une correspondance au nœud $C_i$ de $T$ minutes.....	95
Figure 3.11 : L'état simulé du nœud $C_i$ par rapport à l'horaire réel simulé de la correspondance concernée.....	96
Figure 3.12 : L'état réel du réseau par rapport au nœud $C_i$ après un temps de simulation $SIM$ .....	96
Figure 3.13 : La représentation macroscopique d'un nœud de correspondances dans le temps.....	97
Figure 3.14 : La communication entre des agents CORRESPONDANCE.....	101
Figure 3.15 : La communication entre un agent CORRESPONDANCE et des agents ACQUISITION.....	101
Figure 3.16 : La communication entre SARC et le régulateur par le biais de l'agent SUPERVISEUR.....	102
Figure 3.17 : La communication entre l'agent SUPERVISEUR et les agents CORRESPONDANCE.....	102
Figure 3.18 : La modélisation d'un réseau de transport urbain par un SMA hiérarchique.....	103

**CHAPITRE 4 : RÉGULATION DES CORRESPONDANCES.....105**

Figure 4.1 : Représentation d'un nœud de correspondances dans l'espace .....	112
Figure 4.2 : Les étapes du processus de régulation .....	114
Figure 4.3 : La régularité entre les véhicules .....	118
Figure 4.4 : Le groupage des véhicules.....	119
Figure 4.5 : Une ligne avec antenne.....	125
Figure 4.6 : Le principe de l'algorithme DP .....	126
Figure 4.7 : L'algorithme flou de régulation des correspondances .....	129
Figure 4.8 : Système d'inférence floue .....	130
Figure 4.9 : Algorithme de régulation des correspondances .....	132
Figure 4.10 : Le modèle agent.....	135
Tableau 4.1 : Arbitrage entre les objectifs de la régulation.....	117
Tableau 4.2 : Les Critères liés aux logiques de régulation.....	121

**CHAPITRE 5 : VALIDATION DE LA MODÉLISATION MULTI-AGENT.....138**

Figure 5.1 : Organisation de l'application pour la première étape .....	139
Figure 5.2 : Positionnement de SARC dans le processus de régulation .....	140
Figure 5.3 : Enregistrement des passages des véhicules.....	141
Figure 5.4 : Traitement d'une requête d'un agent correspondance .....	142
Figure 5.5 : Traitements des tâches de simulation .....	143
Figure 5.6 : Le traitement des requêtes du régulateur .....	144
Figure 5.7 : La communication entre agents CORRESPONDANCE .....	145
Figure 5.8 : L'illustration des interactions entre des agents CORRESPONDANCE concernés par un diagramme de séquences AUML.....	146
Figure 5.9 : Algorithme de contrôle de la coopération.....	147
Figure 5.10 : Fenêtres temporelles de simulation.....	147
Figure 5.11 : La simulation du modèle agent ACQUISITION.....	149
Figure 5.12 : L'illustration d'une ligne simple en utilisant des agents ACQUISITION.....	150
Figure 5.13 : L'échange de passagers entre deux lignes .....	151
Figure 5.14 : L'échange des voyageurs entre trois lignes .....	152
Figure 5.15 : La simulation de deux lignes avec un nœud de correspondances .....	152
Figure 5.16 : La simulation de trois lignes avec un nœud de correspondances.....	153
Figure 5.17 : Le réseau actuel de Valenciennes .....	154
Figure 5.18 : L'exploitation du réseau de transport à l'aide du SAE (un schéma partiel).....	155
Figure 5.19 : Les différents types de services .....	156
Figure 5.20 : La détermination des horaires des véhicules selon HASTUS.....	157
Figure 5.21 : Un exemple d'écran de graphichage selon HASTUS .....	158
Figure 5.22 : Une ligne à antenne .....	159
Figure 5.23 : La composition du réseau de Valenciennes .....	161
Figure 5.24 : La classification des lignes du réseau .....	162
Figure 5.25 : L'affichage de l'état des lignes sur l'écran d'exploitation .....	162
Figure 5.26 : L'état d'un bus.....	163
Figure 5.27 : Le réseau de Montbéliard .....	165
Figure 5.28 : Une partie du réseau de Valenciennes .....	166

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Nous débutons par une présentation du contexte de nos travaux de recherche. Ensuite, nous précisons la problématique de cette recherche. Enfin, nous donnons une description de l'organisation de ce mémoire.

## CONTEXTE

L'organisation urbaine, celle de l'habitat comme celle de l'emploi ou des loisirs, suppose des échanges croissants au sein et entre des territoires de densités variables. La mobilité est ainsi devenue un des enjeux majeurs de la vie collective et de la vie quotidienne ; car, elle est un moyen indispensable au bon fonctionnement de la société.

Les déplacements des personnes et des biens ont toujours été au centre des préoccupations urbaines. La qualité des transports est comme un élément essentiel de la compétitivité. Si les exigences en matière de confort et de sécurité sont les aspects les plus préoccupants, ce sont la vitesse et la rapidité du transport qui retiennent le plus souvent l'attention.

Les planificateurs du transport et les décideurs publics font face à un ensemble de problèmes cruciaux. En outre des préoccupations d'investissement et de congestion, ils doivent intégrer les problèmes de sécurité, d'efficacité du système de transport ou d'environnement. L'élargissement du champ des préoccupations a élevé la complexité de la tâche de la planification de façon significative. Depuis les années soixante-dix, les tendances lourdes caractérisant le système de déplacements urbains sous-tendent : une forte croissance de la mobilité qui se porte essentiellement sur l'automobile, le déclin des transports collectifs, l'allongement des distances parcourues. Cependant, le facteur ayant eu à lui seul le plus d'importance sur la structure des déplacements urbains au cours des quarante dernières années a été la très forte multiplication du taux de motorisation et d'utilisation de la voiture. Ces évolutions sont étroitement liées aux changements des modes de vie et aux transformations du développement urbain.

## PROBLÉMATIQUE

La régulation du trafic d'un réseau de transport urbain est un problème incontournable. C'est pourquoi, les exploitants des réseaux de transport essayent de trouver des solutions de plus en plus efficaces. Ils rencontrent de nombreuses difficultés pour assurer un trafic urbain stable. En général, les difficultés rencontrées sont dues aux mauvaises conditions de circulation, aux manques de personnel et de matériel (par exemple : absence d'un conducteur ou panne d'un véhicule) et aux correspondances non assurées.

Les exploitants se doivent de satisfaire la qualité des services offerts aux voyageurs en respectant au maximum les horaires théoriques annoncés. A partir de là, la régulation du trafic est une adéquation maximale des horaires théoriques, annoncés aux voyageurs, aux conditions de circulation réelles. La satisfaction des clients sera assurée uniquement avec une régulation optimale à travers laquelle l'attente des voyageurs dans un réseau de transport urbain est minimisée.

Pour mieux assurer la régulation, l'apparition des Systèmes d'Aide à l'Exploitation (SAE) a beaucoup aidé les régulateurs<sup>1</sup>. Les SAE permettent le suivi en temps réel de l'exploitation d'un réseau de transport urbain. Ils ne cessent d'évoluer grâce notamment aux progrès réalisés dans les domaines des communications et du traitement de l'information.

Les SAE traitent des quantités très importantes d'informations mais les régulateurs n'arrivent pas à prendre en compte ce grand nombre d'informations pour la prise de décision, en cas de perturbations. La prise de décision nécessite de prendre en considération les informations les plus importantes. Un Système d'Aide à la Décision (SAD) est nécessaire afin d'aider les régulateurs à prendre des décisions pertinentes pour la régulation du trafic, en cas d'éventuelles perturbations.

En général, une ligne d'un réseau de transport comporte quatre types d'arrêts : les arrêts simples, les arrêts de régulation, les arrêts terminus et les nœuds de correspondances. Les déplacements des clients dans un réseau de transport d'un point à un autre, en empruntant les nœuds de correspondance, entraînent la notion de correspondance. Les correspondances sont des tâches difficiles assumées par les régulateurs. Une mauvaise gestion des correspondances entraîne des retards importants dans les réseaux. A cause d'une correspondance ratée, un ou plusieurs clients peuvent subir de longues attentes au niveau des arrêts souvent non surveillés et parfois avec des conditions météorologiques insupportables. Il serait d'un grand intérêt aux régulateurs d'avoir un système d'aide qui leur facilitera la tâche en proposant un ensemble de décisions pertinentes pour assurer les correspondances. C'est dans ce cadre que nos travaux de recherche sont menés afin de traiter le problème de la régulation des correspondances. Une

---

<sup>1</sup> Personnels chargés de la gestion du réseau de transport en temps réel.

bonne régulation des correspondances assure l'amélioration de la qualité des déplacements des voyageurs dans un réseau de transport urbain.

## OBJECTIFS

Nous avons voulu à travers cette thèse offrir un outil d'aide aux régulateurs humains pour la régulation du trafic au niveau des correspondances. Notre objectif principal est d'élaborer un Système d'Aide à la Décision innovant, capable de résoudre le problème de gestion des correspondances dans les conditions normales ou perturbées. A travers cela, la qualité de service offert aux voyageurs est améliorée dans leurs déplacements quotidiens. Ceci permet d'atteindre l'objectif majeur qui est la minimisation des temps d'attentes des voyageurs dans les réseaux de transport urbain.

Nous voulons concevoir un Système d'Aide à la Régulation des Correspondances (SARC) qui doit réaliser les fonctions suivantes : assurer la gestion des correspondances, aider les régulateurs à mieux comprendre la régulation à travers des demandes de simulation (apprentissage de la régulation), fournir des décisions pertinentes aux régulateurs et détecter automatiquement et au plus tôt les perturbations par anticipation (simulation de surveillance prédictive).

Nous cherchons une organisation optimale d'un réseau de transport urbain qui assure les fonctions suivantes :

- La surveillance des nœuds de correspondances (surveillance locale).
- La surveillance globale du réseau de transport.
- L'anticipation des perturbations à travers des simulations par anticipation précédant chaque correspondance (détection automatique des perturbations).

Pour la réalisation du SARC, le choix d'utiliser une approche multi-agent s'est imposé à cause de la distribution géographique dans un réseau de transport et la dispersion d'une grande quantité d'informations pour son exploitation.

Les systèmes multi-agents permettent de représenter un réseau de transport par un ensemble d'entités appelées agents, capables de communiquer entre elles afin d'échanger des informations, de coopérer et de négocier pour résoudre des conflits éventuels pour la validation des décisions d'un agent.

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre du projet coopératif GRRT (Groupement Régional Nord Pas-de-Calais pour la Recherche dans les Transports) intitulé "Amélioration de la qualité des déplacements dans les réseaux de

transport urbain”. Ces travaux sont cofinancés par la région Nord Pas-de-Calais et le FEDER (Fond Européen du Développement et de la Recherche). Ils sont menés par différents laboratoires scientifiques LAMIH-UVCH, LAIL-ECL et I3D-USTL. Nous travaillons essentiellement avec l’INRETS (Institut National de la Recherche dans le Transport et leur Sécurité) et la compagnie de transport valencienne, SEMURVAL. Cette thèse est préparée au sein du laboratoire d’automatique I3D (Interaction, Image et Ingénierie de la Décision).

## ORGANISATION DU MÉMOIRE

Le mémoire contient, essentiellement, cinq chapitres.

Les deux premiers chapitres sont dédiés à l’état de l’art sur le transport urbain et les systèmes multi-agents :

- Le premier chapitre : **Réseaux de Transport Urbain**, est consacré aux réseaux de transport urbain : la modélisation, la gestion et la régulation d’un réseau de transport et les Systèmes d’Aide à l’Exploitation (SAE).
- Le second chapitre : **Systèmes Multi-Agents**, est consacré aux systèmes multi-agent : leurs architectures, les différents types d’agents, les méthodologies de conception de tels systèmes et les plates-formes de développement de ces systèmes.

Le chapitre 3 aborde la **Modélisation Multi-Agent d’un Réseau de Transport**. Dans ce chapitre, nous décrivons les différents modèles existants dans le domaine du transport urbain, et surtout ceux utilisant une approche à base de systèmes multi-agents. Ainsi, nous positionnons notre modélisation multi-agent d’un réseau de transport urbain pour la régulation des correspondances. L’approche Voyelles, selon le cadre méthodologique proposé par Cassiopée, a été utilisée.

Le chapitre 4 appelé **Régulation des Correspondances** fait l’objet de discussion sur la régulation des correspondances dans les réseaux de transport urbain. Nous définissons la notion de correspondance, l’état de l’art du point de vue décisionnel pour la régulation des correspondances (détermination des actions et des critères de régulation, les algorithmes de régulation). Ainsi, nous proposons un algorithme de régulation des correspondances basé sur la prédiction des perturbations par simulation.

Le chapitre 5 appelé **Validation de la Modélisation Multi-Agent** est consacré à une présentation du système multi-agent proposé et son implémentation logicielle. Nous présentons dans ce cadre, l’étude réalisée sur le réseau de transport de Valenciennes. Une description du réseau de transport urbain d’autobus de Montbéliard est aussi présentée. De

plus, ce réseau de transport a fait l'objet d'autres études afin de mieux comprendre la régulation des correspondances.

Nous terminons par la partie conclusion et perspectives, nécessaire pour présenter les résultats obtenus, et les perspectives de nos travaux de recherche.

## CHAPITRE 1

# RÉSEAUX DE TRANSPORT URBAIN

1.1	INTRODUCTION.....	8
1.2	MODÉLISATION DES RÉSEAUX DE TRANSPORT URBAIN .....	9
1.3	SYSTÈMES D'AIDE À L'EXPLOITATION.....	17
1.4	RÉGULATION .....	26
1.5	CONCLUSION.....	37

# CHAPITRE 1

## RÉSEAUX DE TRANSPORT URBAIN

### 1.1 INTRODUCTION

De nos jours, un grand nombre de personnes est amené à se déplacer quotidiennement en utilisant les réseaux de transport urbain. L'arrêt provisoire des transports (grève ou autre événement) perturbe désormais fortement les usagers. Cela conduit à un absentéisme important sur les lieux de travail et la saturation du trafic routier dans les grandes agglomérations.

Avec l'augmentation de la demande, les exploitants des réseaux de transport urbain sont confrontés à des conditions de circulation de plus en plus difficiles. Pour réagir, les Systèmes d'Aide à l'Exploitation (SAE), qui permettent le suivi en temps réel de l'exploitation, ne cessent d'évoluer grâce notamment, aux progrès réalisés dans les domaines des communications et du traitement de l'information.

La quantité d'informations traitées par les SAE empêche les régulateurs<sup>1</sup> d'exercer correctement leur activité. Pour cette raison, un Système d'Aide à la Décision (SAD) est nécessaire afin de faciliter le travail des régulateurs. De plus, les régulateurs se plaignent de la difficulté de gestion des correspondances étant donné le nombre important des changements effectués lors des déplacements des clients dans un réseau de transport. Une mauvaise gestion des correspondances entraîne une insatisfaction des voyageurs. Suite à une correspondance ratée, un ou plusieurs clients peuvent subir de longues attentes au niveau des arrêts parfois non surveillés. Les régulateurs souhaitent avoir un système intégré au SAE, capable de leur proposer un ensemble de décisions pertinentes afin d'éviter les perturbations dans le réseau.

Dans ce chapitre, nous présentons l'état de l'art des réseaux de transport urbain. Nous abordons leur modélisation, leur exploitation grâce aux Systèmes d'Aide à l'Exploitation (SAE) et leur régulation. Nous montrons, aussi, le rôle du régulateur humain dans le processus de régulation ainsi que le besoin d'une aide à la décision pour faire face aux éventuelles perturbations. Cette aide peut être concrétisée grâce à un Système d'Aide à la Décision (SAD) [Laïchour & *al.*, 00].

---

<sup>1</sup> Personnels chargés de la gestion en temps réel d'un réseau de transport.

## 1.2 MODÉLISATION DES RÉSEAUX DE TRANSPORT URBAIN

Les transports ont connu ces dernières années une évolution dans leur mode de fonctionnement. Grâce à l'informatique, les possibilités de leur gestion ont été modifiées. L'amélioration de la définition de l'offre de transport constitue le premier changement. L'objectif recherché est de planifier au mieux l'offre de transport en fonction de la répartition spatiale et temporelle de la demande. Les exploitants de réseaux de transport ont pu ainsi planifier au mieux la gestion théorique de leurs ressources. La seconde modification concerne la gestion des ressources en temps réel. On cherche alors à réajuster, en temps réel, l'offre en fonction des perturbations auxquelles est soumis un plan de transport représenté. Ce plan doit être révisé si les données du problème ont changé [Balbo, 00] :

- La structure de la demande peut être modifiée dans l'espace et dans le temps ; par exemple, suite à certains événements ou manifestations.
- L'offre de transport peut également être modifiée ; par exemple, un véhicule peut être indisponible à cause d'une panne.

De plus, le plan initial (théorique) est soumis à des aléas extérieurs, en particulier les conditions de circulation. L'informatique et les moyens de communication ont permis d'améliorer la collecte des informations et leur mise en forme, en temps réel, pour le régulateur. Ce dernier a pour fonction de réaliser les modifications de l'offre initiale nécessaires à la résolution de la perturbation rencontrée. Peu de SAE, notamment dans le domaine du transport urbain, proposent des fonctions avancées d'aide à la décision.

### 1.2.1 CONFIGURATION D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT URBAIN

Afin de décrire les éléments nécessaires à l'exploitation d'un réseau de transport urbain, nous présentons maintenant les constituants d'un tel réseau de transport [Laïchour & *al.*, 01a].

#### 1.2.1.1 CONFIGURATION PHYSIQUE

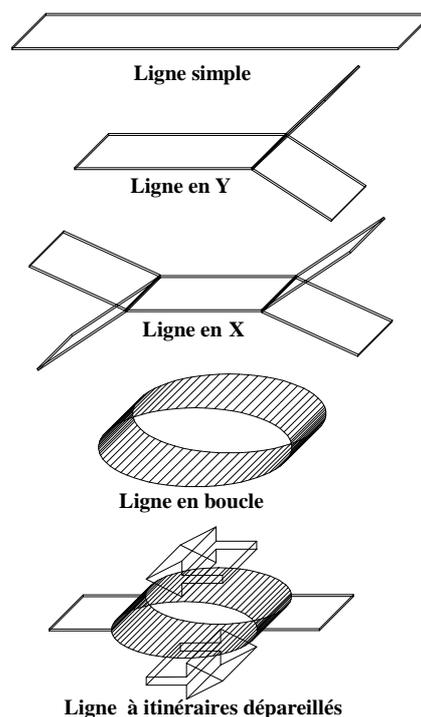
Un réseau de transport urbain est constitué, physiquement, d'un ensemble de lignes et de dépôts. Une ligne contient des arrêts. Parmi ces arrêts, on distingue quatre types. Les arrêts simples sont caractérisés par des horaires de départ et des horaires d'arrivée des véhicules. Les arrêts de régulation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

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

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

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

La structure d'une ligne peut être plus au moins complexe ; voici quelques exemples courants de structures de lignes (figure 1.1) :



**Figure 1.1 : Les structures de lignes**

Sur la figure 1.1, les structures de ligne du type X ou Y forment des antennes.

Certains arrêts de ligne offrent les possibilités de commander des demi-tours et des possibilités de garer les véhicules.

La liaison entre deux arrêts consécutifs est appelée inter-arrêt. Dans l'exploitation, on peut être amené à utiliser des liaisons de raccordement situées en dehors de l'itinéraire commercial pour effectuer des déviations et des retournements (figure 1.2). Certes, certains tronçons d'une ligne peuvent être à sens unique.



**Figure 1.2 : Une liaison de raccordement**

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

La révolution sur une ligne est constituée d'une course aller et d'une course retour avec emprunt du même itinéraire.

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

Une fois le tracé établi, il s'agit de déterminer les différents temps de parcours qui seront appliqués sur la ligne. Ceux-ci peuvent être variables selon le type de jour (jours ouvrables ou week-ends) et les différents moments de la journée (heures creuses, heures de pointe, fin de soirée ...).

Les temps de parcours d'une ligne sont étudiés grâce aux véhicules laboratoires capables d'enregistrer les différentes données des temps de parcours et d'en réaliser un traitement statistique. Ils sont connus par des contrôles effectués à l'aide de chronométrages manuels.

### **1.2.1.2 CONFIGURATION HORAIRE**

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

La conception de l'horaire d'une ligne est une tâche assez complexe qui nécessite la définition de tous les itinéraires de cette ligne. Le travail manuel peut être assez lourd puisque la vitesse

peut varier en cours de journée (heure de pointe) et que l'offre varie suivant les jours (jours ouvrables ou week-ends) et les périodes (scolaires, vacances ...).

Afin de pouvoir définir l'offre d'une ligne, une représentation en graphique de l'ensemble des parcours au cours d'une journée est nécessaire. Cette opération, appelée graphilage, définit l'heure de passage des véhicules aux arrêts, la vitesse, les temps de battements, le nombre de véhicules nécessaires et le nombre d'heures de conduite nécessaire à la satisfaction de la demande sur ligne.

Lorsque ces données sont définies, il faut répartir les heures de travail à effectuer par les conducteurs en tenant compte de la législation du travail, des conventions locales qui président à la définition du temps travaillé au cours d'une journée, des types d'organisation du travail (services coupés, nombre de jours travaillés par séries ...). C'est l'opération dite d'habillage des services. L'habillage est un exercice fondamental pour le fonctionnement de toute entreprise de transport urbain, puisqu'elle détermine, d'une part, les plannings de travail des conducteurs et doit, d'autre part, veiller à minimiser les coûts et ainsi construire une solution acceptable pour l'entreprise.

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

Lorsque le réseau est défini, le résultat doit être communiqué, pour chaque type de période (scolaire, vacances ...) et de jour, à l'extérieur, pour les voyageurs, par l'édition de documents horaires (affiches aux arrêts, dépliant par ligne, ...), mais également à l'intérieur, pour le graphiqueur<sup>2</sup> qui doit pouvoir juger de son travail, pour le conducteur, qui doit recevoir une description détaillée du service (ordre de marche), pour le contrôleur, qui doit pouvoir vérifier la régularité, et pour le gestionnaire du parc du matériel roulant, qui doit connaître le nombre de véhicules nécessaires à l'exploitation, leurs dates de sortie et leur type.

## 1.2.2 EXPLOITATION D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT URBAIN

Dans l'ensemble des réseaux de transport urbain, l'exploitation d'une ligne se décompose en deux phases distinctes [Rizzi & al., 97] (figure 1.3) :

- Une phase de conception et d'élaboration du programme de production concrétisée par le plan théorique appelé Tableau de Marche (TM) de base. Ce TM est défini pour une période donnée tout au long d'une journée d'exploitation donnée.

---

<sup>2</sup> Personnel chargé de créer les horaires.

- Une phase d'adaptation du programme de production (TM) aux conditions réelles d'exploitation concrétisée par le Tableau de Marche commandé qui est perpétuellement actualisé.

Les données issues de l'exploitation en temps réel (phase d'adaptation) viennent alimenter en permanence un tableau de marche (phase de conception) et sont ainsi susceptibles de se traduire par des modifications du tableau de marche de base.

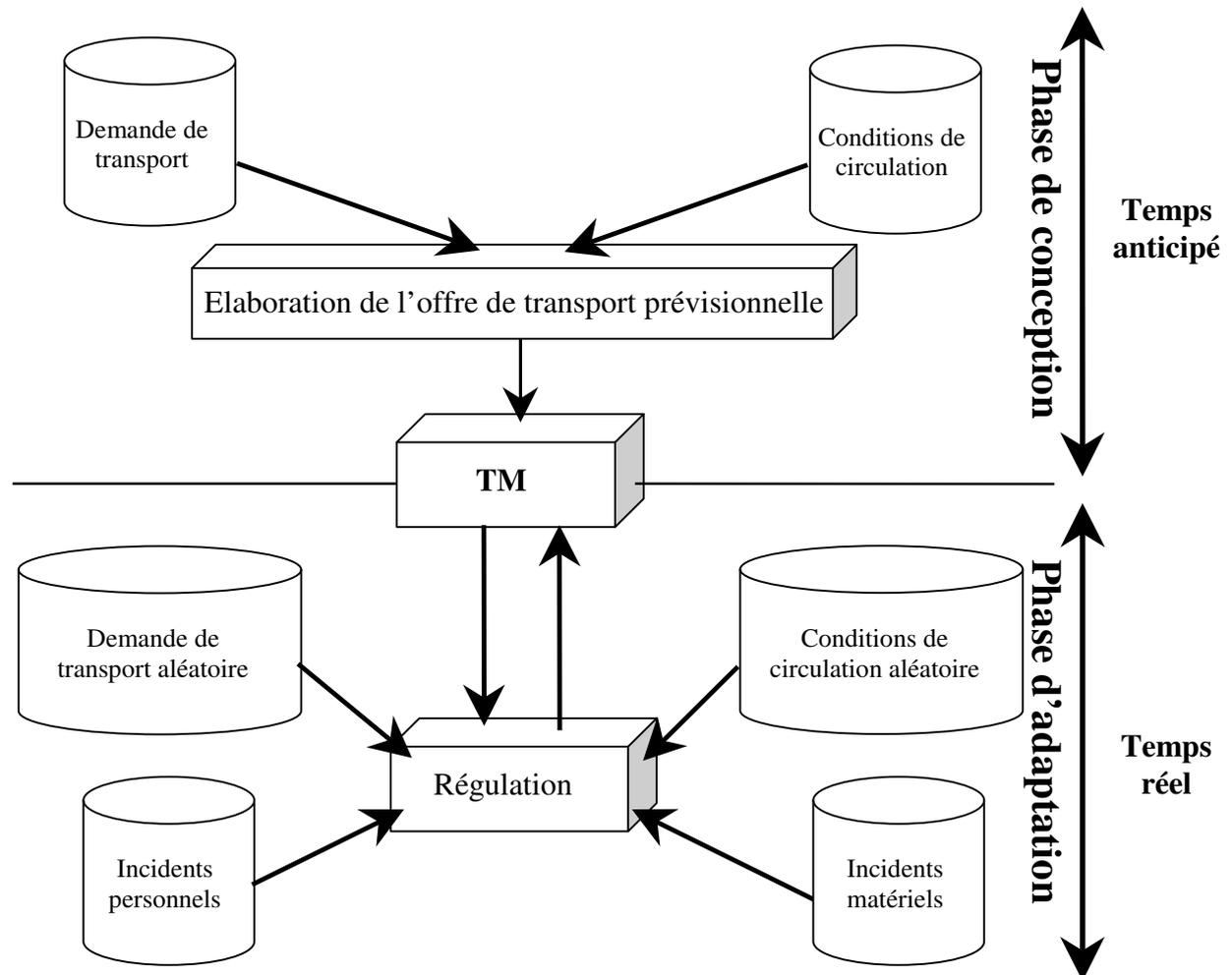


Figure 1.3 : La construction et l'évaluation du tableau de marche

#### Définition 1.1 : (Tableau de Marche)

Le tableau de marche (TM) est le résultat d'une optimisation de l'offre de service en fonction des objectifs et en respectant les contraintes d'exploitation.

Mais l'optimisation de l'offre de service étant réalisée en "temps anticipé", elle nécessite en particulier la formulation d'hypothèses sur les conditions de circulation et la demande de transport [Rizzi & al., 97]. Or, ces deux facteurs sont des phénomènes complexes, de nature aléatoire. C'est pourquoi le TM ne peut définir les modalités du fonctionnement optimal de la ligne que pour des conditions moyennes d'exploitation. Dès que l'on s'écarte de ces

conditions moyennes, il devient nécessaire de réguler pour réagir à la dégradation de la qualité du service qui découle de cette dérive.

### 1.2.3 MOYENS DE RÉSERVES

Pour faciliter l'exploitation en temps réel, on prévoit en règle générale des ressources complémentaires à celles prévues au TM de base qui permettront de réagir face à des indisponibilités du personnel ou du matériel.

Les conducteurs et les véhicules de réserve peuvent être affectés à une ligne, à un groupe de lignes ou à l'ensemble du réseau. Ils sont disponibles sur une plage de temps donnée et à des endroits de réserve ou à des arrêts précis.

Sur un réseau en étoile, il est courant de programmer un véhicule de réserve au dépôt au début de la journée d'exploitation pour pallier la défaillance d'un véhicule ou d'un conducteur, puis d'acheminer ce véhicule en un arrêt central du réseau pour que le régulateur puisse l'avoir rapidement à sa disposition en cas de besoin.

### 1.2.4 OFFRE DE SERVICE

On analyse d'abord la demande de transport [Rizzi & al., 97] pour cerner les objectifs d'exploitation et leurs priorités respectives tout au long d'une journée en sachant le taux de la charge et sa configuration, le temps de déplacement sur chaque tronçon d'une ligne en prenant en compte le nombre de véhicules qui circule sur cette ligne, les départs et les passages à assurer impérativement et enfin les instants de correspondance à respecter.

Puis, on analyse les conditions de circulation afin de déterminer pour une heure précise les temps de parcours alloués pour effectuer chaque itinéraire. L'analyse des conditions de circulation sert également de base pour déterminer les temps de battement<sup>3</sup> minimaux à allouer pour une heure donnée. En effet, les raccords entre courses aux terminus doivent être en fonction de l'irrégularité des temps de parcours sur la course en amont afin de ne pas générer de retard au départ de la course en aval.

A partir de ces données, l'exploitant définit les courses avec leur mission et leurs horaires. Il existe plusieurs catégories de courses :

- Les courses commerciales qui relient deux arrêts dans le cadre de l'offre de service.

---

<sup>3</sup> Temps d'attente autorisé à un arrêt. Pour les mots techniques dans le domaine de transport, veuillez consulter l'annexe A.

- Les courses de remisage, (courses d'entrée et de sortie) qui permettent d'acheminer un véhicule du dépôt à l'itinéraire commercial et réciproquement (dépôt de remisage).
- Les courses de raccordement qui permettent de relier deux arrêts en dehors de l'offre de service.
- Les garages qui consistent à parquer un véhicule en un arrêt où existe cette possibilité (dépôt d'exploitation).
- Les dégarages qui consistent à réinjecter en ligne un véhicule garé.
- Les courses spéciales qui assurent une desserte commerciale située en dehors de l'itinéraire commercial (transport scolaire, etc.).

La mission d'une course commerciale peut être de trois types :

- En charge, c'est-à-dire avec montée et descente des clients à chaque arrêt desservi sur l'itinéraire.
- Semi-directe, où certains arrêts seulement de l'itinéraire sont desservis.
- Haut-le-pied sans clients (HLP), où le véhicule ne prend pas de clients et ne dessert donc aucun arrêt intermédiaire de l'itinéraire. Le véhicule est donc vide.

Le graphique d'une ligne [Hastus] (figure 1.4) constitue le tracé représentant le roulement des véhicules tout au long d'une journée type d'exploitation. Il est à la base de la confection de tous les horaires et de toutes les statistiques d'exploitation.

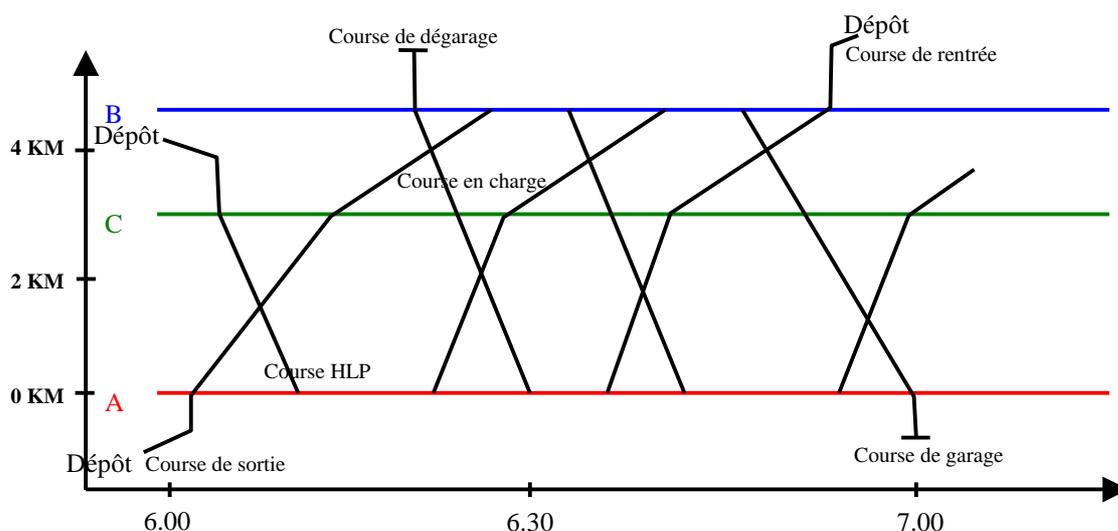


Figure 1.4 : L'offre de service

Sur un graphique, chaque trait représente un bus qui effectue, en enfilade, des allers et retours sur une ligne. Les lignes horizontales de repères représentent les différents arrêts de la ligne.

Le travail demandé au graphiqueur lorsqu'il conçoit son graphique est d'obtenir la meilleure adéquation de l'offre de transport à la demande, et ce à un moindre coût.

Pour matérialiser l'offre de transport sur une ligne, on parle de fréquence de passage des bus sur celle-ci. L'offre de transport doit évidemment être en rapport avec la demande potentielle, mais elle constitue également un instrument de politique du transport. En effet, plus la fréquence de passage est élevée, plus le transport est attractif.

Lorsque la fréquence de la ligne est définie, il s'agit de concevoir le graphique en tenant compte de différentes contraintes. Ces contraintes sont de deux types :

- Externes lorsqu'il s'agit par exemple de respecter des instants de sorties d'écoles ou de correspondances avec un train.
- Internes lorsqu'il s'agit de garantir un battement ou un repas aux conducteurs.

### **1.2.5 CONFECTION DES HORAIRES**

Lorsque le graphique est dessiné, les horaires peuvent être édités. On conçoit plusieurs types d'horaires afin de satisfaire les besoins de différents utilisateurs [Hastus] :

- Les horaires clients : ils représentent les horaires de passage des bus aux différents arrêts de la ligne. On appelle ce type d'horaires, les "fascicules horaires".
- Les horaires arrêts : ils représentent les horaires de passage des bus à un arrêt et dans une direction. On appelle ce type d'horaires, les horaires "aux poteaux".
- Les horaires conducteurs : ils détaillent les différentes courses effectuées par des véhicules (bus) au cours de la journée pour les conducteurs. On appelle ce type d'horaires, les "cartons-horaires".
- Les horaires contrôleurs qui décrivent pour chaque terminus la suite chronologique des départs et des arrivées des différentes lignes d'autobus pour les contrôleurs. On appelle ce type d'horaires, les "horaires-contrôleurs".

Les graphiqueurs essaient de garder la cohérence entre tous ces horaires. Cela représente des jours entiers de collationnement (comparaison des horaires). Malgré cela, des erreurs d'horaires peuvent se produire.

## 1.3 SYSTÈMES D'AIDE À L'EXPLOITATION

### 1.3.1 HISTORIQUE

La gestion de l'exploitation des transports urbains a traversé plusieurs phases de développement [Khorovitch & *al.*, 91].

A l'origine, l'exploitation commerciale du transport urbain était largement décentralisée. Pour concevoir, des agents de surveillance étaient placés à certains arrêts stratégiques du réseau afin d'observer les passages réels des bus aux temps convenus dans le Tableau de Marche de base. L'exploitation commerciale était gérée sur la base des informations récoltées par ces agents de surveillance. En cas de perturbations très importantes, ils informaient la centrale par des appels téléphoniques.

La principale caractéristique de la deuxième phase du développement de l'aide à l'exploitation réside dans l'utilisation de la radiophonie. L'aide à l'exploitation centralisée et la surveillance ont dès lors pris de plus en plus d'importance. Ainsi, le chauffeur peut communiquer directement au poste central toute perturbation survenant sur le trajet ou toute irrégularité du service. Par radio, les régulateurs obtiennent une vue globale du réseau et la localisation des véhicules ainsi que leur situation à partir du poste de commandement central (PCC).

Comme l'a montré la pratique, le fort accroissement des tâches du transport urbain, surtout aux heures de pointes, surcharge les régulateurs qui ne peuvent presque plus garantir le déroulement correct de l'exploitation par la seule radiophonie. Dès lors, les entreprises de transports urbains ont envisagé de nouvelles améliorations possibles de la gestion de l'exploitation. L'application de systèmes informatiques très puissants et la transmission par radio des données pour échanger des informations chauffeur/régulateur sont bien vite considérées comme des solutions possibles pour gérer entièrement l'exploitation. C'est le point de départ de la mise en œuvre de systèmes informatisés d'aide à l'exploitation (SAE). Cela constitue la troisième phase du développement de la gestion de l'exploitation dans les transports urbains.

L'étape actuelle, la quatrième phase, consiste à améliorer ces systèmes d'aide à l'exploitation en intégrant un système d'aide à la décision et un système d'informations aux voyageurs. Ce SAD doit proposer des solutions au régulateur en cas de perturbations.

### 1.3.2 PRINCIPES DE BASE DE LA GESTION DES SYSTÈMES D'AIDE À L'EXPLOITATION

Les SAE sont conçus afin de garantir au mieux le déroulement planifié de l'exploitation. Cette exploitation peut se concevoir comme une boucle de régulation fermée (figure 1.5).

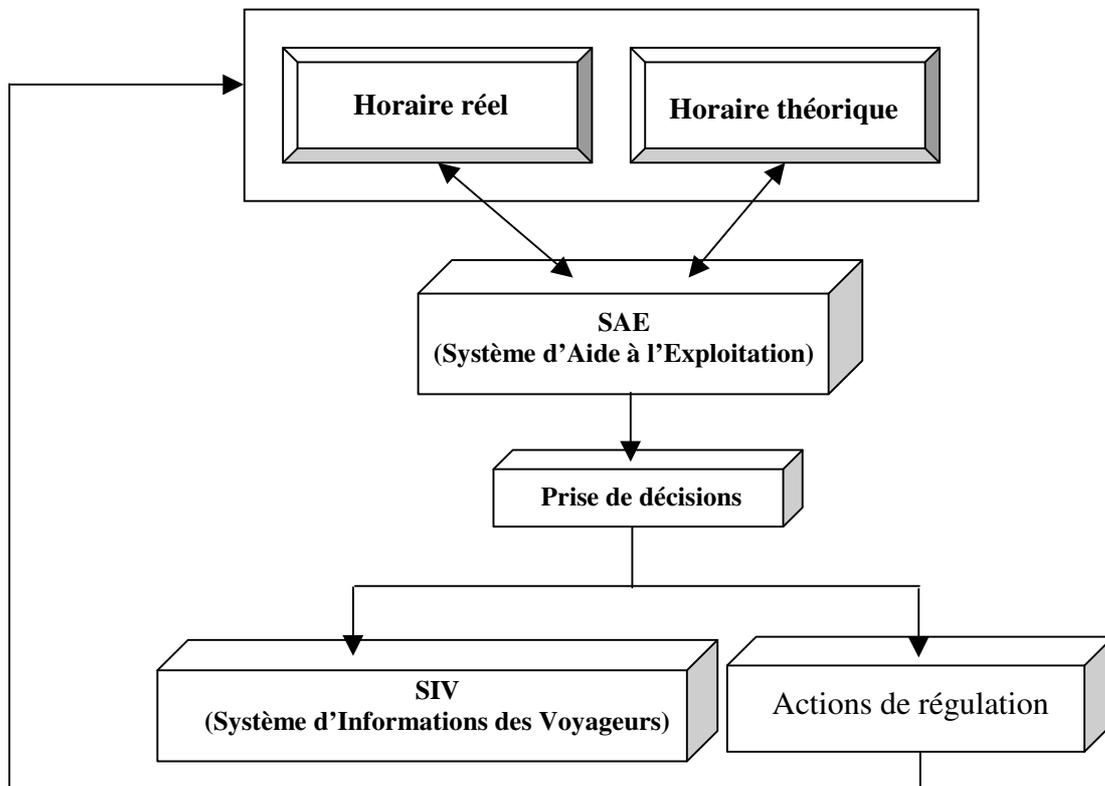


Figure 1.5 : La régulation en boucle fermée

L'horaire est le fondement de la gestion de l'exploitation commerciale. Des perturbations internes et externes accidentelles (perturbations de la circulation, accidents, avaries de caténaire, pannes de courant, ...) influencent cette exploitation. En cas de perturbations, le SAE doit assister le régulateur et gérer les perturbations en intervenant pour rétablir la situation théorique. Il est clair que le processus de régulation est d'autant plus efficace que les perturbations sont découvertes tôt et que les régulateurs sont informés en détail.

#### 1.3.2.1 INFORMATIONS D'UN SAE

Le SAE gère les informations d'exploitation d'un réseau de transport. Ces informations sont [Balbo, 00] (voire figure 1.3) :

- Les informations théoriques représentant le TM théorique initial créé par les graphiqueurs.

- Les informations temps réel représentant l'état du réseau (horaire réel). Elles sont fournies par le SAE.

L'ensemble de ces informations (théoriques et réelles) permet la détection automatique des perturbations au niveau d'un SAE.

### 1.3.2.2 RÔLE D'UN SAE

Pour une régulation plus efficace, le rôle principal d'un SAE est de permettre la comparaison des informations théoriques et les informations réelles [Balbo, 00]. Grâce à ce rôle, un SAE permet la mise à jour des différentes sources d'informations :

- **Mise à jour du TM en différé** : Le TM initial est produit à partir de l'optimisation de l'offre de transport. Mais un réseau de transport urbain est soumis à de fortes variations tant en ce qui concerne les conditions de circulation que la structure de la demande. Le SAE permet une mise à jour de ces données.
- **Modification du TM en temps réel** : En cas de perturbation et suivant les besoins du régulateur, le SAE permet au régulateur de modifier le TM initial.

Le SAE représente une interface entre l'état théorique prévu et l'état réel du réseau.

### 1.3.2.3 DÉTECTION DES PERTURBATIONS

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

- **Avance/retard** : Il s'agit de déterminer pour chacun des véhicules en activité sur le réseau, son avance ou son retard sur son horaire théorique. Il s'agit d'une alarme primaire servant d'indicateur de l'état d'une ligne.
- **Respect des correspondances** : Il s'agit d'une alarme plus élaborée, indiquant qu'une correspondance ne peut être assurée.
- **Avance/retard en centre ville** : Cette alarme repose sur le même principe que la précédente puisqu'il s'agit de déterminer l'avance (ou le retard) d'un véhicule à un arrêt précis du réseau. Dans ce cas, l'arrêt se trouve en centre ville. Il est important de pouvoir connaître l'état d'avancement d'un véhicule en un arrêt critique du réseau afin de permettre au régulateur d'intervenir avant que la situation ne s'aggrave.

- **Train de bus** : Certains SAE [Cure & *al.*, 84] permettent la signalisation du risque de train de bus (au moins deux véhicules se suivent de trop près).
- **Prochain départ non assuré** : Il s'agit de prévenir le poste de commande qu'un véhicule ne peut pas assurer son prochain départ. Le véhicule a accumulé un retard important dans sa course précédente.

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

### 1.3.3 CARACTÉRISTIQUES D'UN SAE

Les principales caractéristiques d'un SAE moderne sont les suivantes [Khorovitch & *al.*, 91] :

- Saisie automatique de la localisation des véhicules.
- Transmission automatique quasi continue des données entre la centrale d'exploitation et les véhicules.
- Traitement automatique des informations dans l'ordinateur d'aide à l'exploitation du poste de commande centralisée.

Le principe de base de tout le fonctionnement est la saisie adéquate de la localisation des véhicules. Les balises placées sur le trajet servent à ajuster l'odomètre. Les données nécessaires des véhicules sont transmises par radio à l'ordinateur central. Celui-ci compare ces données réelles avec l'horaire théorique. Les résultats de cette comparaison entre les valeurs théoriques et réelles sont, d'une part, renvoyés au chauffeur et, d'autre part, mis à la disposition du régulateur.

Pour que chaque SAE puisse fonctionner, l'ordinateur doit contenir une image complète de la situation théorique de l'exploitation en définissant les fichiers suivants :

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

Le SAE constitue l'élément central du traitement de l'information au sein d'une entreprise de transport urbain.

### 1.3.4 FONCTIONS FONDAMENTALES

Les fonctions citées ci-après appartiennent à la plupart des SAE [Khorovitch & al, 91].

#### SAISIE DE LA LOCALISATION DES VÉHICULES :

Les procédures de détermination de la localisation des véhicules appliquées par le SAE s'inspirent du principe de la navigation à l'estime qui, à partir d'un arrêt de référence fixe, permet de mesurer et d'additionner dans le véhicule les éléments du déplacement et les changements de direction. A tout moment, la localisation peut être référée à l'arrêt de départ.

Après un certain trajet, il est nécessaire de corriger la valeur mesurée. Il faut distinguer trois procédures en fonction du type d'ajustement de la valeur mesurée :

- Le repérage physique.
- Le repérage logique.
- Le repérage combiné.

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

Les balises sont absentes du repérage logique. L'odomètre se règle en fonction de la localisation des arrêts. Le signal d'ouverture des portes indique qu'un arrêt est atteint. Les arrêts sont identifiés par la succession des distances entre les arrêts de la ligne concernée.

Ces dernières années, de nombreux SAE ont, en partie, appliqué un repérage combiné. Par conséquent, les informations proviennent aussi bien de balises que de l'arrivée à un arrêt, ce qui permet aussi de réduire le nombre de balises et, dans le même temps, de simplifier le logiciel d'exploitation.

#### SAISIE DE L'OCCUPATION DES VÉHICULES :

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

- Introduction manuelle du taux d'occupation estimé globalement par le chauffeur qui l'introduit dans son terminal.
- Calcul automatique par des appareils de saisie du nombre de passagers équipant les véhicules.

Plus de la moitié des entreprises ont déjà indiqué la saisie du taux d'occupation comme étant une fonction de leur SAE. La moitié de celles-ci, qui travaille en saisie automatique présente encore actuellement un caractère souvent expérimental.

### **ECHANGE D'INFORMATIONS ENTRE LE PCC ET LES VÉHICULES :**

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

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

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

- Informations pour le chauffeur transmises de manière permanente et automatique par l'ordinateur de gestion. Il s'agit surtout d'informations sur les perturbations.
- Instructions qui peuvent être directement activées par la centrale pour corriger l'exploitation commerciale perturbée. Par exemple : accélérer, ralentir, supprimer l'horaire, éviter embouteillage, etc.
- Réponse au chauffeur. Par exemple : horaire exact, temps de travail actuel, pause de midi, etc. Ces messages facilitent les conditions de travail du chauffeur.

L'enquête indique que ces communications font aujourd'hui partie des SAE actuellement en fonctionnement.

**GARANTIE DES CORRESPONDANCES :**

Le contrôle central et la garantie des correspondances représentent une fonction absolument essentielle du SAE, car dans l'ensemble, ils améliorent la qualité du service offert dans des réseaux de transport urbain intégrés. Une comparaison automatique des valeurs théoriques et réelles permet de détecter les correspondances compromises et de les assurer par la centrale de gestion.

Pour les correspondances non automatiques, des propositions émanent du système. Elles peuvent être exécutées, modifiées et rejetées par les régulateurs du Poste de Commande Centralisé (PCC).

Notre objectif est d'améliorer cette partie du SAE en intégrant un Système d'Aide à la Décision (SAD) pour la gestion des correspondances.

**INFORMATION DES PASSAGERS :**

Grâce à l'échange continu des données entre les véhicules et la centrale de gestion, il est aussi possible d'informer les passagers sur les services théoriques et réels. Le SAE dispose de deux possibilités : "acoustique" via une annonce directe du PCC ou "visuelle" via des tableaux d'affichage ou des écrans.

Les passagers peuvent prendre connaissance de cette information à l'arrêt comme dans les véhicules. Du PCC, le régulateur envoie ce message au choix sur une seule ligne, sur plusieurs lignes ou sur toutes les lignes.

En raison du trouble qu'elles provoquent chez les personnes non concernées, les informations sonores aux arrêts de surface ne sont recommandées que pour les messages relatifs à d'importantes irrégularités du service. Pour l'information continue des passagers sur la situation de l'exploitation, il faut prévoir des moyens visuels qui sont gérés automatiquement par le SAE et donnent les informations suivantes :

- Heures du départ effectif.
- Affichage de la destination.
- Remarques relatives à la correspondance.
- Annonces de perturbation.
- Informations spéciales.

Entre temps, divers éléments optiques destinés à l'information des passagers sont aussi présents dans le véhicule :

- Nom de l'arrêt.
- Ligne.
- Destination.
- Remarques relatives à la correspondance.
- Messages de perturbation.

### **INFLUENCE SUR LES FEUX DE SIGNALISATION ROUTIÈRE :**

Pendant la rotation d'un véhicule, entre 15 et 25% des pertes de temps sont provoquées par les systèmes de signalisation lumineuse [Khorovitch & *al.*, 91]. Il existe deux possibilités fondamentales de SAE permettant de gérer la priorité automatique des transports publics aux feux de signalisation :

- Un système centralisé (liaison ordinateur-ordinateur).
- Un système décentralisé.

Avec la première variante, la communication entre le SAE et le système municipal de guidage de la circulation est exclusivement réalisée par un couplage direct des ordinateurs de gestion. Les bus et les tramways échangent uniquement des informations avec l'ordinateur de gestion de l'exploitation.

Dans un système décentralisé (local), toute la communication entre le SAE et la gestion des signaux lumineux est exécutée sur place, c'est-à-dire au point de regroupement ou de jonction. Les véhicules demandeurs y participent directement. Ces systèmes locaux sont largement répandus. Des émetteurs de codes de localisation (balises) servent habituellement à saisir les demandes du véhicule vers le système de régulation du trafic. Des informations sur l'identification et l'éloignement du véhicule sont ainsi transmises avant le point de demande proprement dit. De cette manière, la signalisation peut être adaptée avec souplesse à toutes les conditions marginales existantes.

De nos jours, l'influence sur les signaux lumineux s'utilise déjà avec précision.

### **EVALUATION STATISTIQUE :**

Les évaluations statistiques de l'exploitation commerciale se composent :

- De rapports journaliers.
- De statistiques d'exploitation régulières.
- De statistiques de planification.

Les rapports journaliers sont élaborés automatiquement. Ils expliquent des événements importants tels que :

- Messages du chauffeur.
- Perturbations.
- Véhicules ayant circulé, kilométrage à vide et kilométrage utile.
- Événements de la conduite journalière et taux d'occupation des véhicules.

Les statistiques d'exploitation régulières fournissent des données pour d'autres statistiques (par exemple statistiques annuelles). Elles donnent en plus une vue d'ensemble des écarts horaires et des perturbations survenant sur les diverses lignes.

Les statistiques de planification se subdivisent en analyse du temps de conduite et évaluation de l'occupation des véhicules. Les analyses du temps de conduite servent à corriger l'horaire et à planifier le trajet en vue de l'améliorer.

La saisie des taux d'occupation des véhicules permet de mieux adapter l'offre à la demande actuelle. En analysant ces données appartenant désormais aux SAE standards, les informations sur l'exploitation deviennent plus transparentes. Les points faibles peuvent dès lors être détectés et éliminés.

#### **GESTION D'APPAREILS ET DE DISPOSITIFS EXTERNES :**

Grâce à des Systèmes d'Information de Bord Intégrés (SIBI), les données SAE sont maintenant aussi utilisables par d'autres dispositifs, par exemple pour une identification extérieure des véhicules (numéro de ligne, destination) ou pour une commande des composteurs et des appareils mobiles de billetterie.

Pour des tramways, il est utile et judicieux de coupler le SAE à la commande des aiguilles. Un tel couplage est particulièrement efficace pour tracer les trajets de métro léger. Des inconvénients peuvent résulter de la rencontre de tracés de lignes concurrentes à la suite de perturbations d'horaires. Dans de tels cas, le SAE peut, selon les nécessités de circulation et d'exploitation, déterminer l'ordre des convois à un point de jonction. Dans les zones protégées, une commutation de priorités peut être réalisée pour chaque itinéraire en vue de garantir un ordre de passage judicieux du point de vue de l'exploitation.

Des dispositifs techniques identiques à ceux servant à la saisie de la localisation peuvent être utilisés sur le trajet et dans les véhicules pour contrôler les aiguillages.

Actuellement les SAE sont très sophistiqués. Malgré cela, ils ne sont pas encore arrivés à un point de perfectionnement qui permettrait la surveillance et la résolution des perturbations dans un réseau de transport urbain.

## 1.4 RÉGULATION

Nous définissons la régulation comme suit :

---

### **Définition 1.2 : (Régulation)**

La régulation est un ensemble de méthodes permettant de se rapprocher au plus près du Tableau de Marche initial malgré les perturbations.

---

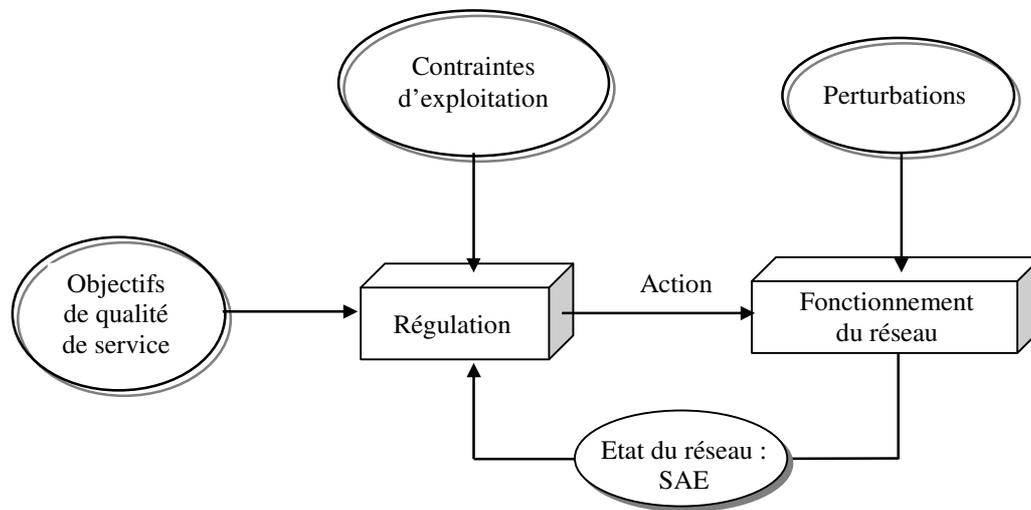
Cette définition introduit deux remarques [Rizzi & *al.*, 89] :

- Il est courant d'identifier le travail de la régulation avec le "retour au TM de base". Dans les situations de perturbations limitées où l'on reste proche des conditions moyennes qui ont servi de base à la construction du TM de base, le respect de ce dernier permet par définition une gestion optimale et constitue donc l'objectif de l'exploitant. Dans le cas contraire, le TM de base n'est plus la norme à respecter, seuls les objectifs sous-jacents au TM de base demeurent, mais non plus les heures de départ et les conditions d'utilisation des voitures et des conducteurs telles qu'elles y figurent. Par exemple, en cas d'allongement important des temps de parcours en période de pointe, l'exploitant effectuera des manœuvres (actions) dans le but d'assurer l'enlèvement des voyageurs aux arrêts, manœuvres qui pourront, dans certaines circonstances, aller jusqu'au changement complet d'un TM.
- Si la régulation ne peut pas par conséquent être réduite au respect du TM de base, elle n'est pas non plus assimilable au seul maintien de la régularité, même dans le cadre d'un horaire commandé différant éventuellement de l'horaire initial. Cette conception souvent rencontrée ne rend pas compte en effet de nombreuses situations où l'exploitant agit en fonction d'autres priorités ; par exemple dans l'hypothèse où la charge est concentrée en un arrêt, il peut être amené à briser la régularité des courses pour y acheminer le maximum de moyens.

Nous pouvons affirmer, aussi, que la régulation est le retour du réseau de transport d'un état perturbé à un état normal.

### 1.4.1 PERTURBATIONS ET LA RÉGULATION

Le fonctionnement d'un réseau de transport urbain est représenté par le système suivant (figure 1.6) [Rizzi & al., 97] :



**Figure 1.6 : Le fonctionnement d'un réseau en temps réel**

Ce système se compose essentiellement de deux éléments :

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

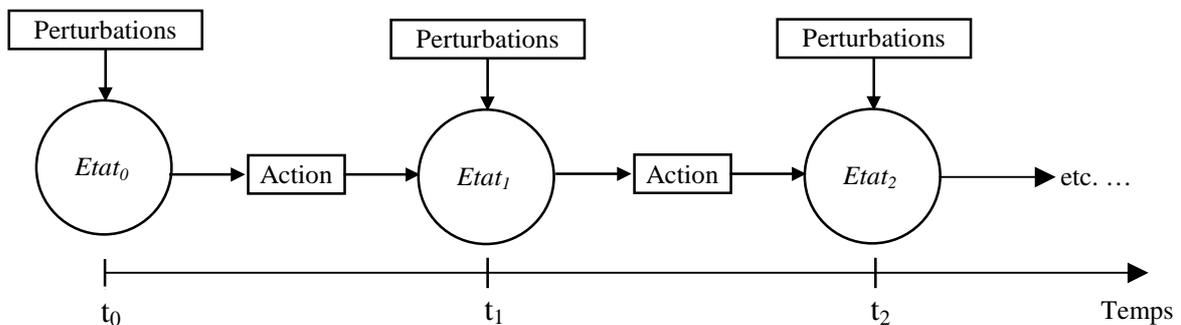
Le fonctionnement d'un réseau de transport urbain doit se dérouler selon le Tableau de Marche de base établi en amont. Malheureusement, des perturbations agissent sur le réseau et affectent son fonctionnement optimal. Ces perturbations sont très diverses et ont des origines différentes. Nous pouvons en citer quelques-unes :

- Des perturbations liées aux conditions de circulation et se répercutant sur les temps de parcours.
- Des perturbations dues aux variations dans la configuration de la demande de transport.

- Des perturbations liées au matériel roulant (voitures indisponibles, marche lente forcée, nombre de voitures disponibles, etc.).
- Des perturbations causées par le personnel conducteur (agent absent à la relève, apprentissage de ligne provoquant un allongement des temps de parcours, différences de conduite, nombre d'agents disponibles).
- Des perturbations liées aux erreurs dans l'application du tableau de marche.

### 1.4.2 DYNAMIQUE DE LA RÉGULATION

Les évolutions du système au cours du temps sont représentées sous forme d'un graphe temporel (figure 1.7) où les cercles représentent les états du réseau et les rectangles des événements de transitions [Rizzi & al., 89].



**Figure.1.7 : La dynamique de la ligne**

- En  $t_0$ , on a un état initial du système noté  $Etat_0$ , optimisant la qualité de service.
- La ligne subit une ou plusieurs perturbations se traduisant par un éloignement du système de l'optimum.
- Si on ne réagit pas, le système va dériver vers un état perturbé.
- En  $t_1$ , le régulateur "interroge" le système et prend connaissance de la dérive intervenue.
- Le système est alors dans un état noté  $Etat_1$  plus ou moins dégradé par rapport à l'état  $Etat_0$  selon que l'instant  $t_1$  est plus ou moins éloigné du moment de déclenchement des perturbations.
- Le régulateur intervient alors par une action de régulation, qui démarre en  $t_1$ , mais elle peut se prolonger dans le temps.

- Cette action vise à faire évoluer le système vers un état compatible avec les objectifs.
- Cependant, de nouvelles perturbations interviennent.
- Si on ne réagit pas devant ces perturbations, le système va dériver vers un état perturbé.
- En  $t_2$ , le régulateur prend connaissance de la nouvelle dérive du système.
- Il initialise une action de régulation adéquate.
- Cette action vise à réaliser un état compatible entre le système et les objectifs.
- Mais d'autres perturbations interviennent, etc.

### 1.4.3 INTERVENANTS DANS LA RÉGULATION

Dans la gestion en temps réel d'un réseau de transport urbain, plusieurs acteurs interviennent [Rizzi & al., 89] :

- **Le régulateur** : Il travaille dans le Poste de Commande Central (PCC). Il a une vision globale du fonctionnement du réseau de transport. Sa mission est de veiller à la supervision du fonctionnement en temps réel d'un réseau de transport.
- **Le conducteur** : Il est un acteur central dans l'activité du réseau de transport car il est à la fois un capteur de la réalité de l'activité du réseau, l'exécutant des actions de régulation et un décideur capable d'autorégulation [Balbo, 00].
- **Le chef de lignes** : Il intervient sur l'itinéraire d'une ligne ou plusieurs lignes. Sa situation sur une ligne lui permet d'aider le régulateur à obtenir un complément d'information. Ainsi, il exécute des actions de régulations en cas de perturbations.
- **Le graphiqueur** : Il a la tâche de la création des horaires en amont du travail de la régulation. Il a pour fonction de prévoir l'ensemble des courses nécessaires pour répondre à la demande des clients. Afin d'atteindre cet objectif, le graphiqueur prend en compte les variations des conditions de circulation, pour déterminer les vitesses théoriques des véhicules ainsi que le nombre de courses à remplir et les temps accordés aux montées et descentes des clients aux arrêts [Balbo, 00]. Le graphiqueur laisse des temps de battement nécessaires aux arrêts afin que le régulateur puisse agir aux perturbations en utilisant ces temps de battement.

La responsabilité première de la régulation revient au régulateur car c'est vers lui que convergent les canaux de communication à l'aide des Systèmes d'Aide à l'Exploitation

(SAE). Les actions des autres intervenants dans la régulation, qui n'ont qu'une vision fragmentée des événements, ne présentent pas le même caractère systématique et ne sont en principe décidées qu'après accord du régulateur. Par contre, leur rôle est déterminant dans l'information du régulateur (radio).

#### **1.4.4 TRAVAIL DU RÉGULATEUR**

Une caractéristique essentielle du travail du régulateur est la nécessité d'anticiper l'évolution des perturbations et leurs conséquences sur le fonctionnement de la ligne.

En effet, quand le régulateur agit tôt, il peut prévenir la dégradation du système qui tend à s'éloigner de l'optimum. Cette capacité d'anticipation - dont dépend par conséquent la qualité de la régulation - est elle-même fonction de :

- L'expérience du régulateur quant à la dynamique de la ligne qu'il gère.
- La richesse des informations dont il dispose.

Cinq moments dans le travail du régulateur sont distingués :

##### **1.4.4.1 ACQUISITION DES INFORMATIONS**

Elle est la base de toute régulation. C'est à partir de ces informations que le régulateur prend des décisions. Ces informations doivent être très précises. Le régulateur dispose de deux sources d'informations : le Système d'Aide à l'Exploitation (SAE) et la radio. Le SAE lui permet d'avoir une vue globale de l'évolution du réseau ou l'évolution d'un bus en particulier. L'information est basique, elle concerne essentiellement la position des bus et leur état (avance/retard). La radio permet au régulateur d'avoir des informations plus précises sur l'état du trafic, les raisons des retards, etc.

##### **1.4.4.2 PROJECTION DANS LE FUTUR**

Dans cette étape, le régulateur projette ces décisions afin de calculer leurs effets. Ainsi, cette projection permet au régulateur de connaître les décisions pertinentes.

##### **1.4.4.3 ANALYSE**

L'analyse de la situation de la ligne, permet au régulateur de filtrer toutes les informations qu'il reçoit pour ne retenir que les informations jugées pertinentes. Cette phase consiste à détecter les informations qui peuvent entraîner par la suite une perturbation éventuelle afin d'en évaluer les conséquences sur le réseau. L'analyse fait

appel à un savoir-faire qui repose aussi bien sur des règles de régulation que sur l'expérience du régulateur.

#### 1.4.4.4 PHASE DE DÉCISION

Elle permet au régulateur de choisir les actions à entreprendre pour résorber la perturbation. Le régulateur peut bien prendre la décision de ne rien faire s'il juge que la perturbation est mineure et qu'elle est temporaire. Sinon, il doit élaborer une solution de régulation qui est fonction des informations qu'il a reçues, des objectifs à atteindre et de son expérience.

#### 1.4.4.5 APPLICATION DE CETTE DÉCISION

Le régulateur décompose sa décision en plusieurs actions exécutables par les conducteurs puis les leur transmet par radio. Le régulateur doit savoir-faire appliquer ses décisions.

Chaque décision du régulateur se traduit par la mise en œuvre d'un nouveau TM commandé qui comprend les heures de départ, de passage aux arrêts de régulation et d'arrivée de chaque course ainsi que l'affectation aux courses de chaque conducteur et de chaque véhicule.

Le TM courant évolue donc à la fois en fonction des décisions du régulateur et des perturbations.

### 1.4.5 ECHANGES D'INFORMATIONS RELATIVES À LA RÉGULATION

Dans la figure 1.8 [Laïchour & *al.*, 01a], nous montrons les échanges d'informations s'effectuant pendant le déroulement du service réel de l'exploitation entre les différentes parties qui veillent au bon fonctionnement de l'exploitation. Ces parties communiquent essentiellement avec le régulateur. Leur seul lien existant avec l'extérieur est caractérisé par les informations communiquées à la clientèle par le biais des conducteurs et du régulateur. Dans la suite, nous donnons la constitution de chacune de ces parties :

- **Maîtrise d'exploitation** : cette partie regroupe les inspecteurs du trafic, les inspecteurs des dépôts, les contrôleurs de place (gestion en temps réel du personnel), les chefs de ligne, les contrôleurs de réseau et les contrôleurs de fraude.
- **Services internes** : ce service regroupe la direction de l'exploitation, les méthodes (réalisation du TM), le service de gestion du personnel de l'exploitation, le service de développement commercial et le service d'information de la clientèle.

- **Services techniques internes** : les services techniques regroupent la maintenance radio-téléphone, la maintenance du réseau, l'implantation infrastructure du réseau et les ateliers de dépannage des véhicules.
- **Services externes** : ils regroupent les services techniques de la ville, le service gestion du trafic urbain (signalisation, agents de circulation, les secours, la police) et les services nationaux (EDF, GDF, société des eaux, etc.).

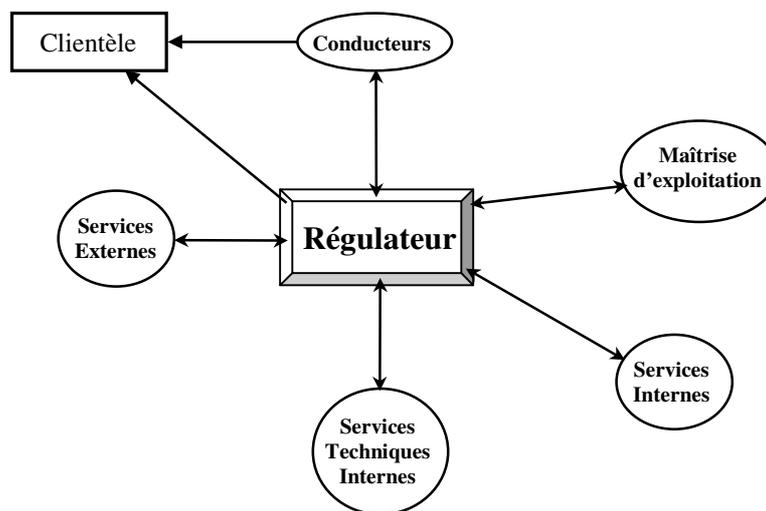


Figure 1.8 : Les échanges relatifs à la régulation

#### 1.4.6 ACTIONS DE RÉGULATION

Dans cette section, les différentes actions de régulation existantes dans un réseau de transport sont énumérées. Les actions de régulation sont différentes d'un réseau de transport à un autre. L'application d'une action de régulation peut être valable sur un réseau mais pas sur un autre.

Afin d'appliquer les décisions prises, le régulateur dispose d'une boîte à outils de 15 actions de régulations qu'il peut utiliser. Il peut aussi combiner ces différentes actions afin de satisfaire les objectifs fixés.

On peut classer ces actions en trois catégories selon le lieu de leur exécution : les actions de régulation en terminus, en ligne ou indifféremment en terminus ou en ligne [Rizzi & al., 89] [Soussaul, 98][Laïchour & al., 00].

Les actions de régulation en terminus sont :

- **Sautage ou distancement** : action consistant à modifier l'affectation des véhicules aux services par permutation simple ou circulaire. Ces actions consistent à modifier l'affectation des services aux voitures. Ceci permet de compenser un retard d'un véhicule *A* par un autre véhicule *B* disponible sur le moment et de réaffecter le service de la voiture *B* de remplacement à la voiture *A*.

- **Dérive** : prise d'avance (dérive négative) ou prise de retard (dérive positive). La dérive consiste à commander les heures de départ des véhicules à un horaire postérieur ou antérieur à l'horaire théorique de façon progressive. Cette action permet d'anticiper le retard d'une ou plusieurs voitures ou bien, dans une situation favorable, de revenir au TM commandé. De cette action découle le départ anticipé ou différé d'un seul véhicule.
- **Suppression ou insertion** : Ces actions consistent à supprimer ou à rajouter un départ au Tableau de Marche Commandé. Elles sont appliquées lors d'un incident matériel à la suite duquel le véhicule ne peut pas prendre son service ou pour répondre à la demande de transport non prévue.
- **Retombe** : Cette action consiste à décaler les horaires de départ des voitures à un terminus suite à une suppression ou à une injection de départ. Elle permet de rééquilibrer les intervalles entre les départs des voitures pour éviter une lacune.

Les actions de régulation en ligne sont :

- **Modification des temps de parcours alloués** : La modification du temps de parcours alloué consiste à augmenter ou à diminuer ce temps pour effectuer une partie de la course par rapport à l'horaire commandé dans le TM commandé. Cette action permet de faire correspondre les temps de parcours alloués aux temps de parcours réels lorsque les conditions de circulations se modifient.
- **Attente à un point d'arrêt** : L'attente consiste à différer d'une ou de plusieurs minutes le départ d'un véhicule à un point d'arrêt. Cette action permet soit la création volontaire d'un regroupement de véhicules ou au contraire le rétablissement de la régularité, ou encore l'absorption d'une charge ponctuelle (sortie d'école, d'usine, etc.).
- **Transbordement** : Le transbordement est le transfert de voyageurs d'une voiture dans une autre. Cette manœuvre permet de libérer une voiture de sa charge en cas de panne ou de ré-affectation de service.
- **Dépassement sur ligne** : Cette action consiste à doubler un véhicule par le suivant.
- **Permutation de conducteurs sur ligne** : Cette action consiste à permuter deux véhicules circulant en sens opposé entre deux conducteurs à leur point de croisement sur le réseau.

- **Déviation** : La déviation consiste à faire circuler un ou plusieurs véhicules sur un itinéraire différent de l'itinéraire commandé. Cette action permet d'éviter une congestion risquant de perturber le véhicule.

Les actions de régulation qui peuvent être commandées selon les cas, en terminus ou en ligne, sont :

- **Changement de mission par raccourcissement (demi-tour)** : Le demi-tour est un changement de course pour lequel la voiture effectue une course plus courte que celle commandée. Cette action permet de compenser un retard substantiel ou de replacer une voiture par rapport à son TM commandé.
- **Changement de mission par allongement** : Cette action consiste à affecter à une voiture prévue sur une course courte une course plus longue. Elle permet de conserver une fréquence élevée sur une partie chargée et non pas sur la totalité de la ligne.
- **Changement de mission par transformation** : Le changement de mission consiste à affecter un véhicule à une autre mission que celle prévue initialement.
- **Utilisation de véhicule annexe** : L'utilisation de véhicule annexe consiste à se servir d'un véhicule de faible capacité (type minibus) pour remplir une mission ponctuelle. Cette manœuvre permet une plus grande maniabilité pour répondre à de faible charge non prévue.

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

Pour la régulation d'une ligne, le régulateur applique la règle suivante "un véhicule + un conducteur = un départ". Dès que le régulateur dispose soit d'un véhicule, soit d'un conducteur, il doit chercher à compléter le couple véhicule-conducteur pour optimiser l'utilisation de ses moyens.

Cette règle est présente de manière implicite dans un certain nombre d'actions :

- Le sautage en est l'illustration parfaite, puisqu'il consiste à faire partir un conducteur à l'heure sur un véhicule quelconque, c'est-à-dire : "le conducteur prévu + un autre véhicule = le départ prévu".
- Le distancement en est une autre illustration qui consiste à faire un départ par un autre conducteur que celui prévu, avec son véhicule, c'est-à-dire : "un autre conducteur + son véhicule = le départ prévu".

- Il en va de même avec le changement de mission (notamment le demi-tour) auquel le régulateur a recours pour éviter de se trouver dans la situation où il n'aura plus à sa disposition de couple véhicule-conducteur.

## **1.4.7 LOGIQUES DE RÉGULATION**

Dans son travail, le régulateur est amené à appliquer des actions de régulation en respectant des objectifs d'exploitation. Ces objectifs d'exploitation sont différents d'un réseau de transport urbain à un autre [Laïchour & al., 01a]. On relève d'après les études réalisées à la RATP [Rizzi & al., 89], trois logiques différentes liées à la configuration de la demande de transport : la logique d'enlèvement de la charge, la logique de régularité et la logique de ponctualité. A ces logiques, il faut ajouter la gestion du personnel qui agit comme une contrainte d'exploitation. Nous introduirons par la suite, dans le chapitre 4, la logique de correspondance.

### **1.4.7.1 LOGIQUE D'ENLÈVEMENT DE LA CHARGE**

C'est la logique dominante aux pointes du matin et de l'après-midi où la charge est par définition la plus forte, mais cette logique est également opératoire dans d'autres cas (sorties d'école ou dessertes des grands magasins le midi). L'objectif est d'enlever les voyageurs sans en laisser aux arrêts, en concentrant les moyens sur le(s) arrêt(s) de montée le(s) plus important(s). Les procédures de régulation mises en œuvre dans le cadre de cette logique sont, par conséquent, très diversifiées en fonction de la configuration de la charge.

### **1.4.7.2 LOGIQUE DE RÉGULARITÉ**

On est en logique de régularité lorsque l'arrivée des voyageurs aux arrêts s'effectue indépendamment des passages des voitures (bus). Cette logique prévaut notamment dans des périodes de creux où cette condition est respectée, ainsi qu'aux périodes de pointe dans le cas où la charge est répartie sur un grand nombre d'arrêts.

Du point de vue de la qualité de service offert, la régularité des passages permet de satisfaire deux objectifs :

- Minimiser l'attente des voyageurs aux arrêts ; en particulier, dans la situation où les voyageurs arrivent à l'arrêt de façon uniforme.
- Equilibrer les charges entre les véhicules et donc maximiser le confort des voyageurs à bord des voitures. En effet, le taux d'occupation virtuel, c'est-à-dire le taux de charge moyen tel qu'il est perçu par les voyageurs, influe sur la satisfaction des passagers.

### 1.4.7.3 LOGIQUE DE PONCTUALITÉ

Cette logique s'applique évidemment en premier lieu sur les lignes à horaire. On considère en général qu'au-delà d'un intervalle de temps (12 minutes dans le cas de la RATP [Rizzi & al., 89]), on est en logique de ponctualité, dans la mesure où l'arrivée des voyageurs aux arrêts s'effectue en fonctions des horaires programmés et annoncés au public. Dans les autres cas, on se trouve en logique de régularité.

On trouve également la logique de ponctualité sur l'ensemble du réseau dans le cas d'horaires à respecter impérativement : premiers départs en début de journée et derniers départs de la fin de journée.

### 1.4.7.4 CONTRAINTE DE GESTION DU PERSONNEL

Cette logique joue un rôle essentiel dans les périodes de la journée où se pose le problème des fins de services et des relèves de conducteurs. L'utilisation du personnel de conduite est soumise à des règles plus ou moins contraignantes.

Le régulateur poursuit trois objectifs dans ses actions de régulation:

- Respecter les conditions réglementaires de travail des conducteurs (durée maximale de chaque service, amplitude maximale et coupure minimale dans les cas de services conducteur en plusieurs fois, temps de décalage), et minimiser les surcoûts pour l'entreprise découlant de recours à des dispositions dérogatoires qui génèrent du temps payé supplémentaire. Selon les intérêts du client, de l'exploitant et du conducteur, il faut trouver un compromis pour résoudre les conflits qu'un régulateur peut rencontrer dans la prise de décision.
- Répartir au mieux le temps de travail total sur l'ensemble des services conducteurs.
- Découper l'offre de transport en services intéressants pour les conducteurs (maximisation du nombre de services directs, etc.).

Ces logiques n'opèrent jamais de façon univoque, mais interfèrent entre elles, au travers de priorités qui se modifient tout au long de la journée et selon les circonstances. Elles peuvent être selon les cas complémentaires ou contradictoires.

Le régulateur est donc éventuellement amené à pratiquer un arbitrage entre les différents objectifs. Quand il y a des perturbations, il doit définir des priorités entre les objectifs ce qui amène à définir des actions à entreprendre.

## **1.4.8 CONTRAINTES DE LA RÉGULATION**

Le régulateur prend en considération un certain nombre de contraintes qui définissent un cadre décisionnel propre à la ligne qu'il exploite. Ces contraintes concernent la demande de transport, les conditions de circulation, la topographie de la ligne et la structure de l'exploitation.

### **1.4.8.1 DEMANDE DE TRANSPORT**

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

### **1.4.8.2 CONDITIONS DE CIRCULATION**

Les conditions de circulation influent sur les actions de régulation. De nombreux phénomènes nuisent à la fluidité du trafic et entraînent un allongement important des temps de parcours : Livraisons, embouteillages, carrefours, feux de signalisation, mauvaise synchronisation des feux, stationnements illicites, travaux, marchés, sortie d'établissements scolaires, etc.

### **1.4.8.3 TOPOGRAPHIE DE LA LIGNE**

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

### **1.4.8.4 STRUCTURE D'EXPLOITATION**

La façon dont est organisée l'exploitation de la ligne a bien évidemment des conséquences importantes sur le travail du régulateur. En particulier, les éléments suivants jouent un rôle considérable : le nombre de dépôts de remisage, la situation du dépôt de remisage sur la ligne, la situation du point de relève sur la ligne, la possibilité de garage, et la situation du point de relève sur la ligne.

## **1.5 CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons vu que le domaine de gestion d'un réseau de transport urbain est :

- Distribué : La distribution géographique des informations sur le réseau concernant les véhicules et les arrêts (terminus, correspondances, etc.).
- Automatisé : la mise à jour automatique ou semi-automatique des informations concernant la gestion du réseau de transport grâce au SAE.
- Surveillé : Le suivi en temps réel de l'exploitation à l'aide du SAE et la prise de décisions sont la responsabilité du régulateur. Donc, la surveillance du réseau est permanente.
- Aléatoire : la qualité des données exploitées est incertaine (à cause d'éventuelles pannes des capteurs) ainsi que l'environnement dans lequel évolue la gestion (milieu urbain).

L'objectif de la modélisation d'un réseau de transport urbain est d'obtenir une représentation utilisable et une description parfaite afin de pouvoir l'exploiter. Grâce aux SAE, l'exploitation est possible mais il reste encore à progresser au niveau de l'aide à la décision. Pour améliorer les SAE, l'ajout d'un Système d'Aide à la Décision (SAD) en lien direct avec un SAE doit permettre la réaction en temps opportun pour toute anomalie d'exploitation.

## CHAPITRE 2

# SYSTÈMES MULTI-AGENTS

2.1	INTRODUCTION.....	40
2.2	AGENTS ET SYSTÈMES MULTI-AGENTS.....	42
2.3	CONCEPTION DES SYSTÈMES MULTI-AGENTS.....	49
2.4	CONCLUSION.....	72

## CHAPITRE 2

# SYSTÈMES MULTI-AGENTS

## 2.1 INTRODUCTION

### 2.1.1 DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE...

L'Intelligence Artificielle (IA) est apparue au début des années 60. L'objectif de cette nouvelle discipline est d'aborder des problèmes complexes par la modélisation et la simulation de comportements dits intelligents.

L'informatique en général et l'IA en particulier ont, longtemps, considéré les programmes comme des entités individualisées et capables de rivaliser avec l'être humain dans des domaines précis [Galland, 01].

L'évolution de l'application de l'IA dans des domaines, en particulier celui de l'aide à la décision, montre les limites de son approche classique qui s'appuie sur une centralisation de l'expertise au sein d'un système unique.

L'approche IA classique, à travers le développement industriel des systèmes experts, confirme que la conception d'un système d'IA soulève de multiples difficultés telles que la taille importante des bases de connaissances, la multiplicité des sources de connaissances et d'informations, l'incohérence des bases de règles et le raisonnement dépendant de multiples points de vue. Souvent la réalisation d'un projet nécessite la mise en œuvre de plusieurs compétences différentes [Bensaïd, 99]. Par exemple, concevoir un système de supervision (surveillance) d'un réseau de transport urbain nécessite des connaissances diverses : celles du régulateur, mais aussi celles des conducteurs, celles des clients, etc.

Les travaux menés au début des années 70 sur la concurrence et la distribution ont contribué à la naissance d'une nouvelle discipline nommée IAD [Labidi & al., 93]. Elle a pour but de remédier aux insuffisances de l'approche classique de l'IA en proposant la distribution de l'expertise sur un groupe d'entités devant être capables de travailler en groupe (coopération) et d'agir dans un environnement commun afin de résoudre les conflits éventuels. Dès lors, l'intelligence du système provient de l'interaction entre toutes ces entités qui échangent des connaissances pour atteindre des objectifs du système [Agimont, 96].

L'idée de l'approche provient du fait que la résolution d'un problème est basée sur la décomposition de ce problème en sous-problèmes. Elle est conforme à l'approche "diviser

pour régner” qui est utilisée pour la gestion de grands projets. Mais l’IAD consiste à associer à chaque sous-problème une entité appelée agent qui est capable de résoudre, celui-ci à condition que tous les agents (associés aux sous-problèmes) collaborent entre eux et échangent les informations nécessaires pour aboutir à l’objectif commun. L’IAD est défini comme suit :

---

**Définition 2.1 : (Intelligence Artificielle Distribuée)**

L’Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) est une branche de l’Intelligence Artificielle (IA) qui s’intéresse à la modélisation de comportement intelligent par coopération entre un ensemble d’entités intelligentes appelées “agents”.

---

L’IAD se divise en deux branches principales [Sabas, 01] :

- La Résolution Distribuée de Problèmes (RDP) qui étudie comment distribuer des compétences au niveau de chaque partie du système, de façon à ce qu’il soit globalement plus compétent que chacune de ses parties ;
- La Simulation des Systèmes Complexes (SSC) qui concerne plus particulièrement les systèmes multi-agents (SMA). Les SMA traitent le comportement d’un ensemble d’agents autonomes qui essaient de résoudre un problème commun.

La différence notable entre la RDP et les SMA est que la RDP possède une approche descendante (top down) et les SMA une approche ascendante (bottom-up). Nos travaux de recherche rentrent dans la branche des systèmes multi-agents.

Nous allons développer le paradigme multi-agent et réaliser un tour d’horizon sur cette branche. Depuis son apparition, elle ne cesse de progresser et d’être utilisée dans différents domaines d’application notamment ceux distribués.

### 2.1.2 ...AUX SYSTÈMES MULTI-AGENTS

Le paradigme IAD s’éloigne de la problématique du raisonneur unique pour s’intéresser aux difficultés de la cohabitation d’une communauté. Contrairement à l’approche centralisée de l’IA, l’Intelligence Artificielle Distribuée vise la distribution de l’expertise sur un ensemble de composants qui communiquent pour atteindre un objectif global (élaboration d’un diagnostic, résolution d’un problème, etc.). Cette approche consiste à diviser un problème en sous-problèmes. Une extension des systèmes d’IAD est proposée : les composants doivent être capables de raisonner sur les connaissances et les capacités des autres dans le but d’une coopération effective [Labidi & al., 93]. Dans ce cas, ils doivent être dotés de capacités de perception et d’action sur leur environnement et doivent posséder une certaine autonomie de comportement. On parle alors d’agents et de systèmes multi-agents.

Par conséquent, l'objectif du paradigme multi-agent consiste à modéliser le problème à l'aide d'un ensemble d'agents intelligents fonctionnant en commun à partir d'un contrôle décentralisé. Le paradigme multi-agent combine de nombreux avantages :

- Prise en compte d'autres points de vue sur le fonctionnement de l'intelligence.
- Robustesse.
- Fiabilité : redondance des agents.
- Flexibilité : de nouvelles tâches peuvent être gérées plus facilement grâce à la modularité.

Les systèmes multi-agents se caractérisent par l'autonomie et l'intelligence des composants impliqués. Toutefois, un agent ne dispose pas d'une vision globale de son environnement.

Dans ce chapitre, nous présentons les fondements des systèmes multi-agents, et nous abordons les méthodologies et les plates-formes existantes pour la conception de tels systèmes. Nous considérons les systèmes multi-agents comme un outil pour la modélisation des systèmes distribués comme les réseaux de transport urbain. Enfin, nous souhaitons mettre en évidence, à travers cette étude, que le choix d'une méthodologie ainsi qu'une plate-forme SMA est une tâche qui est loin d'être évidente.

## **2.2 AGENTS ET SYSTÈMES MULTI-AGENTS**

Dans cette section, nous définissons les notions d'agent et de système multi-agent. Leurs définitions correspondent aux termes sous-entendus dans nos travaux de recherche. Bien sur, nous nous basons sur les définitions existantes dans la littérature des systèmes multi-agents. Nous abordons, aussi, les différents types d'agents. Enfin, nous concluons cette section par les différentes propriétés dont un agent peut être doté.

### **2.2.1 AGENTS**

En intelligence artificielle distribuée, la notion d'agent est le concept de base. C'est autour de cette entité intelligente appelée agent que les chercheurs ont conçu le paradigme multi-agent. Ce dernier consiste en un ensemble d'agents dotés de comportements intelligents afin de collaborer ensemble pour la résolution d'éventuels problèmes rencontrés dans l'élaboration des solutions.

### 2.2.1.1 NOTION D'AGENT

Les chercheurs, qui travaillent dans ce domaine, ont donné différentes définitions du terme agent [Ferber & *al.*, 88][Ferber, 89][Erceau & *al.*, 91][Demazeau & *al.*, 91][Shoham, 93][Maes, 94][Minsky, 94][Ferber, 95][Jennings & *al.*, 98][Jennings & *al.*, 00]. A l'heure actuelle, il n'y a pas de véritable consensus sur sa définition. Nous citons deux propositions qui nous semblent complètes et intéressantes et surtout s'adaptant à notre problématique.

La première définition est celle donnée par J. Ferber dans [Ferber, 95]. Elle laisse apparaître des propriétés comme : les ressources, les tendances et la reproduction. La définition est la suivante :

---

**Définition 2.2 : (Agent)**

On appelle agent une entité physique ou virtuelle :

- a- qui est capable d'agir dans un environnement,
  - b- qui peut communiquer directement avec d'autres agents,
  - c- qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser),
  - d- qui possède des ressources propres,
  - e- qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement,
  - f- qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune),
  - g- qui possède des compétences et offre des services,
  - h- qui peut éventuellement se produire,
  - i- dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit.
- 

La seconde définition est celle donnée par N.R. Jennings et M. Wooldridge dans [Jennings & *al.*, 00]. Cette définition définit un agent en s'inspirant du concept d'objet.

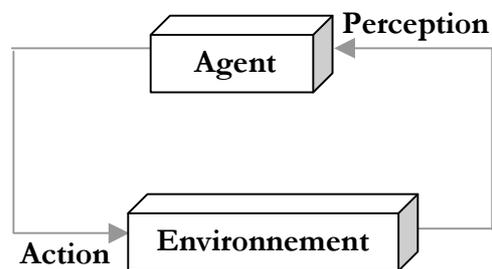
**Définition 2.3 : (Agent)** [Jennings & *al.*, 00]

Un agent est un système encapsulé (ou informatique), situé dans un environnement, et qui agit d'une façon autonome et flexible pour atteindre les objectifs pour lesquels il a été conçu.

Nous retiendrons de ces deux définitions que les agents sont :

- Des entités intelligentes (physiques ou abstraites).
- Situés dans un environnement. Cet environnement est constitué des éléments extérieurs à l'agent. Les agents reçoivent l'état de cet environnement et peuvent agir sur cet environnement [Sabas, 01].
- Capables d'agir et de modifier leur environnement par leurs actions.
- Des entités clairement identifiables de résolution de problèmes.
- Destinés à atteindre un objectif spécifique.
- Autonomes et responsables de leur comportement.
- Capables d'adopter un comportement flexible pour résoudre des problèmes selon les objectifs de la conception.
- Capables de communiquer entre eux et de coopérer (dans une société d'agents).

Le comportement schématique d'un agent peut être résumé en trois étapes (figure 2.1) : Tout d'abord l'agent acquiert des perceptions de l'environnement. En suite, l'agent décide de réagir avec une action. Enfin, l'action est effectuée sur l'environnement de l'agent.



**Figure 2.1 : Le comportement d'un agent**

### 2.2.1.2 TYPOLOGIE D'AGENTS

Les agents ont tendance à travailler en groupe (les mécanismes et connaissances associés concernent les activités du groupe). Ils comportent également une tendance individuelle avec

des mécanismes et des connaissances contenant les règles de fonctionnement interne de l'agent. On peut caractériser un agent par : son rôle, sa spécialité, ses objectifs et ses fonctionnalités, ses croyances, ses capacités décisionnelles, ses capacités de communication et éventuellement ses capacités d'apprentissage.

Il existe trois types d'agents : réactifs, cognitifs et hybrides. Ces trois types d'agents se distinguent par la granularité de leurs connaissances. Un agent hybride combine les propriétés d'un agent réactif et d'un agent cognitif (figure 2.2).

Nous considérons un agent comme étant un objet actif en se basant sur la Programmation Orientée Objets (POO). L'une des différences entre un agent et un objet réside dans l'absence de coopération entre les objets en POO. Un agent hérite les propriétés d'un objet passif qui est la base de la hiérarchie pour la construction des agents inspirés de la conception orientée objets. Nous verrons par la suite dans la définition d'un système multi-agent (définition 2.7) qu'un objet passif représente tout ce qui n'est pas un agent dans un environnement multi-agent (ressources, etc.). La figure 2.2 peut être lue aussi du bas vers le haut.

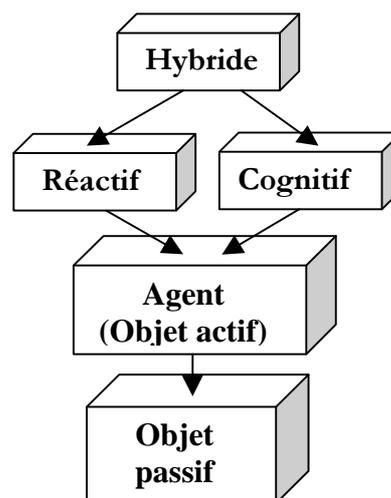


Figure 2.2 : Une hiérarchie des agents

### 2.2.1.2.1 AGENTS RÉACTIFS

Les défenseurs de ce type d'agent partent du principe suivant. Dans un système multi-agent, il n'est pas nécessaire que chaque agent soit individuellement "intelligent" pour parvenir à un comportement global intelligent (notion d'émergence). En effet, des mécanismes simples de réactions aux événements peuvent faire émerger des comportements correspondants aux objectifs poursuivis. Cette approche propose la coopération d'agents de faible granularité (fine grain) mais beaucoup plus nombreux. Les agents réactifs sont de plus bas niveau, ils ne disposent que d'un protocole et d'un langage de communication réduits. Leurs capacités répondent uniquement à la loi stimulus-réponse. Un agent réactif ne dispose pas d'un

mécanisme de mémorisation de ses expériences. Il ignore ses expériences car il ne dispose pas d'un processus lui permettant de planifier ou d'apprendre.

---

**Définition 2.4 : (Agent Réactif)**

Les agents réactifs sont de plus faible granularité. Ils ne disposent pas de modèle des autres agents et leur mécanisme de raisonnement est primitif (réactif), souvent du type stimulus-réponse [Ferber, 95]. Ils réagissent uniquement à leur perception de l'environnement et agissent en fonction de celle-ci [Foisel, 98].

---

**2.2.1.2.2 AGENTS COGNITIFS**

Les systèmes d'agents cognitifs sont fondés sur la coopération d'agents capables à eux seuls d'effectuer des opérations complexes. Ce type de système s'inspire du comportement humain. Un système cognitif comprend, en général, un petit nombre d'agents disposant d'une capacité de raisonnement sur une base de connaissances, d'une aptitude à traiter des informations diverses liées au domaine d'application et d'autres relatives à la gestion des interactions avec les autres agents et l'environnement [Labidi & *al.*, 93]. Chaque agent est assimilable, suivant le niveau de ses capacités, à un système expert plus ou moins sophistiqué. On parle d'agent de forte granularité "coarse grain".

---

**Définition 2.5 : (Agent Cognitif)**

Les agents cognitifs sont caractérisés par une granularité forte ou moyenne, un modèle de représentation de soi et des autres et une plus grande capacité de raisonnement. De tels agents sont capables de percevoir et d'agir sur leur environnement. Ainsi, ils ont des capacités de cognition leur permettant de raisonner sur les autres et sur la résolution des problèmes [Erceau & *al.*, 91].

---

**2.2.1.2.3 AGENTS HYBRIDES**

Pour surmonter les faiblesses des systèmes réactifs et des systèmes cognitifs, par rapport à la difficulté de mise en œuvre des systèmes cognitifs dans des environnements complexes et le manque de modèles formels dans les systèmes réactifs, plusieurs chercheurs se sont intéressés aux systèmes hybrides. Ils consistent à maintenir une certaine réactivité d'un agent en le dotant de composants réactifs et de rendre les autres composants cognitifs pour garantir un raisonnement de qualité [Chaib-Draa, 96][Aknine, 00].

**Définition 2.6 : (Agent Hybride)**

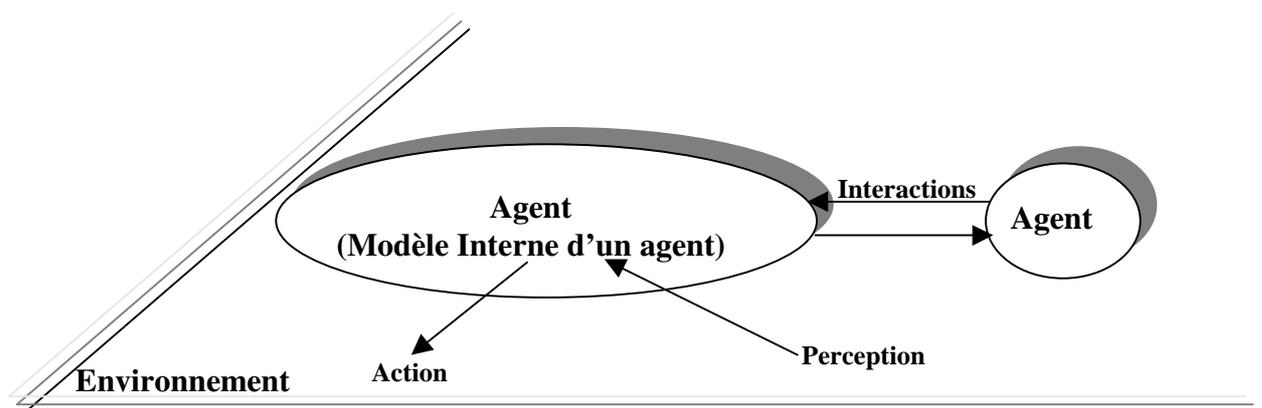
Un agent hybride est un agent combinant les propriétés des agents réactifs et des agents cognitifs.

Les propriétés d'un agent sont structurelles, environnementales et comportementales. Ces propriétés permettent d'expliquer ses façons d'agir. Par exemple dans un réseau de transport urbain, un bus est un agent dont les propriétés structurelles sont la capacité, la vitesse, etc. Ses propriétés comportementales sont le conducteur et le Tableau de Marche, et sa propriété environnementale est sa position sur le réseau de transport urbain.

Pour nous, un SMA est basé surtout sur la communication entre les agents. Cette dernière s'impose dans le but d'échanger des informations pour résoudre les problèmes et d'éventuels conflits. La communication est l'une des propriétés les plus importantes dans un système multi-agent. Grâce à cette propriété, les agents peuvent interagir afin de résoudre d'éventuels problèmes.

**2.2.2 SYSTÈMES MULTI-AGENTS**

Un ensemble d'agents constitue une société d'agents appelée un Système Multi-Agent (SMA) dans le cas où les agents interagissent entre eux pour la résolution collective d'un problème. Comme dans une colonie de fourmis, ce système permet de résoudre des problèmes complexes irréalisables par un seul individu (ou agent). Chaque individu a son propre comportement simple. La collaboration et l'interaction des agents permettent l'émergence d'un comportement global de la colonie (figure 2.3).



**Figure 2.3 : La description d'un Système Multi-Agent (SMA)**

Dans [Ferber, 95], J. Ferber définit un SMA comme suit :

---

**Définition 2.7 : (Système Multi-Agent)**

On appelle Système Multi-Agent (SMA), un système composé des éléments suivants :

- a- Un environnement E, c'est-à-dire un espace disposant généralement d'une métrique.
  - b- Un ensemble d'objets O. Ces objets sont situés, c'est-à-dire que pour tout objet, il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans E. Ces objets sont passifs. Ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents.
  - c- Un ensemble A d'agents, qui sont des objets particuliers ( $A \subseteq O$ ), lesquels représentent les entités actives du système.
  - d- Un ensemble de relations R qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux.
  - e- Un ensemble d'opérateurs  $Op$  permettant aux agents de A de percevoir, de produire, de consommer, de transformer et de manipuler des objets de O.
  - f- Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérateurs et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appelle les lois de l'univers.
- 

Cette définition est générale. Nous citons une autre définition d'un SMA qui nous semble aussi générale mais qui convient particulièrement à notre domaine de recherche.

---

**Définition 2.8 : (Système Multi-Agent)**

Un système multi-agent est un système distribué composé d'un ensemble d'agents qui interagissent par le biais de la communication pour coopérer. Cette coopération est nécessaire pour le respect des décisions des uns et des autres afin de maintenir une stabilité du système.

---

Pour qu'un système soit considéré comme un système multi-agent, il est nécessaire de satisfaire certains critères. D'après [Bensaïd, 99][Chaib-draa & al., 01][Sabas, 01], ces critères sont ceux qui caractérisent en général un système multi-agent :

- Chaque agent a des informations ou des capacités de résolution des problèmes limitées. Chaque agent a donc un point de vue partiel.
- Il n'y a aucun contrôle global du système multi-agent.
- Les données sont décentralisées.
- Le calcul est asynchrone.
- Un SMA dispose d'un ensemble d'agents autonomes fonctionnant en parallèle et cherchant à satisfaire un but. L'autonomie signifie que l'agent opère sans qu'il y ait une intervention directe d'un humain ou des autres agents. Il a le contrôle de ses actions et de son état interne.
- Les agents sont dotés d'un mécanisme d'interaction de haut niveau indépendant du problème à résoudre. Les agents peuvent utiliser un langage de communication agent.
- Un agent perçoit son environnement qui peut être le monde physique.

Les systèmes multi-agents proposent une approche nouvelle pour le développement de systèmes à plusieurs composantes autonomes pouvant coopérer entre elles [Asa].

Un système multi-agent est composé de plusieurs sous-systèmes autonomes appelés agent dont chacun a une activité (un rôle ou un ensemble de rôles) et des informations propres. Le comportement général du SMA est lié à l'activité combinée de l'ensemble de ses agents. La réalisation d'une tâche peut impliquer plusieurs agents (coopération pour la résolution d'un problème). Cette répartition nécessite que chaque agent puisse effectuer localement une tâche (ou un ensemble de sous-tâches) qui lui est assignée. Il faut également qu'il puisse se coordonner avec d'autres agents s'il doit gérer des dépendances entre les sous-tâches ou s'il a besoin de services assurés par d'autres agents. La coopération consiste dans l'entraide entre différents agents afin de réaliser leurs activités. Dans la coopération, un agent doit surveiller et éviter les éventuels conflits avec d'autres agents [Vercouter, 01].

### **2.3 CONCEPTION DES SYSTÈMES MULTI-AGENTS**

Une utilisation très importante des systèmes multi-agents dans divers domaines est constatée. Il devient, donc, nécessaire de développer des méthodologies de conception qui permettent aux entreprises de développer de façon systématique des systèmes opérationnels dans un environnement industriel [Chaib-Draa & al., 01]. C'est le cas pour les systèmes multi-agents. Leur domaine, bien que relativement jeune, a maintenant suffisamment mûri pour que se pose le problème de la programmation efficace de tels systèmes. Ces systèmes sont complexes,

distribués, et les concepts qu'ils manipulent sont de haut niveau d'abstraction (coopération, autonomie, ...). Ceci rend la programmation lourde et difficile avec des outils de programmation classique [Ricordel, 01]. On distingue deux types de programmation dans les systèmes multi-agents : la programmation orientée agents [Ktari, 98] et la programmation orientée multi-agent [Ricordel, 01]. La différence entre les deux est que la première se concentre sur la programmation des agents individuellement alors que la seconde, moins courante, se concentre sur la programmation du système multi-agent dans son ensemble, indépendamment des entités qui le composent.

D'après N.R. Jennings, les SMA sont adéquats pour la conception de systèmes distribués, complexes qui évoluent dans des environnements [Casteran & *al.*, 00]. La conception des systèmes multi-agents est différente de la conception des logiciels classiques. Les deux caractéristiques essentielles des systèmes multi-agents qui les différencient dans la conception par rapport à la conception des logiciels classiques sont la complexité et la prise en compte de la dynamique. Selon J-P. Muller et *al.* [Muller & *al.*, 98] et J.N. Jennings [Jennings, 99], ces différences se traduisent au niveau [Casteran & *al.*, 00] :

- Des interactions qui sont fondamentales et prépondérantes pour les agents. Elles sont complexes et réalisées avec un langage de communication de haut niveau entre agents. La dynamique des systèmes aboutit lors de la conception à l'ignorance du concepteur en ce qui concerne le moment où l'agent va interagir, ainsi que les raisons qui le poussent à interagir, et avec qui.
- De l'environnement qui est le lieu d'inscription et de contraintes du système. De plus en plus les environnements dans lesquels évoluent les systèmes multi-agents sont ouverts et donc fortement dynamiques. Les agents n'ont d'ailleurs généralement qu'une vue partielle du système.

Les inconvénients des modélisations traditionnelles (analytiques, systémiques, objets ...) viennent de leurs incapacités à prendre en considération certains aspects de la réalité de façon naturelle tels que la coopération [Lahlouhi, 01]. Cela justifie, bien, notre choix d'utiliser les systèmes multi-agents pour la modélisation d'un réseau de transport urbain. Car pour la régulation du trafic au niveau des correspondances, nous avons besoin d'une coopération effective entre différents agents qui représentent les nœuds de correspondances afin d'éviter d'éventuels conflits.

### 2.3.1 CONCEPTS

Pour poursuivre notre présentation, nous souhaitons définir des termes souvent employés afin d'éviter des ambiguïtés : approche, méthode, méthodologie et plate-forme. Nous limitons nos définitions au domaine du Génie Logiciel (GL). Les définitions sont les suivantes :

Une approche est définie comme suit, en s'inspirant du dictionnaire [Larousse, 78] et de notre contexte :

---

**Définition 2.9 :(Approche)**

Une approche est la façon d'aborder un sujet, ou un problème donné sans imposer la démarche à suivre.

---

Nous verrons que dans l'approche Voyelles [Demazeau, 95] qui consiste, pour la conception d'un SMA, à faire apparaître quatre composantes (Agents, Environnement, Interactions et Organisation) et laisse au concepteur le choix de commencer par une composante ou une autre sans donner une importance particulière à une composante plus qu'une autre.

La démarche à suivre est surtout proposée à travers une méthode afin de résoudre un problème donné. En général, une méthode est un ensemble de procédés et de moyens pour obtenir des résultats. Elle consiste aussi dans la manière de procéder et la qualité d'esprit à savoir effectuer un travail avec ordre et logique. La propriété qui permet de remarquer la différence entre une méthode et une approche est la réalisation d'un travail suivant un ordre et une logique.

Nous tenons compte de la définition donnée par G.Booch [Casteran & al., 00] dans le domaine du GL. Une méthode est définie comme suit :

---

**Définition 2.10 : (Méthode)**

Une méthode est un processus rigoureux permettant de générer un ensemble de modèles qui décrivent divers aspects d'un logiciel en cours de développement en utilisant une certaine notation bien définie.

---

Nous pouvons citer comme méthode en conception orientée objets la méthode UML [Muller & al., 00].

En général, une méthodologie est un ensemble de méthodes. G.Booch [Casteran & al., 00] donne plus de précisions pour la définition d'une méthodologie en respectant la définition générale d'une méthodologie :

---

**Définition 2.11 : (Méthodologie)**

Une méthodologie est un ensemble de méthodes appliquées tout le long du cycle de développement d'un logiciel. Ces méthodes sont unifiées par une certaine approche philosophique générale.

---

Comme le schématise Calvez, cité dans [Jagueneau, 00], une méthodologie est comme une boîte à outils dans laquelle le concepteur trouve une variété d'outils : modèles, méthodes et solutions pour mener à bien son travail.

Dans la littérature, on trouve l'utilisation des deux termes environnement et plate-forme. Une distinction est à établir entre ces deux termes. Dans la communauté multi-agent, une plate-forme comporte deux types d'environnements : Un environnement de développement et un environnement d'exécution. Actuellement, il n'existe pas vraiment de plate-forme qui propose les deux environnements. De même, il n'existe pas d'environnement de développement standard pour la conception des SMA. Alors, la plupart des plates-formes sont considérées comme des environnements d'exécution. Nous donnons la définition des deux types d'environnements comme suit :

---

**Définition 2.12 : (Environnement de développement)**

Un environnement de développement est un support d'une méthodologie de développement des logiciels.

---

---

**Définition 2.13 : (Environnement d'exécution)**

Un environnement d'exécution est un support de déploiement des logiciels. En SMA, il permet le suivi des interactions des agents ainsi que leurs changements.

---

Dans ce mémoire, nous avons choisi d'utiliser le terme plate-forme sans poser de distinction entre environnement de développement ou d'exécution. La qualité d'une plate-forme se mesure par la méthodologie sur laquelle elle se base et le degré d'automatisation du développement qu'elle offre. Une plate-forme basée sur une méthodologie de développement de SMA est meilleure que celle basée sur une méthodologie traditionnelle.

Au travers de ces définitions, nous voulons établir une distinction pouvant apparaître simple entre approche, méthode, méthodologie et plate-forme afin d'éviter toute confusion.

### 2.3.2 APPROCHES

Plusieurs travaux de recherche se sont concentrés, ces dernières années, sur l'approche de modélisation et de conception d'un SMA. Il existe différentes approches. Parmi ces approches, nous citons l'approche AALAADIN [Gutknecht & al., 98][Gutknecht & al., 00] et l'approche Voyelles [Demazeau, 95].

### 2.3.2.1 APPROCHE AALAADIN

L'approche AALAADIN est basée sur le modèle agent-groupe-rôle (figure 2.4). Ce modèle permet d'exprimer et d'analyser divers systèmes multi-agents en utilisant avant tout des concepts organisationnels.

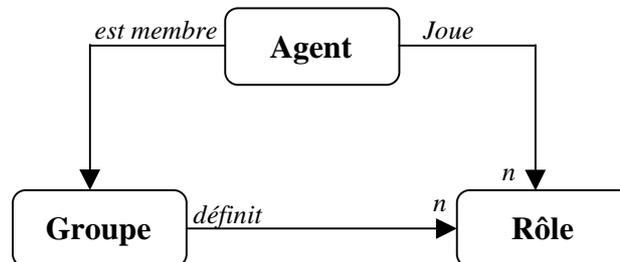


Figure 2.4 : Le modèle organisationnel d'AALAADIN [Gutknecht & al., 98]

AALAADIN situe l'analyse des systèmes multi-agents à deux niveaux [Gutknecht & al., 98] :

- Le niveau descriptif correspond aux concepts primaires d'agent, de groupe et de rôle. C'est à ce niveau que se décrit une organisation multi-agent effective.
- Le niveau méthodologique définit l'ensemble des rôles possibles, spécifie les interactions et décrit les structures abstraites de groupe et d'organisation.

#### 2.3.2.1.1 AGENT

Quasiment aucune contrainte n'est posée sur l'architecture interne de l'agent. L'agent est simplement décrit comme une entité autonome communicante jouant des rôles au sein de différents groupes. Dans l'approche AALAADIN, on laisse la liberté au concepteur du choix de l'architecture interne de l'agent appropriée à son domaine d'application.

#### 2.3.2.1.2 GROUPE

La notion de groupe représente le regroupement d'un ensemble d'agents. Chaque agent peut être membre d'un ou plusieurs groupes. Dans sa forme la plus simple, un groupe peut être vu comme un moyen d'identifier par regroupement un ensemble d'agents. D'une manière plus élaborée, le groupe peut être vu comme un système multi-agent usuel. Un point majeur de cette définition est que les différents groupes peuvent se séparer librement.

### 2.3.2.1.3 RÔLE

Le rôle est une représentation abstraite d'une fonction, d'un service ou de l'identification d'un agent au sein d'un groupe particulier. Chaque agent peut avoir plusieurs rôles. Un même rôle peut être tenu par plusieurs agents. De plus, les rôles sont locaux aux groupes.

A chaque rôle est associé une fonction de rôle qui définit les contraintes que doit respecter l'agent "réel" pour pouvoir jouer le rôle en question.

La maîtrise de l'hétérogénéité des situations d'interaction est rendue possible par le fait qu'un agent peut avoir plusieurs rôles distincts au sein de plusieurs groupes, chaque politique de communication étant locale à un groupe.

### 2.3.2.2 APPROCHE VOYELLES

D'après la définition d'un SMA donnée par J. Ferber (définition 2.7), un SMA est constitué d'un ensemble  $\{A, O, E\}$  [Kabachi, 99] où **A** est un ensemble d'agents, **O** est un ensemble d'objets, et avec  $\{A, O\}$  étant émergents dans un environnement **E**.

Pour nous, un SMA est constitué d'un ensemble d'**agents**. Ces agents évoluent dans un même **environnement**. Cet environnement est défini par ce qui est extérieur à l'ensemble des agents. Les agents interagissent et communiquent entre eux pour résoudre un problème ou pour réaliser une tâche selon un ensemble d'**interactions**. L'ensemble des interactions nécessite une **organisation** selon laquelle les interactions sont gérées.

Y. Demazeau est le premier à introduire les deux composantes Interaction et Organisation dans [Demazeau, 95]. Ainsi, il définit un SMA comme étant constitué des quatre composantes  $\{A, E, I, O\}$ .

$$[SMA = Agents + Environnement + Interactions + Organisations]$$

La décomposition d'un SMA selon l'équation ci-dessus en quatre composantes (AEIO) est nommée l'approche Voyelles (Vowels) [Demazeau, 95].

Pour la conception d'un SMA, il faut définir les quatre composantes suivantes :

- Un ensemble d'agents **A**.
- Un environnement **E**.
- Un ensemble d'interactions **I** :
  - Les interactions entre un agent et l'environnement.

- Les interactions entre un agent et les autres agents (accointances).
- Une organisation **O**.

Y. Demazeau modélise explicitement l'environnement et définit les liens entre les quatre composantes (Agent, Environnement, Interaction et Organisation). Il propose trois types de regroupement de ces quatre composantes [Balbo, 00] :

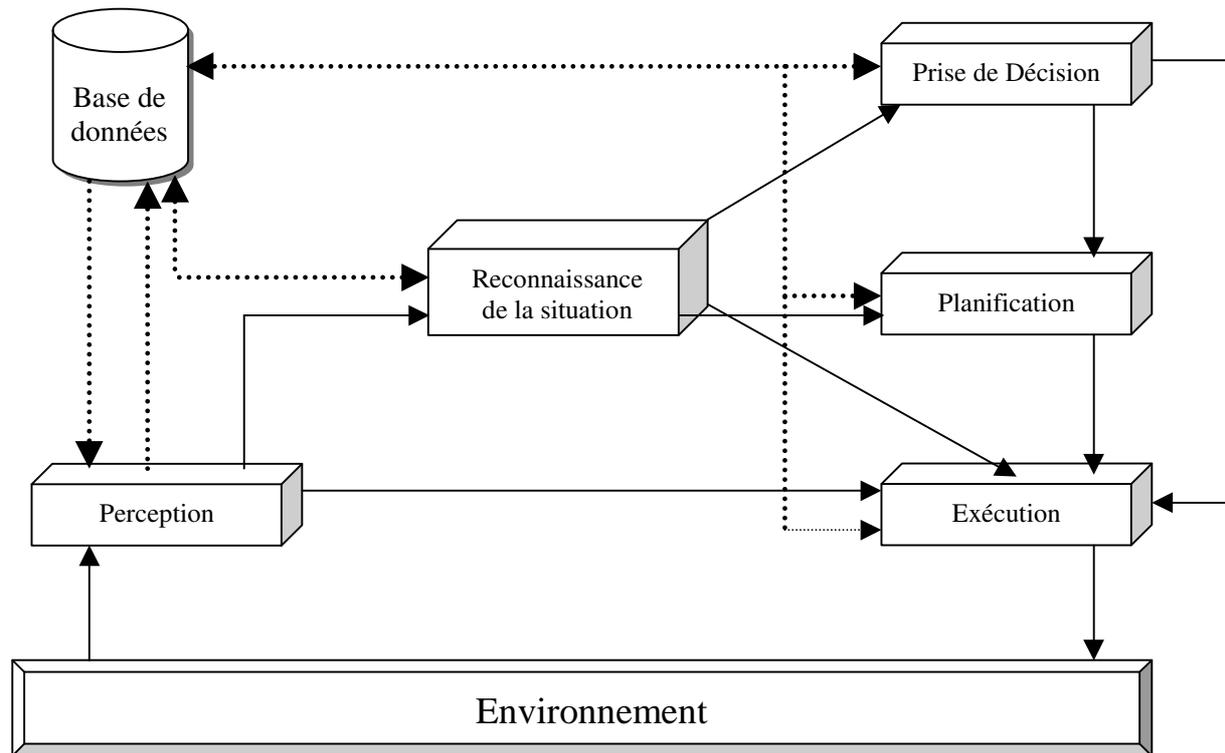
- Le regroupement  $((\mathbf{A}+\mathbf{I})+\mathbf{O})+\mathbf{E}$ , qui représente une approche de type sciences sociales, où la population d'agents en interaction l'emporte sur les aspects organisationnels et encore plus sur les aspects environnementaux.
- Le regroupement  $((\mathbf{A}+\mathbf{E})+\mathbf{I})+\mathbf{O}$ , qui représente une approche de type sciences de la nature et de la vie ainsi que la robotique où l'accent est mis sur les agents et leur interaction avec l'environnement, avant de considérer les interactions et les organisations entre agents.
- Le regroupement  $((\mathbf{O}+\mathbf{I})+\mathbf{A})+\mathbf{E}$ , qui représente une approche naissante dans le domaine des systèmes multi-agents (approche systémique) de la modélisation des entreprises [Galland, 01].

### 2.3.2.2.1 COMPOSANTE AGENT

La composante agent représente l'ensemble des fonctionnalités de l'agent. Elle consiste à décrire l'architecture interne d'un agent : son raisonnement, ses compétences, ses connaissances, ses buts, etc.

Un agent se caractérise essentiellement par la manière dont il est conçu et par ses actions, en d'autres termes par son architecture et par son comportement [Ferber, 95]. L'architecture d'un agent caractérise sa structure interne, c'est-à-dire l'agencement de ses différentes composantes. Par contre, le comportement d'un agent est réalisable sans connaître les détails d'implémentation. Enfin, on peut signaler qu'il n'existe pas de méthodes ou de techniques à utiliser pour définir les agents.

Dans [Chaib-Draa,96], B. Chaib-Draa donne l'architecture interne d'un agent, d'une façon générale, comme la figure 2.5 la présente.



**Figure 2.5 : L'architecture interne d'un agent [Chaib-Draa, 96]**

Lorsqu'un agent perçoit une situation dans l'environnement, il essaie de la reconnaître. Si la situation lui est familière, il peut enclencher un processus de planification afin de résoudre le problème. Il peut aussi reconnaître la situation en terme d'action et donc, passer à l'exécution de la tâche (Reconnaissance - Exécution). Lorsque l'agent perçoit des situations qu'il connaît très bien, il peut faire intervenir son comportement réactif en passant directement à l'action (Perception - Exécution). S'il ne peut pas résoudre un problème (situation non-familière), il engage un processus de coopération pour demander de l'aide aux autres agents (Reconnaissance - Prise de décision).

### 2.3.2.2.2 COMPOSANTE ENVIRONNEMENT

L'environnement représente le monde dans lequel les agents évoluent ou se situent [Pesty & al., 97]. Ce peut être l'environnement géographique, social, informatique, transport urbain, etc. Selon le domaine d'application, un agent évolue de façon autonome dans un environnement dans lequel d'autres agents existent. Cet environnement est une entité structurale qui peut être due à des processus dynamiques [Guessoum, 96].

D'après J. Ferber [Ferber, 95], les agents n'ont qu'une représentation partielle de leur environnement, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas de vision globale de tout ce qui se passe. Il

affirme également que l'environnement d'un agent est caractérisé par tout ce qui n'est pas lui ; Ce qui englobe les autres agents. Un environnement contient l'ensemble des objets (concrets ou abstraits) utilisés par les agents. L'environnement pour un agent dans ce cas consiste à définir les objets qu'il utilise et non pas les autres agents. Il peut être partiellement inconnu voire hostile.

Les fonctions principales des agents, dans un environnement, sont : percevoir, décider et agir. [Labidi & al., 93]. Parmi les sous-fonctions importantes d'un agent, nous citons : la détection de conflits et la coopération (négociation, coordination). Cette composante est peu étudiée par les chercheurs pour le moment.

### 2.3.2.2.3 COMPOSANTE INTERACTION

Les interactions concernent les infrastructures, les langages et les protocoles d'interaction entre agents [Ricordel, 01]. Nous définissons l'interaction comme suit :

---

**Définition 2.14: (Interaction)**

Une interaction est l'enchaînement d'échanges d'informations ou d'influence ayant lieu entre des agents [Foisel, 98].

---

Dans [Ferber, 95], une interaction est une mise en relation dynamique de deux ou plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques. Mais, la définition de R. Foisel est la plus proche de notre point de vue sur les interactions. Car elle visualise et signale le fait du besoin d'échange mutuel d'informations entre les agents pour une meilleure coopération.

Nous retenons la définition suivante de J. Ferber sur une situation d'interaction [Ferber, 95] :

---

**Définition 2.15: (Situation d'interaction)**

On appelle situation d'interaction un ensemble de comportements résultant du regroupement d'agents qui doivent agir pour satisfaire leurs objectifs en tenant compte des contraintes provenant des ressources plus au moins limitées dont ils disposent et de leurs compétences individuelles.

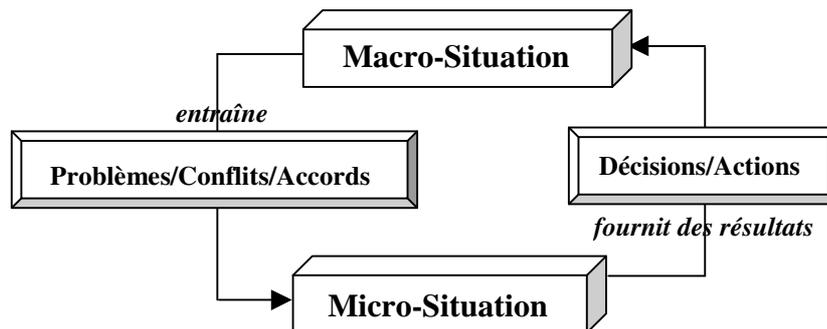
---

Les principales situations d'interaction peuvent être classées par rapport à trois critères : les objectifs ou intentions des agents, les relations que les agents entretiennent envers les ressources qu'ils possèdent ainsi que les moyens (ou compétences) dont ils disposent pour parvenir à leurs fins.

Il y a deux éléments qualitatifs qui caractérisent les interactions entre agents [Sabas, 01]:

- Les interactions se produisent à un niveau élevé par un langage de communication, en fonction du temps, de l'objectif à atteindre et de la nature des agents;
- Les agents flexibles sont destinés à la résolution des problèmes dans un environnement sur lequel ils ont uniquement un contrôle partiel. Alors, les interactions doivent également être flexibles.

On peut distinguer, selon J. Ferber, des macro-situations d'interaction qui sont caractéristiques d'une analyse globale de l'activité d'un ensemble d'agents, et les micro-situations d'interaction qui se situent à un niveau de détail plus fin (figure 2.6).



**Figure 2.6 : Le processus d'interaction au niveau macro-situation et micro-situation [Ferber, 95]**

Les actions des agents qui se situent au niveau micro d'un système multi-agent produisent des relations qui peuvent engendrer des contraintes au niveau macro. Par exemple, une décision prise au niveau micro (local) peut engendrer des conflits au niveau macro (global).

Les agents interagissent entre eux afin de coopérer. C'est la raison pour laquelle une situation d'interaction consiste à éviter les conflits entre les agents. Ce type d'interaction est appelé plus généralement "coopération". Cette dernière est un élément essentiel au sein d'une société d'agents. Un amalgame découle, souvent, entre les concepts de coopération, de communication, de négociation, de coordination et d'organisation. Dans [Khadim, 96], on considère la coopération comme l'acte relationnel établi entre deux ou plusieurs agents en vue d'accomplir une action. Cet acte peut se réaliser concrètement par échange de messages. Dans le cadre de nos recherches, la coopération est l'entente d'au moins deux agents entre eux pour accomplir des tâches (satisfaire des buts), pour résoudre des conflits ou un problème (influence d'une décision prise par un agent sur un autre agent ou sur un groupe d'agents) perturbant le bon fonctionnement dans une société d'agents (système multi-agent). Cette coopération peut être réalisée par la communication (échange de messages). La coopération est considérée ainsi comme une interaction positive.

La communication, la négociation, la coordination et l'organisation sont des moyens pour la réalisation de la coopération [Khadim, 96].

Dans [Labidi & *al.*, 93], il existe deux types d'interaction avec communication : communication par envoi de messages et communication par partage d'informations.

- a- **Communication par envoi de message** : Les agents sont en liaison directe et envoient leurs messages directement et explicitement aux destinataires. La seule contrainte est la connaissance de l'agent destinataire.
- b- **Communication par partage d'informations** : Les agents ne sont pas en liaison directe mais communiquent via une structure de données (base de données) partagée. Cette source de données peut évoluer durant le processus d'exécution. L'exemple parfait d'utilisation de ce mode communication est l'architecture du Tableau Noir.

Une communication peut correspondre à une information, une requête ou une interrogation ; elle doit avoir une sémantique reconnue par l'agent récepteur [Labidi & *al.*, 93]. Pour réaliser les interactions, un langage de communication est nécessaire à travers lequel les agents arrivent à échanger des messages.

### **LANGAGE DE COMMUNICATION :**

Un langage de communication est basé sur la théorie des actes de langage. Cette théorie a été introduite par le philosophe J-L. Austin [Austin, 62]. Elle constitue un fondement théorique de la communication basé sur la constatation suivante : en parlant, on effectue des actes. Cela paraît clairement dans le cas des verbes appelés **performatifs** (comme promettre, ordonner, demander, etc.) où l'acte est effectué par l'énoncé même. Mais, on peut la généraliser aux autres verbes appelés **constatifs** (par exemple : *il pleut* devient *je déclare qu'il pleut*). J-L. Austin distingue trois types d'actes dans un énoncé [Labidi & *al.*, 93] :

- Actes locutoires : activité mentale et physique de formulation et d'articulation de l'énoncé. L'acte réussit si l'énoncé est formulé et articulé correctement.
- Actes illocutoires : actes effectués par l'interlocuteur lors de la formulation de l'énoncé. En énonçant : *il est dix heures?* On peut comprendre s'il s'agit d'une affirmation ou d'une interrogation. Si on arrive à comprendre qu'il s'agit bien d'une phrase interrogative, alors l'acte illocutoire est réussi.
- Actes perlocutoires : c'est la conséquence indirecte mais pouvant être intentionnelle des actes locutoires et illocutoires sur l'auditeur. Ces actes dépendent du contexte, et contrairement aux actes illocutoires, ils ne sont pas codés dans l'énoncé. Par exemple à l'énoncé *il fait froid* est associé l'acte perlocutoire de mise en marche du chauffage.

Un acte de langage met en relation deux agents [Lahlouhi, 01] :

- L'émetteur de l'acte qui doit savoir comment le générer et l'émettre.
- Le récepteur de l'acte qui doit savoir comment le recevoir et l'interpréter.

Un langage de communication permet aux agents de représenter ses connaissances et de communiquer entre eux. Le langage KQML est considéré comme l'un des langages évolués et représentatif de ce qui se fait actuellement.

### **PROTOCOLE KQML :**

Le protocole KQML est un langage permettant la communication entre agents. Il est considéré comme étant un langage à trois couches : contenu, message et communication [Ktari, 98]. La couche contenu contient le message et écrit dans le langage de programmation voulu. La couche message est utilisée afin d'encoder un message qu'une application veut transmettre à une autre. Cette couche est le point central du langage KQML. Elle détermine les types d'interactions qu'un agent peut avoir avec un autre agent qui utilise ce langage. Un rôle important de cette couche est d'identifier le protocole qui sera utilisé pour la transmission du message et de fournir les actes de langage que l'expéditeur attache au contenu. Cette couche contient aussi les attributs optionnels pour décrire : le langage utilisé à la couche contenu, l'ontologie et la description du contenu. Enfin, la couche communication contient l'identité de l'émetteur, du récepteur et un identificateur unique associé à la communication.

KQML peut être utilisé en tant que langage d'interaction entre deux ou plusieurs agents dans le but d'une coopération pour la résolution de problème. Au sein de KQML, on retrouve un ensemble extensible de performatifs définissant les actes du langage. Les performatifs peuvent être accompagnés de paramètres qui composent le contenu du message devant être transmis. Les paramètres sont opérationnels, leur utilisation dépend du performatif employé.

Les interactions déterminent un contexte organisationnel qui définit la nature des rapports entre agents et qui influence le comportement individuel des agents. Il est donc important de représenter explicitement ces rapports qui sont sujets à un changement continu [Sabas, 01].

#### **2.3.2.2.4 COMPOSANTE ORGANISATION**

L'organisation évoque l'idée de groupe et de structuration du groupe, c'est-à-dire le rôle et la position relative de chacun des membres du groupe.

L'organisation d'un SMA est la manière dont le groupe d'agents est constitué, à un instant donné, pour pouvoir fonctionner. Cette organisation peut être statique ou dynamique. Un

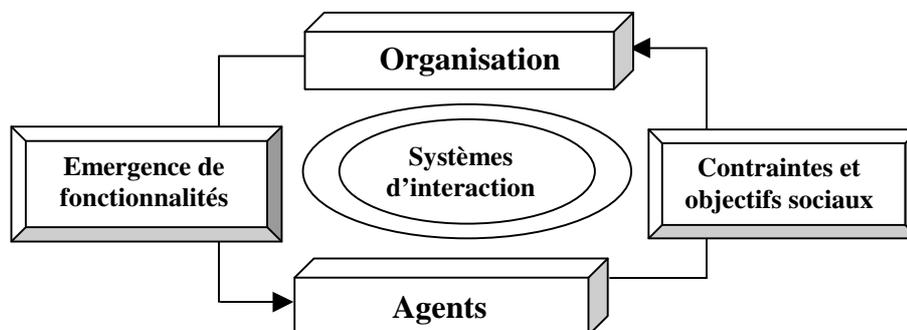
groupe d'agents peut être dynamique en se réorganisant à chaque fois en fonction du rôle (ou de la tâche) à accomplir. Donc, les organisations structurent les agents en groupes, hiérarchies, relations, etc.

En sociologie des organisations, G.Gurvitch, cité dans [Ferber, 95], donne, en 1963, une classification. Il distingue trois niveaux d'organisation :

1. **Niveau micro-social** : il étudie les interactions entre les agents et les différentes formes qui existent entre deux ou un petit nombre d'agents.
2. **Niveau des groupes** : il étudie les structures intermédiaires qui interviennent dans la composition d'une organisation plus complète. On différencie les rôles et les activités des agents.
3. **Niveau des sociétés globales** : on s'intéresse surtout à la dynamique d'un grand nombre d'agents, ainsi qu'à la structure générale d'un système (SMA) et son évolution.

Les recherches situées dans le cadre de la vie artificielle sont, souvent, menées dans le dernier niveau (sociétés globales).

Les interactions sont les éléments nécessaires à la constitution d'organisations [Ferber, 95]. Toute organisation est le résultat d'une interaction entre agents. Le comportement des agents est contraint par l'ensemble des structures organisatrices (figure 2.7).



**Figure 2.7 : La relation entre Agent, Organisation et Interaction [Ferber, 95]**

Gasser [Labidi & al., 93] définit un SMA comme étant constitué de trois éléments : un ensemble d'agents, un ensemble de tâches à réaliser et un ensemble d'objets associés à l'environnement. Un agent peut prendre la responsabilité d'effectuer une tâche s'il en a la capacité. Il prend alors un rôle dans le groupe d'agents. En SMA, l'organisation désigne la communauté des agents et la façon dont ils travaillent pour la résolution d'un problème. L'organisation peut être comprise de deux manières différentes. En tant que processus de résolution, elle fait intervenir des techniques de décomposition et de répartition des sous-tâches. Et du point de vue social, elle désigne le statut des agents et leur structure

relationnelle. Elle apparaît donc comme un élément décisif d'efficacité, car en plus de la stratégie de résolution qu'elle détermine, elle permet d'identifier les acteurs qui interviendront dans la résolution et leur mode de communication.

Dans [Ferber, 95], selon Delattre, une organisation est définie par la double donnée suivante :

1. Un ensemble de classes d'agents caractérisées par les rôles affectés aux agents.
2. L'ensemble de relations abstraites existant entre les rôles (Interactions).

L'intérêt de la notion d'organisation est de pouvoir intégrer à la fois la notion d'agent et celle de SMA. En effet, du point de vue du concepteur, un agent est non seulement un individu, mais aussi un assemblage de composants. De même, un SMA peut être considéré à la fois comme une composition d'agents et comme une unité [Le Strugeon, 95][Mandiau, 00].

Les structures organisationnelles utilisées dans les systèmes multi-agents s'inspirent des modèles d'organisation décrits par les sciences de l'organisation et les sciences humaines en général. Il existe deux grandes classes d'organisation selon le mode de contrôle utilisé. Il y a des organisations horizontales et des organisations verticales. Les organisations horizontales sont caractérisées par un contrôle réparti du système : tous les agents ont le même poids et participent à la prise de décision. Par contre, les organisations verticales sont des organisations structurées en niveaux (hiérarchisation). Ils sont donc des organisations hiérarchiques. La hiérarchisation des agents permet dans ce cas de mieux les coordonner. Cette organisation correspond également à la décomposition d'un problème en niveaux d'abstraction [Khadim, 96].

L'idéal, pour un concepteur d'un SMA, est de posséder une méthodologie qui permet le respect de l'approche Voyelles. Mais malheureusement, elle n'existe pas. Dans la conception d'un SMA, il faut, toutefois, cerner les quatre composantes de Voyelles sur toutes les facettes. Comme dans la conception des logiciels orientés objets, il faut déterminer un processus de développement d'un SMA.

### **2.3.2.3 DISCUSSION**

L'approche AALAADIN est basée sur les concepts de rôle, groupe et agent. La conception d'un SMA est focalisée sur la définition de ces trois composantes. Ainsi toute autre composante d'un SMA est laissée au choix du concepteur. L'approche Voyelles est utilisée dans nos recherches car elle nous semble proche de notre propre raisonnement dans la conception d'un SMA afin de représenter un réseau de transport urbain vu par les correspondances. Dans l'approche Voyelles, on distingue quatre composantes : Agent, Environnement, Interaction et Organisation pour analyser, concevoir et décrire un SMA [Demazeau, 95]. Dans cette approche, il est possible de mettre en avant n'importe laquelle des quatre composantes. Par

contre l'approche AALAADIN impose l'aspect organisationnel pour la conception d'un SMA. Un autre intérêt de l'approche Voyelles est sa vision générale des SMA. En effet, elle permet de considérer la conception d'un SMA selon la composante qui semble la plus intéressante sans toutefois en privilégier une particulièrement [Galland, 01]. C'est notre cas en ce qui concerne la conception d'un SMA pour la régulation des correspondances. Surtout, nous voyons par la suite que nous sommes partis de la composante Organisation pour proposer un SMA décrivant les agents dans un réseau de transport urbain sans toutefois délaissier les autres composantes.

### 2.3.3 PROCESSUS DE DÉVELOPPEMENT D'UN SMA

Malgré la diversité des domaines d'applications des systèmes multi-agents, des progrès restent à réaliser dans les systèmes multi-agents notamment dans le domaine des méthodologies de conception. Actuellement, peu d'outils sont disponibles permettant de construire efficacement des SMA.

Pour la conception d'un SMA, dans un domaine donné, le concepteur est confronté à un véritable problème : celui du choix d'une méthodologie de conception d'un SMA et d'une plate-forme adéquate pour la réalisation de son SMA.

Plusieurs méthodologies sont proposées pour le développement des SMA. Il apparaît donc évident que le développement des SMA reste encore un domaine ouvert. Actuellement, différents travaux de recherche sont entamés pour l'unification des méthodologies de conception des SMA [Sabas & *al.*, 02] comme pour les travaux réalisés dans la Programmation Orientée Objet (POO). En POO, au départ, plusieurs méthodes ont été proposées comme **OMT** (proposée par J. Rumbaugh : vues statiques, dynamiques et fonctionnelles d'un système), **OOD** (proposée par G. Booch : vues logiques et physiques du système), et **OOSE** (proposée par I. Jacobson : couvre tout le cycle de développement). L'unification et la normalisation de ces méthodes (entre 1995 et 1997) ont donné naissance à une méthode nommée **UML** (Unified Modeling Language) qui est la fusion et la synthèse des méthodes dominantes [Muller & *al.*, 00].

Pour concevoir un logiciel orienté objets, en génie logiciel, on retrouve différentes phases (ou étapes) entre la spécification et l'exécution d'une application. Respectivement, ces phases sont l'analyse, la conception, le développement et la maintenance [Booch, 92]. Mais pour la conception d'un SMA, Y. Demazeau [Demazeau, 00] et P.M. Ricordel [Ricordel, 01] donnent à la phase de maintenance le nom de la phase de déploiement. En conception orientée objets, la phase de maintenance consiste à corriger d'éventuelles erreurs et aussi d'ajouter des fonctionnalités demandées par l'utilisateur. Par contre, la phase de déploiement est nécessaire pour la conception des SMA ; car la population d'agents est susceptible d'évoluer au cours de l'exécution.

Comme en POO, le processus de développement proposé des SMA est constitué des quatre phases suivantes (figure 2.8) :

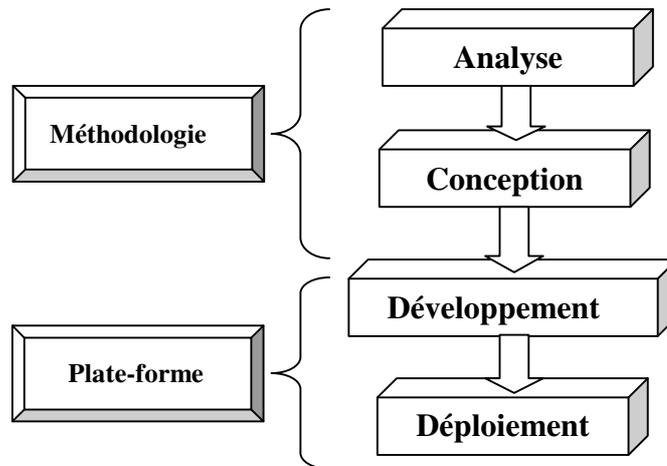


Figure 2.8 : Les différentes phases de conception d'une application SMA

1. **Phase d'analyse :** Cette phase consiste à déterminer, séparer et décrire le type de problème et de domaine environnant. En pratique, il s'agit d'identifier le domaine d'application et le cœur du problème à résoudre. Pour les SMA [Lahlouhi, 01], on réalise l'étude de l'organisation des rôles des agents et les méthodes de leur gestion pour atteindre des objectifs.
2. **Phase de conception :** Elle consiste à définir la solution au problème de manière déclarative. En pratique, il s'agit de spécifier un principe de solution, par exemple, en utilisant UML. En SMA, la conception traite l'affinement de l'organisation indépendamment de ses objectifs.
3. **Phase de développement :** Dans cette phase, il s'agit de la construction fonctionnelle du problème (la réalisation de la solution déterminée à la phase conception). En pratique, il s'agit de coder la solution dans un langage de programmation qui peut être général, et plus particulièrement orienté multi-agent. Dans cette phase, on effectue une réalisation effective des éléments de la conception.
4. **Phase de déploiement :** Cette dernière phase consiste en l'application de la solution au problème réel. En pratique, il s'agit d'exécuter le logiciel et de maintenir (modifier ou remplacer des agents) ou d'étendre ses fonctionnalités. Cette phase est primordiale pour un SMA vu la dynamique des agents au moment de l'exécution.

La plupart des méthodologies existantes sont concentrées sur les deux phases : analyse et conception. Généralement, une méthodologie est basée sur les deux premières phases et une

plate-forme basée sur les deux phases développement et déploiement malgré l'existence de plates-formes proposant l'automatisation des phases d'analyse et de conception. Certes, celles-ci restent, en général, incomplètes.

L'objectif d'une méthodologie orientée multi-agent est de guider l'utilisateur tout au long du processus de la conception. La tâche s'annonce difficile pour un concepteur d'un SMA car il n'existe pas de méthodologie standard de conception (ou de développement) multi-agent. Nous illustrerons ensuite, deux méthodologies existantes, à savoir GAÏA [Wooldridge & *al.*, 00] et MaSE [Delaoch & *al.*, 00].

### 2.3.3.1 MÉTHODOLOGIES DE CONCEPTION DES SMA

Il existe différentes méthodologies de conception des SMA. Ces méthodologies sont classées en quatre catégories [Lahlouhi, 01][Sabas, 01] :

- Celles développées pour la conception de systèmes particuliers. Celles-ci n'ont pas atteint un niveau suffisamment général pour qu'elles soient utilisées dans la conception d'un SMA concernant des systèmes différents de ceux pour lesquels elles sont destinées.
- Celles qui sont générales mais spécifiques aux SMA. Celles-ci sont très rares et ne sont, jusqu'à maintenant, qu'à l'état "artisanal".
- Celles qui sont des extensions de méthodologies orientées objets.
- Celles qui sont des extensions de méthodologies de développement de systèmes à base de connaissances.

Dans ce mémoire, nous explicitons les méthodologies à extension des méthodologies orientées objets telles que GAÏA [Wooldridge & *al.*, 00] et MaSE [Delaoch & *al.*, 00]. Car, l'utilisation des méthodologies à extension objet laisse apparaître des approches entre l'objet et agent qui sont [Sabas, 01]:

- Un agent peut être considéré comme un objet actif ayant un état mental, un objectif et une autonomie.
- Les deux paradigmes objet et agent utilisent l'envoi de messages pour la communication. Ils peuvent utiliser l'héritage et l'agrégation pour définir leurs architectures.

- Les méthodologies orientées objets sont populaires, en ce sens que plusieurs d'entre elles ont été utilisées avec succès dans l'industrie. L'expérience et le succès liés à cette utilisation peuvent faciliter l'intégration de la technologie agent.
- Les modèles objet, dynamique et fonctionnel de ce paradigme peuvent être utilisés pour décrire les agents.
- Les cas d'utilisation et les diagrammes de collaboration peuvent être utilisés dans l'identification des agents.

Les méthodologies orientées objets telles quelles ne fournissent pas de techniques adéquates pour caractériser certains aspects spécifiques aux agents, comme leur état mental, le type des messages, le protocole de négociation, leur dimension sociale.

Pour éviter de concevoir des méthodologies totalement spécifiques, les chercheurs ont repris et étendu des méthodologies orientées objets existantes pour le développement de logiciels. Mais, les méthodologies orientées objets ne sont pas directement applicables au développement des systèmes multi-agents vu les différences entre les deux concepts : objets et agents. Nous présentons une brève description des deux méthodologies basées sur l'objet, à savoir GAIA et MaSE.

#### 2.3.3.1.1 MÉTHODOLOGIE GAIA

GAIA est le nom donné aux hypothèses formulées par l'écologiste J. Lovelace selon lesquelles les organismes vivants du monde peuvent être considérés comme des composantes d'une seule entité [Wooldridge & al., 00]. Ces composantes régularisent l'environnement. Les systèmes auxquels on peut appliquer cette méthodologie contiennent un petit nombre d'agents (moins de 100). Les auteurs de GAIA considèrent un SMA comme une société ou une organisation artificielle ou encore un ensemble institutionnalisé de rôles. Cette idée vient du fait que dans une compagnie, il y a un poste de président, un poste de vice-président, etc. L'instanciation de ces postes est en fonction des individus présents. L'instanciation peut-être dynamique.

GAIA se compose de deux phases principales (figure 2.9) :

- La phase d'analyse qui produit deux modèles : le modèle de rôles et le modèle d'interactions. En premier, GAIA [Casteran & al., 00] propose d'identifier les rôles, à partir de trois attributs que sont les permissions (ressources), les responsabilités (buts) et les protocoles. Ces derniers servent à définir le modèle d'interaction entre les rôles.

- La phase de conception qui transforme les modèles abstraits de la phase d'analyse en modèles plus concrets. Le processus de conception se base sur les trois modèles : modèle d'agents, modèle de services et modèle d'acointances. Le modèle d'agent donne les types d'agents et les instances qui sont organisés dans une arborescence de types d'agents. Le modèle de services représente les fonctions des agents. Le modèle d'acointances définit les liens de communication entre les agents [Casteran & *al.*, 00].

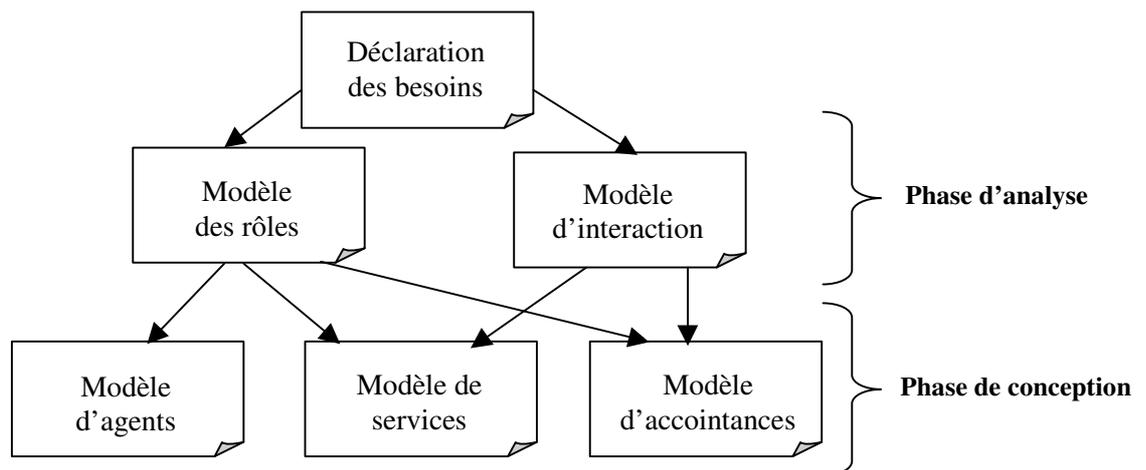


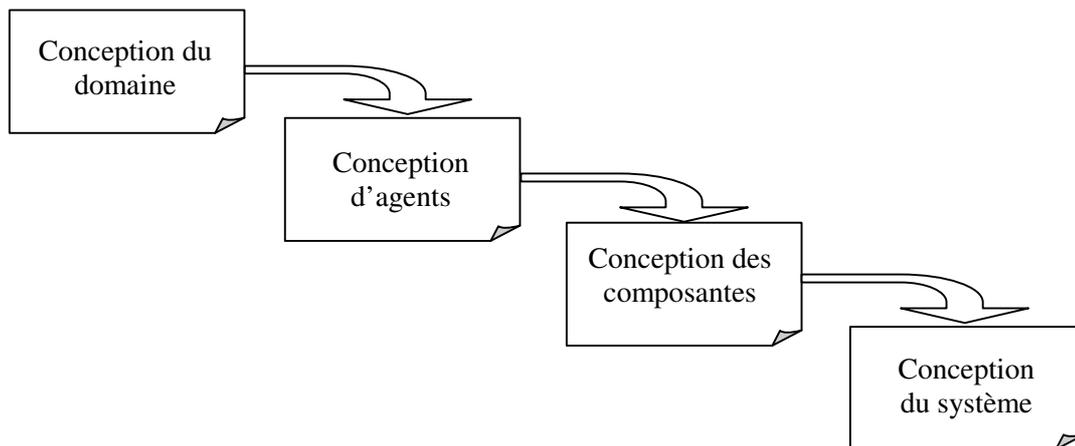
Figure 2.9 : Les rapports entre les différents modèles de GAÏA [Wooldridge & *al.*, 00]

GAÏA consiste à étudier plus particulièrement les phases d'analyse et de conception. Ainsi, elle ne propose pas de plate-forme particulière pour l'implémentation. Elle laisse ainsi le choix au concepteur. La méthodologie GAÏA est de ce fait claire et simple à appliquer. Celle-ci respecte bien l'approche Voyelles, du moment que les quatre composantes d'un SMA sont bien déterminées.

### 2.3.3.1.2 MÉTHODOLOGIE MASE

Les auteurs de cette méthodologie [Delaoch & *al.*, 00] définissent un agent comme un objet actif ayant un objectif et un langage de communication. Cette méthodologie utilise les techniques d'OMT ou d'UML avec des caractéristiques supplémentaires et quelques modifications de la sémantique du paradigme objet pour pouvoir capter les concepts d'agent et les comportements coopératifs des agents.

Les différentes phases de MaSE (figure 2.10) sont : la conception du domaine, la conception des agents, la conception des composantes et enfin la conception du système.



**Figure 2.10 : Les différentes phases de MaSE [Delaoch & al., 00]**

Cette méthodologie se base sur la définition des objectifs. La phase d'analyse consiste à définir l'objectif principal du système à concevoir, à déterminer ensuite les sous objectifs et ainsi de suite, jusqu'à l'obtention des objectifs élémentaires. Enfin, une hiérarchie des objectifs du système est proposée. Cette première phase de MaSE n'est pas aisée à appliquer. Les rôles [Casteran & al., 00] sont déterminés le plus souvent en bijection avec les objectifs. Des tâches sont ensuite créées pour accomplir ces rôles. Cette étape sert à déterminer les séquences de messages entre des rôles d'agents à partir de séquences de diagrammes. Dans la phase de conception, à partir des rôles obtenus à la phase d'analyse, des communications et des interactions entre ces rôles, les classes d'agents sont identifiées. Cela aboutit à une composition des classes d'agents en rôles et conversations.

### 2.3.3.1.3 DISCUSSION

Des recherches sont actuellement menées par A. Sabas et al. [Sabas & al., 01][Sabas & al., 02], pour tenter d'unifier des méthodologies de développement des SMA. Leur étude d'unification compare des méthodologies différentes mais elle essaie de garder les côtés positifs de chacune d'elles afin d'obtenir une méthodologie standard. Cette dernière doit être générale et simple à utiliser, c'est-à-dire sans ambiguïté. Elle consiste à comparer les différentes méthodologies de conception des SMA selon six dimensions. Elle utilise quatre dimensions proposées par D. Pascot et al. afin de comparer des méthodologies pour la conception des systèmes à base de connaissances. Ces quatre dimensions sont : la méthodologie, la représentation, l'organisation et la technologie [Pascot & al., 93]. Une cinquième dimension est ajoutée aux quatre dimensions dans E. Adam [Adam, 00] pour la comparaison des méthodologies de génie logiciel utiles au développement de systèmes interactifs. Celle-ci est la coopération [Adam & al., 99][Adam, 00]. Et enfin, A. Sabas et al. ajoutent une sixième dimension agent afin de comparer des méthodologies de conception des SMA. Dans cette étude, ils ont recensé neuf méthodologies parmi celles-ci : GAÏA et Multiagent Systems Engineering (MaSE) (méthodologies basées sur l'objet). D'après la

comparaison réalisée, l'avantage des méthodologies à extension objet (GAÏA, MaSE ...) est que l'expérience et le succès liés à l'utilisation de ces méthodologies peuvent faciliter l'intégration de la technologie agent. Ainsi, elles ont une meilleure appréhension de la phase d'analyse que les méthodologies d'extensions des systèmes à base de connaissances. Ces dernières fournissent des modèles complexes qui prennent mieux en compte l'état interne des agents par rapport aux méthodologies à extension objet. Aucune des méthodologies étudiées n'a fourni de modèles recouvrant totalement la globalité des concepts des SMA. Ces études d'unification sont très importantes pour l'utilisation des SMA.

### 2.3.3.2 Plates-formes SMA

Plusieurs utilisateurs de l'approche multi-agent sont confrontés au problème de l'implémentation car ils ne savent pas quelle plate-forme sélectionner. En réalité, il existe une panoplie de plates-formes de développement des SMA. Dans [Demazeau, 00], Y. Demazeau classe celles-ci en deux catégories : Académique (universitaire) ou Industrielle. Dans la première catégorie, on retrouve les plates-formes suivantes : MADKIT, MAGIQUE, etc. Dans la deuxième catégorie, sont classées les plates-formes comme ZEUS, AgentBuilder, etc.

Une plate-forme multi-agent est un outil permettant de faciliter la construction et l'exploitation d'un SMA. Une plate-forme doit simplifier la tâche du développeur. Plus le développeur est assisté dans ses différentes tâches, plus la plate-forme est performante. Ainsi, une plate-forme multi-agent doit éviter au maximum de limiter le domaine pour lequel elle est adaptée. Donc, une plate-forme efficace et fiable doit supporter la construction des SMA dans beaucoup de domaines. Une méthodologie multi-agent doit être capable de couvrir la plupart des cas possibles [Ricordel, 01]. Par ailleurs, peu de recherches sont menées sur la standardisation des plates-formes multi-agent. P.M. Ricordel propose une plate-forme Volcano basée sur l'approche Voyelles mais il s'est concentré sur les deux phases de développement d'un SMA : phase de développement et de déploiement. Le problème reste donc toujours le même : celui de l'absence d'une plate-forme qui implémente une méthodologie ou une approche dans sa globalité. La description succincte des deux plates-formes de chaque type nous paraît profitable. Cette description se base sur l'étude réalisée par P.M. Ricordel pour la standardisation des plates-formes SMA [Ricordel, 01]. Cette étude présente les plates-formes selon une grille d'analyse qui comporte les quatre phases de développement d'un SMA : analyse, conception, développement et déploiement.

#### 2.3.3.2.1 PLATES-FORMES UNIVERSITAIRES

La plupart des plates-formes universitaires sont à sources ouvertes et gratuites pour un usage d'évaluation, de pédagogie ou de recherche. Dans cette section, nous décrivons la plate-forme MADKIT et la plate-forme MAGIQUE.

**MADKIT** : [Madkit]

MADKIT<sup>1</sup> est une plate-forme multi-agent écrite en Java basée sur un modèle organisationnel (le modèle agent-groupe-rôle). Elle est développée par O.Gutknecht et J.Ferber [Gutknecht & al., 98]. Il s'agit d'une plate-forme d'exécution des SMA, utilisant un micro-noyau agent. Le modèle organisationnel est basé sur l'approche AALAADIN. Dans cette approche, les agents sont identifiés par leur rôle au sein du groupe dans un modèle agent-groupe-rôle.

La principale caractéristique de MADKIT est son micro-noyau agent. Celui-ci simplifie les phases de développement et de déploiement. Les phases d'analyse et de conception sont encore peu documentées. Le principal défaut de MADKIT est l'absence de modèle agent.

La description de MADKIT selon les quatre phases de conception d'un SMA est comme suit. Pour la phase d'analyse, il n'y a pas de méthode d'analyse spécifiquement associée à MADKIT. La méthode choisie doit concevoir une analyse fonctionnelle, une analyse des dépendances, une définition des contextes de groupes et un choix des mécanismes de coordination. La phase de conception consiste en la définition du modèle d'organisation (groupes, rôles), du modèle d'interaction (protocoles, messages) et d'autres entités spécifiques (tâches, buts, etc.). Dans la phase de développement, on doit choisir le modèle agent et son implémentation. Le déploiement dans MADKIT se déroule dans la G-Box, où les agents peuvent être créés, modifiés ou détruits.

**MAGIQUE** : [Magique]

MAGIQUE<sup>2</sup> est une plate-forme de développement d'applications multi-agents développée à l'université de Lille dans le Laboratoire d'informatique Fondamentale de Lille (LIFL) [Asa].

Elle propose un modèle d'organisation hiérarchique des systèmes multi-agents. Cette organisation permet une totale maîtrise de la granularité du contrôle. Une originalité de ce modèle est de permettre aux agents d'exploiter de manière transparente (i.e. sans qu'ils sachent qui l'accomplira) toutes les compétences des différents agents du système [Bensaïd & al., 95][Routier & al., 01].

La description de MAGIQUE selon les quatre phases de conception d'un SMA est comme suit : pour la phase d'analyse, il faut déterminer l'ensemble des rôles intervenant dans l'application et décrire les compétences qui correspondent à ces rôles, en fait un rôle est défini par un ensemble de compétences. Ensuite, on définit les agents. Chaque agent est caractérisé par un certain nombre de rôles qu'il tient au sein du SMA et se voit donc attribuer l'ensemble des compétences lui permettant de tenir ces rôles. La phase de conception consiste à organiser l'ensemble des agents suivant un modèle d'organisation hiérarchique (superviseurs,

<sup>1</sup> MADKIT signifie Multi-Agent Development KIT.

<sup>2</sup> MAGIQUE signifie Multi-AGENT hiérarchIQUE.

spécialistes) et à définir le modèle d'interaction (protocoles, messages). Dans la phase de développement, l'ensemble des compétences est implémenté. Une compétence peut être développée indépendamment des agents et donc réutilisée dans différents contextes. Les agents, conformément au modèle, sont générés à partir d'une coquille élémentaire dans laquelle se greffent dynamiquement les compétences. Dans la phase de déploiement, les SMA développés avec MAGIQUE sont fortement dynamiques. En effet, il peut y avoir une évolution tant au niveau individuel des agents car un agent peut acquérir ou oublier des compétences, qu'une évolution au niveau organisationnel à travers la création de liens d'accointances traduisant une relation privilégiée entre deux agents ou par l'apparition ou la disparition d'agents au sein du SMA. La structure hiérarchique initiale n'est donc pas figée une fois pour toute.

MAGIQUE facilite la programmation et la mise en œuvre effective d'un SMA grâce aux concepts agent générique, compétences, et hiérarchies du modèle.

#### 2.3.3.2.2 PLATES-FORMES INDUSTRIELLES

Parmi celles-ci, nous décrivons la plate-forme Zeus et la plate-forme AgentBuilder.

##### ZEUS : [Zeus]

Zeus est un environnement intégré pour la construction rapide d'application à base d'agents collaborateurs. Il est développé par l'Agent Research Program du British Telecom Intelligent System Research Laboratory [Nwana & *al.*, 98].

La documentation de Zeus est abondante et insiste particulièrement sur l'importance de ses aspects méthodologiques.

Cette plate-forme dans sa totalité est disponible au téléchargement sur le site web de Zeus. Elle est libre, gratuite pour tout usager académique ou industriel. Au niveau du support, une liste de diffusion d'utilisateurs est disponible.

Dans la méthodologie de Zeus, la conception d'un SMA est la suivante. Dans la phase d'analyse, la modélisation des rôles est réalisée à l'aide des diagrammes de classes UML et des patrons. La phase de conception consiste à définir les solutions remplissant les responsabilités des rôles définis lors de la phase précédente. Pour la phase de développement, cinq activités sont réalisées : création d'ontologie, création d'agents, configuration de l'agent utilitaire, configuration de l'agent tâche et l'implémentation des agents. Dans la phase de déploiement, le système multi-agent est lancé. A l'aide d'un outil de visualisation, on obtient différents points de vue du système lors de son exécution : organisation et interactions entre les agents, décomposition globale des tâches, statistiques et état interne des agents.

**AGENTBUILDER** : [Agentbulider]

AgentBuilder est une suite d'outils intégrés permettant de construire des agents intelligents. Il est développé par Reticular Systems Inc., et il est basé sur les modèles BDI<sup>3</sup>, Agent0 [Shoham, 93] et Placa [Thomas, 93]. La méthodologie globale est documentée dans l'AgentBuilder User's Guide [Reticular, 99].

La documentation AgentBuilder couvre toutes les étapes, de l'analyse au développement malgré un manque pour les parties analyse et conception. Elle décrit les outils et explique leur utilisation. Les outils couvrent quasiment tous les aspects de chaque phase du processus de développement SMA.

L'inconvénient de l'outil logiciel AgentBuilder est qu'on ne peut construire que des agents basés sur le modèle BDI. Il est difficile d'intégrer des agents d'un autre type au système. La plate-forme AgentBuilder est un outil logiciel complexe. Son apprentissage constitue un processus long et difficile mais une fois sa maîtrise acquise, il devient très efficace.

AgentBuilder est un produit commercial à sources fermées. Une version d'évaluation à durée limitée est disponible. Le produit existe en plusieurs versions. Certes, les prix des versions sont élevés entre 100 et 5000 dollars américains selon la version.

La description d'AgentBuilder selon les quatre phases de conception d'un SMA est comme suit : dans la phase d'analyse, on conçoit la spécification des objets du domaine et des opérations qu'ils peuvent effectuer avec OMT, puis on produit une ontologie du domaine. Dans la phase de conception, on décompose le problème en fonctionnalités que les agents doivent avoir. Ensuite, les agents sont identifiés. Leurs rôles et leurs caractéristiques sont définis. Les protocoles d'interactions qu'ils utiliseront sont spécifiés. La phase de développement consiste à définir les comportements des agents, par l'intermédiaire de leurs règles de comportement, croyances initiales, intentions et capacités. Dans la phase de déploiement, les agents sont exécutés par un Run-Time Agent Engine qui interprète le code des agents.

Actuellement, il existe une panoplie de plates-formes multi-agents : à chaque plate-forme, ses avantages et ses inconvénients.

## 2.4 CONCLUSION

Les modèles multi-agents sont riches. Cependant, leur utilisation se heurte à trois obstacles majeurs : leurs notions de base ne sont pas caractérisées de façon claire, les méthodologies de conception doivent encore évoluer, et les plates-formes permettant d'assister le concepteur

---

<sup>3</sup> BDI signifie Belief - Desire - Intention.

sont presque inexistantes. La communauté système multi-agent se doit de trouver un consensus.

L'unification des méthodologies SMA et la standardisation des plates-formes existantes permettront une facilité assurée auprès des concepteurs des SMA [Ricordel, 01][Sabas & *al.*, 01][Sabas & *al.*, 02].

Dans l'état actuel de la recherche, la tâche d'un concepteur des systèmes multi-agents est très difficile car il est confronté aux choix d'une méthodologie et d'une plate-forme de conception.

## CHAPITRE 3

# MODÉLISATION MULTI-AGENT D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT

3.1	INTRODUCTION.....	75
3.2	TRANSPORT URBAIN ET SYSTÈMES MULTI-AGENTS.....	76
3.3	MODÉLISATION DES RÉSEAUX DE TRANSPORT URBAIN.....	83
3.4	CONCLUSION.....	104

## CHAPITRE 3

# MODÉLISATION MULTI-AGENT D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT

## 3.1 INTRODUCTION

Comme toute modélisation, la modélisation d'un réseau de transport répond avant tout à un besoin de connaissances du phénomène étudié : le modèle donne une représentation simplifiée d'un phénomène complexe, permettant une meilleure compréhension de ses mécanismes internes et des paramètres qui déterminent son évolution. Cette meilleure connaissance doit permettre de prévoir dans un premier temps, l'évolution du phénomène à partir de conditions initiales. Le modèle a ensuite une fonction de prévision et sert pour la commande.

L'approche multi-agent est adaptée aux problèmes de gestion de réseaux de transport urbain. Le caractère distribué et parallèle du paradigme multi-agent permet [Balbo, 00] :

- De bien décrire la complexité de l'évolution d'un réseau de transport, par analogie structurelle.
- De décomposer un problème en élément plus simple, plus facile à appréhender (réduction de la complexité dans un domaine peu formalisé).
- De réaliser un suivi avec les systèmes d'Informations Géographiques (SIG).
- D'assurer la résolution de problèmes par simulation.

Notre objectif est d'élaborer un Système d'Aide à la Décision (SAD) innovant, capable de résoudre le problème de gestion des correspondances dans les conditions normales ou perturbées. A travers cela, la qualité de service offerte aux clients sera améliorée dans leurs déplacements quotidiens. Le SAD doit être en lien direct avec le SAE pour réagir en temps opportun à toute anomalie d'exploitation.

Dans ce chapitre, nous abordons les travaux de recherche menés dans le domaine des transports urbains (trafic urbain, transport en commun, etc.) qui utilisent les systèmes multi-agents. Ainsi, nous situons nos propres travaux, dans ce domaine, en vue de la régulation des correspondances. Puis, nous présentons les différents modèles utilisés pour représenter le trafic urbain et nous donnons nos représentations d'un réseau de transport urbain. Enfin, nous abordons nos travaux de recherche : régulation des correspondances dans les réseaux de

transport urbain. Ces travaux utilisent un système multi-agent pour la modélisation d'un réseau de transport urbain. Pour cela, nous adoptons une démarche méthodologique reposant sur l'approche Voyelles [Demazeau, 95] et s'inspirant de la méthode Cassiopée [Collinot & al., 96].

## 3.2 TRANSPORT URBAIN ET SYSTÈMES MULTI-AGENTS

Dans cette section, nous citons les domaines d'application des systèmes multi-agents. Ainsi, nous parlons des travaux réalisés dans le domaine de transport urbain en utilisant les systèmes multi-agents. Enfin, nous situons nos recherches par rapport à ces travaux.

### 3.2.1 DOMAINES D'APPLICATION DES SYSTÈMES MULTI-AGENTS

Plusieurs publications concernant les applications des systèmes multi-agents dans l'industrie [Chaib-Draa & al., 95][Kouiss & al., 95][Muller & al., 98][Parunak, 96] [Parunak, 98][Demazeau, 00][Shen & al., 01] sont apparues. Cette production s'explique par les capacités des systèmes multi-agents à modéliser des systèmes complexes [Trouvez, 01].

Parmi les premières applications développées à l'aide de la technologie multi-agent, on trouve une dans le contrôle du trafic aérien et une autre dans la surveillance de véhicules automatisés [Chaib-Draa & al., 01].

Pour le contrôle de trafic aérien, [Cammarata & al., 88] ont étudié des stratégies de coopération pour pouvoir résoudre les conflits entre les plans d'un groupe d'agents. Ces stratégies ont pu être ensuite appliquées dans le cadre d'un système de contrôle du trafic aérien. Dans ce système, chaque agent (représentant un avion) cherche à bâtir un plan de vol qui doit garantir une distance sécuritaire de chaque autre agent. Dans la situation où des agents se retrouvent dans une situation conflictuelle, ils doivent alors choisir parmi eux, un agent apte à élaborer un nouveau plan de vol sans engendrer de nouveaux conflits. Pour effectuer ce choix, S.Cammarata et ses collègues ont opté pour deux stratégies qu'ils ont comparées entre elles. La première choisit l'agent le mieux informé ou l'agent le moins contraint pour jouer le rôle de planificateur central et élaborer un nouveau plan de vol qui résout le conflit. La deuxième réalise le partage suivant : il revient à l'agent le mieux informé d'élaborer un nouveau plan de vol et à l'agent le moins contraint de l'exécuter.

La surveillance de véhicules automatisés, quant à elle, est construite sur le système DVMT (Distributed Vehicle Monitoring Task) [Corkill & al., 83]. Ce système a comme tâche principale d'identifier quel type de véhicule circule dans la zone où sont placés ses capteurs. À partir de ces interprétations, il doit tenter d'établir une description des mouvements des véhicules dans la région qu'il supervise. Comme de nombreux systèmes multi-agents de

l'époque, le système DVMT utilise le système du tableau noir (blackboard) pour coordonner les efforts de ses différents agents. Rappelons qu'un tableau noir est en termes simples une structure de données partagées entre divers agents. Ces derniers peuvent la consulter pour obtenir des informations sur l'état actuel du problème ou y proposer la solution partielle qu'ils obtiennent.

Malgré leur jeune âge, les systèmes multi-agents connaissent une grande expansion. Ils touchent une grande variété de domaines d'application. Ils sont à l'intersection de plusieurs domaines scientifiques [Chaib-Draa & *al.*, 01] : informatique répartie et génie logiciel, intelligence artificielle et vie artificielle. Ils s'inspirent également d'études issues d'autres disciplines connexes notamment la sociologie, la psychologie sociale, les sciences cognitives et bien d'autres. C'est ainsi qu'on les trouve parfois à la base :

- Des systèmes distribués [Fagin & *al.*, 95][Halpern, 95].
- Des interfaces personne-machine [Kobsa, 89][Negroponte, 95].
- Des bases de données et bases de connaissances distribuées coopératives [Babin, 97].
- Des systèmes pour la compréhension du langage naturel [Cohen & *al.*, 79][Allen & *al.*, 80][Appelt, 85][Litman & *al.*, 87][Galliers, 88][Cohen & *al.*, 90][Kaplan, 98].
- Des protocoles de communication et réseaux de télécommunications [Halpern, 95][Malville & *al.*, 98][Nwana & *al.*, 99][Bourron, 01].
- De la programmation orientée agents et génie logiciel [Shoham, 93][Thomas, 93][Jennings & *al.*, 01].
- De la robotique cognitive et coopération entre robots [Lespérance, 91][Lespérance & *al.*, 94][Lakemeyer & *al.*, 99].
- Des applications distribuées comme le web, l'internet, le contrôle de trafic routier (transport urbain), le contrôle aérien, les réseaux d'énergie, etc. [Chaib-Draa, 96][Jennings & *al.*, 98].

La nature distribuée de ces domaines d'application laisse une grande possibilité d'utilisation des systèmes multi-agents. Ces derniers permettent des traitements parallèles et la réutilisation des modèles agents.

Les recherches dans le domaine des systèmes multi-agents poursuivent deux objectifs majeurs. Le premier concerne l'analyse théorique et expérimentale des mécanismes qui ont

lieu lorsque plusieurs entités autonomes interagissent. Le second s'intéresse à la réalisation de programmes distribués capables d'accomplir des tâches complexes via la coopération et l'interaction. Leurs positions sont donc doubles. D'un côté, elles se placent au sein des sciences cognitives, des sciences sociales et des sciences naturelles pour à la fois modéliser, expliquer et simuler des phénomènes naturels, et susciter des modèles d'auto-organisation. De l'autre côté, elles se présentent comme une pratique, une technique qui vise la réalisation de systèmes informatiques complexes à partir des concepts d'agent, de communication, de coopération et de coordination d'actions [Chaib-Draa & *al.*, 01].

### 3.2.2 APPLICATION DES SMA DANS LE DOMAINE DU TRANSPORT URBAIN

Nous nous intéressons, en particulier, aux applications des systèmes multi-agents dans le domaine du transport urbain. Les premiers travaux dans ce domaine ont été effectués pour la modélisation du trafic urbain par F.A. Bomarius [Bomarius, 92] et ensuite par B. Chaib-Draa [Chaib-Draa, 94]. Le trafic urbain est généralement une tâche fortement interactive entre divers agents. Ces agents peuvent être des humains ou des machines et doivent sans interruption ajuster leurs actions afin d'éviter d'éventuels conflits, par exemple les embouteillages [Chaib-Draa, 95].

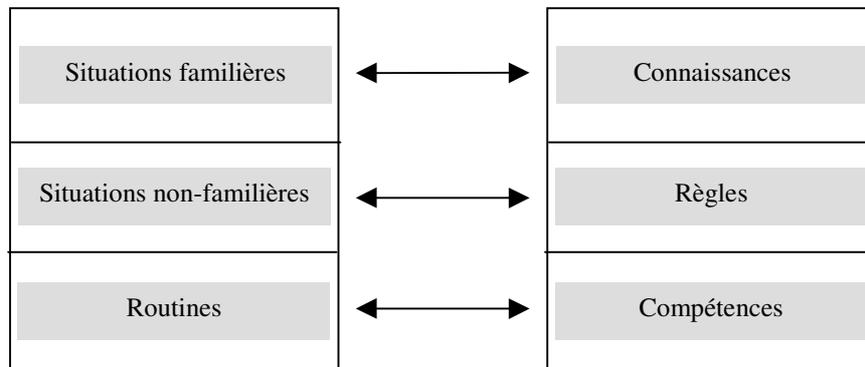
F.A. Bomarius propose une modélisation multi-agent des scénarii du trafic urbain au niveau des carrefours. Dans sa modélisation, il y a trois types d'agents : des agents véhicules, des agents feux (feux de signalisation) et des agents parking. Au niveau d'un carrefour, il existe quatre agents feux. Les agents feux détectent la présence des agents véhicules. Ces derniers informent les agents feux de leur intention (tourner à gauche, tourner à droite ou aller tout droit). Ainsi, les quatre agents feux du carrefour coopèrent entre eux afin de minimiser le temps d'attente des véhicules en jouant sur la prochaine séquence de chaque feu de signalisation. Parmi, les agents véhicules, il y a des agents plus prioritaires que les autres (véhicule ambulance, véhicule de police, etc.) Ainsi, les agents véhicules communiquent avec les agents parking pour les informer de leur intention de se garer sur le parking. Les agents parking peuvent communiquer avec les agents feux pour minimiser l'attente des véhicules voulant se garer.

B. Chaib-Draa présente dans ses travaux un cadre pour concevoir un système multi-agent dans lequel les agents sont capables de coordonner leurs activités dans des situations de routines, familières ou non-familières. Il propose le modèle S-R-K<sup>1</sup> (Compétences, Règles, Connaissances) inspiré du modèle de Rasmussen. La partie Compétences représente les réflexes d'un agent. La partie Règles contient un ensemble de règles résultant d'actions préalablement enregistrées permettant ainsi à un agent, dans le cadre d'une situation familière, de retrouver le plan et de le mettre en œuvre. La partie Connaissances intervient dans des

---

<sup>1</sup> S-R-K: Skills, Rules and Knowledge.

situations non familières. Ces trois parties sont reliées les unes aux autres de façon hiérarchique (figure 3.1). Il démontre à travers quelques scénarii du trafic urbain, l'applicabilité des concepts qu'il développe [Chaib-Draa, 96].



**Figure 3.1 : Modèles S-R-K de coordination multi-agent à trois niveaux**

Les travaux de B. Chaib-Draa reflètent les efforts réalisés pendant plusieurs années dans le domaine du trafic aérien [Chaib-Draa & al., 90] et urbain [Chaib-Draa, 94].

B. Chaib-Draa poursuit ses travaux dans le domaine du transport urbain ; car en 1997, il publie avec M. Sassi des travaux dans ce domaine. Ils utilisent une approche multi-agent pour la résolution du problème de planification et de négociation dans les systèmes de transport de marchandises par des camions [Sassi & al., 97]. Dans leur approche multi-agent, les camions-conducteurs sont considérés comme des agents intelligents, autonomes et rationnels. Ces agents négocient leur proposition, via leur compagnie de transport (modélisation hiérarchique), en effectuant des achats et des ventes, en vue d'atteindre un compromis qui minimise le coût du plan commun. Pour améliorer la performance de leur système multi-agent, ils associent à ce commerce simulé des heuristiques de recherche permettant d'améliorer, entre autres, la qualité et le temps d'obtention de la solution. Ainsi, ils utilisent les algorithmes génétiques pour la négociation entre les agents, afin d'évaluer les plans les moins coûteux pour un agent (camion-conducteur). Ce dernier travail a été repris par B. Chaib-Draa et al. en 1999 [Fisher & al., 99].

De nombreux travaux dans le domaine du transport urbain utilisent les systèmes multi-agents avec des objectifs différents. Ils concernent la régulation du trafic urbain [Roozmond, 96][Roozmond, 99a], celle des correspondances dans les réseaux de transport urbain [Soussaul, 98][Laïchour & al., 00], la gestion des réseaux de transport urbain [Balbo, 00][Gruer & al., 01], la simulation des comportements des conducteurs humains (projet ARCHISIM) [El-Hadouaj & al., 00][Espié, 02][Champion & al., 01], la formation des régulateurs de trafic d'une compagnie de transport en commun [Fougères, 00], la gestion du trafic urbain [Hernandez & al., 01], etc. Parmi ces travaux, nous présentons les travaux menés

dans le domaine du transport urbain car ils sont les plus proches des nôtres [Laïchour & *al.*, 00]. Il s'agit des travaux de B. Soussaul [Soussaul, 98] et ceux de F. Balbo [Balbo, 00].

### 3.2.2.1 TRAVAUX DE B. SOUSSAUL

B.Soussaul modélise un réseau de transport urbain par un système multi-agent composé de cinq types d'agents : agent BUS, agent STATION, agent SECTION, agent DEPOT et agent INTERFACE. Chaque agent comporte des caractéristiques qui le distinguent des autres agents [Soussaul, 98] :

- Les agents BUS : un agent BUS représente le groupe "véhicule" et "conducteur". Il doit remplir quatre tâches différentes : gérer son déplacement et gérer ses passagers (tâches répétitives), détecter les perturbations et prendre une décision dans le contexte où une correspondance est compromise (tâches événementielles). Ses accointances sont les agents BUS précédents et suivants, l'agent STATION de la prochaine station, l'agent SECTION de la section sur laquelle cet agent BUS se trouve. En cas de perturbation en correspondance, un réseau d'accointances est créé avec les autres agents BUS en correspondances. La communication sert d'une part, à gérer ses déplacements et d'autre part, à prendre une décision dans une correspondance. Dans le premier cas, la communication s'effectue avec l'agent SECTION qui précise à l'agent BUS les caractéristiques de la perturbation : nature (ralentissement, arrêt) et éventuellement la durée (ponctuelle, prolongée ou indéterminée). L'agent BUS réagit de façon réflexe à ces informations. Dans le second cas, la communication s'effectue entre les différents agents de correspondance. Pour décider, l'agent BUS doit acquérir les informations concernant les critères de régulation. Son raisonnement est basé sur deux niveaux :
  - Un niveau bas (stimulus/réflexe) concernant le traitement de l'information de son déplacement. Le bus stoppe ou ralentit de façon réflexe à l'annonce d'un feu rouge ou d'une perturbation.
  - Un niveau haut (raisonnement intelligent) concernant la détection des perturbations et le choix des actions de régulation lors des correspondances. La détection de perturbation consiste à analyser sa position, son retard ou son avance et sa vitesse pour connaître le respect des contraintes horaires, à en évaluer les conséquences sur les futures correspondances et à en informer les agents concernés.

Sa décision dépend des critères de régulation (objectifs de régulation). La perception de l'agent BUS permet d'acquérir les informations contextuelles de ses accointances, la charge des stations et les perturbations.

- Les agents STATION : ce type d'agent représente les arrêts du réseau de transport urbain. Il peut être de différents types : terminus, arrêt simple, arrêts de régulation ou arrêts de correspondances. Un agent STATION est un agent de bas niveau. Il a pour rôle de :
  - Représenter l'arrivée des passagers à la station.
  - Gérer l'échange des passagers avec l'agent BUS.

Ses accointances sont les agents BUS qui arrivent et les agents STATION proches. La communication s'effectue principalement avec les agents BUS. L'agent STATION annonce la présence des passagers pour l'agent BUS et réciproquement. L'agent BUS modifie alors ses connaissances sur ces derniers. Sa connaissance repose sur l'évolution du nombre de passagers en fonction de l'horaire. Cette fonction est assurée dans un premier temps, à partir d'une base de données recueillie grâce aux enquêtes auprès des clients. Le raisonnement d'un agent STATION consiste à "générer" un ensemble de passagers et à gérer l'échange des passagers avec l'agent BUS.

- Les agents SECTION : Ce type d'agent représente la portion comprise entre deux correspondances. Ses tâches sont d'injecter des perturbations qui ralentissent ou stoppent le Bus et de gérer la déviation d'un bus. Ses accointances sont les agents BUS des bus se trouvant sur la ligne des sections proches. Sa connaissance se compose de la topologie du réseau proche de cette section et des différentes configurations de perturbations. Sa communication s'effectue avec les agents BUS pour les avertir d'une perturbation. Dans celle-ci, l'agent SECTION précise la nature de la perturbation (ralentissement ou arrêt de la circulation, etc.) et éventuellement la durée de la perturbation. La communication se réalise, aussi, avec les autres agents SECTION en cas de déviations ou de perturbations très importantes. Son raisonnement consiste à créer sur demande de l'utilisateur une perturbation et d'informer les agents BUS concernés.
- Les agents DEPOT : Ce type d'agent représente le dépôt du réseau où se trouve la réserve matérielle et humaine (véhicules et conducteurs). Ses tâches sont de gérer la réserve et de calculer le temps d'injection d'un bus. Ses accointances sont les agents BUS. Ses connaissances reposent sur la base de données de l'ensemble des véhicules et des conducteurs. La communication consiste à préciser aux agents Bus si la réserve permet l'injection d'un bus.
- L'agent INTERFACE : Cet agent ne représente pas une entité physique, à l'opposé des précédents, mais permet de prendre en compte les échanges d'informations avec le régulateur. Il est chargé d'acquérir des informations données par le

régulateur et de les envoyer aux agents concernés. Ses accointances sont le régulateur et les agents visés par les informations fournies.

D'après nos connaissances, les travaux de B. Saussaul sont les premiers travaux menés dans le domaine de la régulation des correspondances, dans les réseaux de transport urbain, en utilisant les systèmes multi-agents. Dans la suite, nous proposons une modélisation pour la gestion des correspondances, totalement différente de celle étudiée précédemment.

### 3.2.2.2 TRAVAUX DE F.BALBO

Parallèlement à cette étude, F. Balbo propose l'utilisation d'un SMA pour la gestion d'un réseau de transport urbain en conditions normales ou perturbées. Pour reproduire la confrontation de l'état théorique (Tableau de Marche Théorique) et l'état réel (Les horaires réels d'exploitation), il définit deux types d'agents [Balbo, 00] :

- Les agents ARRET : Ils représentent la composante statique du réseau de transport, sa structure physique, son organisation et les horaires théoriques. Un agent ARRET connaît sa position sur le réseau avec les informations suivantes : la référence de sa ligne, la référence de son itinéraire, un numéro de référence unique et la distance le séparant du terminus. A partir de ces données, chaque agent est identifiable comme le représentant d'un point précis du réseau de transport. Ces agents sont également regroupés suivant l'itinéraire auquel ils appartiennent : la distance le séparant de l'arrêt suivant, les références des agents ARRET situés avant et après lui, et un numéro de position est calculé depuis le début de l'itinéraire. En conditions normales, le rôle de ce type d'agent vise à assurer la gestion des horaires en temps réel. Le système multi-agent proposé fonctionne sans horaire préétabli mais selon une gestion dynamique des horaires (Tableau de Marche dynamique). Ceci est possible grâce à la communication entre les agents ARRET avant le départ d'un bus, puis assurer par le suivi du bus pour l'ensemble des arrêts qu'il doit desservir.
- Les agents BUS : Ils représentent la composante dynamique qui anime le réseau de transport. Chaque agent BUS dispose de deux sources d'information : statique et dynamique. Les informations statiques représentent l'ensemble des courses qu'un agent BUS doit assurer tout au long de sa journée. Les informations dynamiques représentent les informations que reçoit un agent BUS concernant la position du bus issue d'un système de capteurs présent sur le réseau du transport.

On retrouve ces deux types d'agents dans la modélisation proposée par B. Soussaul pour la gestion des correspondances.

F. Balbo ajoute deux autres types d'agents pour la gestion des perturbations :

- Les agents ZONEARRET : Ces agents assurent la synthèse de l'information relative à la perturbation. A chaque perturbation, sont associés des agents ZONEARRET. Chacun d'eux assure la gestion d'un ensemble d'agents ARRET dont le lien avec la perturbation est identique. Chaque agent ZONEARRET calcule pour l'ensemble des arrêts concernés la demande théorique et estime la difficulté de circulation, l'étendue en nombre d'arrêts ainsi que le retard occasionné. La particularité de ce type d'agents, à la fin d'une perturbation, est de rester un certain temps en activité. Cette activité de veille permet de conserver la continuité de l'étude de la perturbation jusqu'à sa disparition définitive.
- Les agents INCIDENT : Chacun de ces agents est responsable de la gestion d'une perturbation. Son rôle consiste à synthétiser les informations disponibles afin d'évaluer la difficulté de la perturbation et l'adéquation des solutions avec les agents BUS. Les informations utilisées par l'agent INCIDENT sont issues des agents ZONEARRET et BUS concernés. De même, que pour les agents ZONEARRET, l'agent INCIDENT disparaît après la perturbation.

Effectivement, cette gestion consiste à apporter de l'aide au régulateur pour améliorer la gestion de l'information relative à la perturbation et de lui proposer un ensemble de solutions.

Après une présentation des travaux réalisés dans le domaine de transport urbain utilisant les systèmes multi-agents, nous allons poursuivre sur les différents modèles du trafic urbain utilisés. Puis, nous présenterons notre modélisation multi-agent d'un réseau de transport urbain, destinée à la régulation des correspondances.

### 3.3 MODÉLISATION DES RÉSEAUX DE TRANSPORT URBAIN

L'objectif de la modélisation d'un réseau urbain vise à obtenir une représentation visuelle, par exemple sous la forme d'un graphe orienté. Celui-ci se compose d'un ensemble de points appelés nœuds et d'un ensemble de liens entre ces nœuds indiquant un sens de parcours, appelés arcs orientés [Labbé & *al.*, 97][Jagueneau, 00].

Comme toute modélisation, celle du réseau urbain est une simplification de la réalité, en vue d'évaluer une situation ou de résoudre un problème. Du point de vue dimensionnel (géographique), la portée de la modélisation peut être un carrefour, un ensemble de carrefours, un quartier, une ville complète, un ensemble de villes, un réseau de transport urbain, etc. Donc, les trajets relient une zone origine à une zone destination. De plus, ils peuvent être effectués à l'aide de différents moyens de transport : à pied, en vélo, en moto, en voiture ou en transport en commun (bus, tramway, métro, etc.). Nous appelons ces moyens de

transport : les modes. Un réseau de transport dans lequel on considère plusieurs modes, est appelé un réseau multimodal. Notant d'ailleurs que C. Petit-Rozé et *al.* [Petit-Rozé & *al.*, 02] envisagent une étude sur les informations personnalisées des voyageurs dans un réseau multimodal. Les différents trajets existants entre les zones en fonction des modes de transport constituent les arcs de notre graphe orienté.

En réalité, il n'existe pas de méthode pour réaliser la modélisation d'un réseau urbain. Cette modélisation s'effectue en fonction d'une part des connaissances que l'on possède de la structure de la ville (quartiers d'habitation, centres d'activités commerciales ou industrielles, zones de parking ...), et d'autre part des objectifs de la modélisation (modification d'un carrefour, étude de lignes de transport en commun, gestion des correspondances, etc.).

### 3.3.1 MODÈLES DU TRAFIC URBAIN

L'objectif avoué des modèles de trafic routier consiste à décrire aussi précisément que possible, l'évolution de la circulation sur un ensemble de voies (ou un réseau). Cet objectif se traduit cependant de manière tout à fait différente suivant le type d'utilisation pour lequel est conçu le modèle.

D'après [Lesort, 95], il existe deux grands domaines d'application de la modélisation du trafic : la planification du trafic et l'exploitation de la circulation. Une modélisation globale du trafic est, en fait, la combinaison de plusieurs modèles :

- Un modèle d'écoulement du trafic décrivant la circulation des flux de véhicules à travers le réseau, les files d'attente, le fonctionnement des intersections. Outre sa représentation de l'écoulement, ce modèle sert à calculer les temps de parcours ou les coûts d'écoulement du trafic sur les arcs du réseau.
- Un modèle de répartition du trafic sur les différentes voies décrivant la manière dont se répartit le trafic entre les différents itinéraires possibles sur le réseau.
- Des modèles annexes décrivant la demande aux entrées du réseau réalisant des calculs additionnels, comme la consommation d'énergie des véhicules ou les émissions de polluants.

Suivant le type d'application visée, l'accent est mis sur telle ou telle composante du modèle au détriment de tel ou tel autre modèle.

#### 3.3.1.1 MODÈLES DE PLANIFICATION

En matière de planification, les modèles de trafic sont utilisés comme outil de prévision et de test de scénarii. Ils permettent de prévoir quel sera le volume du trafic devant emprunter une

infrastructure en projet (rocade, pont, etc.) et d'en étudier ainsi, la rentabilité et le dimensionnement, de tester l'influence prévisible de la mise en place d'un schéma de circulation, voire simplement d'étudier sur un réseau existant l'effet possible d'une évolution de la demande. L'approche classique des modèles de planification décompose une modélisation des déplacements en quatre étapes [Lesort, 95] :

- Une première étape dite de génération qui définit des pôles de génération et d'absorption des déplacements, à partir de données sur les structures spatiales (habitat, activité) et la mobilité.
- Une deuxième étape dite de distribution, qui définit la répartition des déplacements entre pôles.
- Une troisième étape de choix modal, qui décrit la répartition de ces déplacements entre les différents modes de transport.
- Une dernière étape d'affectation qui décrit, à l'intérieur d'un mode, la répartition des déplacements entre les différents chemins possibles.

Cette décomposition est au demeurant très artificielle puisqu'elle ne prend pas en compte les interactions manifestement fortes devant exister entre les différentes étapes. Même si l'appellation des modèles de trafic s'étend à l'ensemble des étapes, seule la dernière étape (les modèles d'affectation) fait véritablement appel à une modélisation de la circulation.

Plus particulièrement pour les réseaux de transport collectif urbain, il existe une méthode de prévision appelée "5P". Cette méthode est composée d'études portant sur la prévision de 5 caractéristiques [Soussaul, 98] : la mobilité générale, la distribution géographique des déplacements, la répartition horaire, la répartition par mode de transport et la répartition par itinéraire. Les caractéristiques spécifiques des modèles de planification sont [Lesort, 95] :

- Une échelle géographique de grande taille (la plus petite étant l'agglomération),
- Une échelle de temps également grande,
- La description de la demande en conséquence très globale,
- L'écoulement utilisé comme élément de calcul d'un coût d'acheminement du trafic de son origine à sa destination,
- Des modèles purement descriptifs,
- Des modèles non-destinés à l'exploitation en temps réel.

Il s'agit ainsi de modèles très globaux, les plus souvent statiques, c'est-à-dire ne prenant pas en compte les aspects dynamiques du trafic. D'un point de vue conceptuel, c'est la répartition des flux sur le réseau qui constitue leur fondement.

### 3.3.1.2 MODÈLES D'EXPLOITATION DU TRAFIC

L'objectif visé par les modèles pour l'exploitation n'est plus seulement descriptif mais aussi normatif. Le modèle est ainsi destiné à commander le système. L'application la plus classique est le calcul de la commande des feux de circulation. Le modèle est alors une partie intégrante d'un processus d'optimisation. Ce type de modèle est aussi bien utilisé en exploitation comme évaluation de scénarii de commande qu'en simulation pour la mise au point de commande du trafic. Ces modèles ont généralement des caractéristiques tout à fait opposées à celles des modèles de planification :

- L'échelle géographique est réduite (carrefour, petit réseau).
- Leur fonctionnement est à court terme.
- L'accent est mis sur l'écoulement du trafic.
- La demande est décrite de façon relativement fine en volume mais sans détailler sa répartition spatiale.
- La régulation du trafic fait l'objet d'une description détaillée puisqu'elle constitue l'objet même d'étude du modèle.

### 3.3.1.3 CONVERGENCE ENTRE LES MODÈLES DE PLANIFICATION ET LES MODÈLES D'EXPLOITATION

Plusieurs éléments interviennent pour favoriser un rapprochement des points de vue entre planification et exploitation. Par exemple, la problématique de prévision, d'observation et de résorption de la congestion dans un réseau s'inscrit tout à fait à l'intersection de ces deux domaines. En effet, la congestion est un phénomène dynamique qu'il faut traiter sur un laps de temps assez long pour observer son évolution et avec précision pour avoir un modèle réaliste. On voit ainsi apparaître, depuis quelques temps, des "modèles dynamiques de réseaux", conçus pour traiter de façon relativement fine, à la fois, l'écoulement du trafic et sa répartition sur le réseau en prenant en compte, les diverses formes de régulation et notamment l'action possible de l'exploitant sur la répartition des flux.

Quelles que soient leurs différences, les modèles de trafic comportent tous les mêmes types d'éléments et reposent sur les mêmes jeux de variables descriptives. Les modèles élémentaires peuvent être très divers, et se combiner de façon très variée, mais il est possible

d'en dresser une classification simple en citant quelques exemples de chaque classe (figure 3.2).

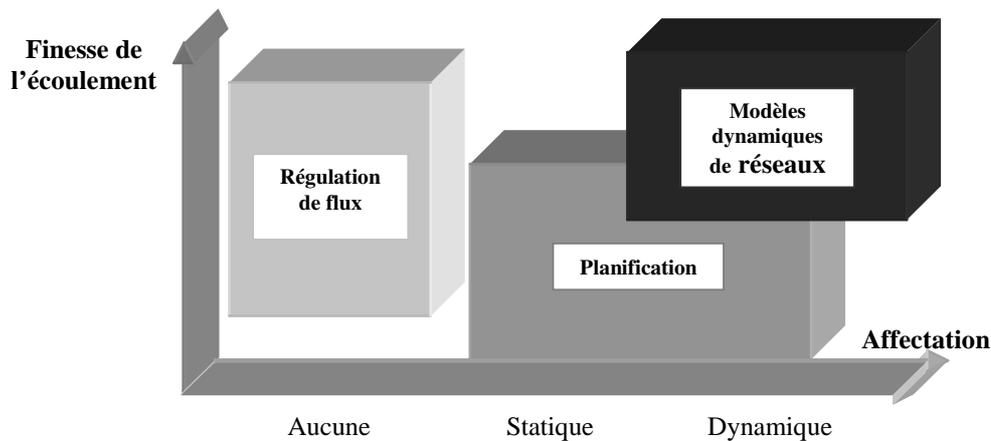


Figure 3.2 : Les grandes classes de modèles

### 3.3.1.4 DISCUSSION

Le modèle de réseau de transport collectif que l'on souhaite obtenir, se rapproche fortement des modèles dynamiques de réseau. Les objectifs recherchés sont de modéliser un réseau de transport entier, tout en ayant une précision qui permette au modèle d'être en phase avec la réalité. Malheureusement, les modèles décrits ci-dessus s'appuient le plus souvent sur des modèles d'écoulement décrivant de façon locale, l'écoulement du trafic au sein d'un élément du réseau afin de gérer le trafic. De ce fait, les équations, inspirées par la mécanique des fluides, gèrent non pas un ensemble de véhicules indépendants mais un flot de véhicules dans lequel les paramètres d'un véhicule dépendent des autres véhicules [Lesort, 95]. En transport collectif, les véhicules sont trop éloignés les uns des autres pour pouvoir les regrouper. On ne peut alors plus penser en terme de débit ou de flot de véhicules mais en terme de véhicules et de services. Ceci nous conduit à modéliser le réseau de transport collectif en utilisant les systèmes multi-agents, dans le but de gérer au mieux les correspondances, dans des conditions normales ou perturbées.

## 3.3.2 REPRÉSENTATION D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT

### 3.3.2.1 DÉFINITION DU RÉSEAU

Un réseau de transport urbain est constitué d'une topologie qui représente la structure du réseau, pour son exploitation, d'un horaire théorique et des flux qui circulent dans le réseau (figure 3.3).

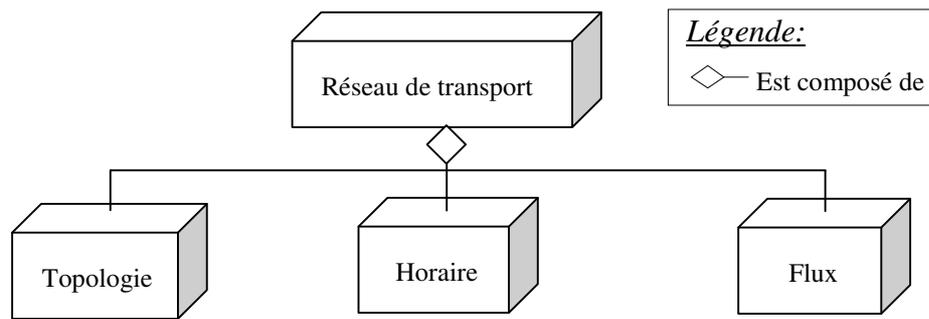


Figure 3.3 : La composition d'un réseau de transport urbain

### 3.3.2.1.1 Topologie

Dans une topologie, on retrouve des lignes qui sont composées de points et de liaisons. Une liaison entre deux points est appelée inter-arrêt.

Les points sont de deux types : arrêt ou garage (figure 3.4). Le type garage contient, aussi, deux types : dépôt ou réserve. Dans les arrêts, on retrouve deux types d'arrêts : arrêt simple ou arrêt principal. Un arrêt principal peut être un arrêt de régulation, un arrêt terminus ou un nœud de correspondances (figure 3.5).

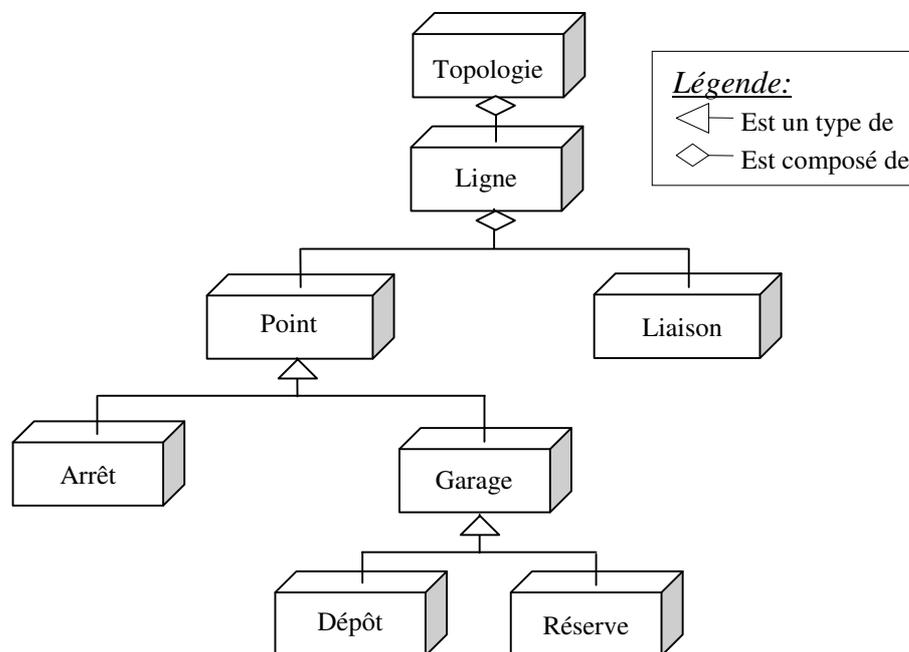
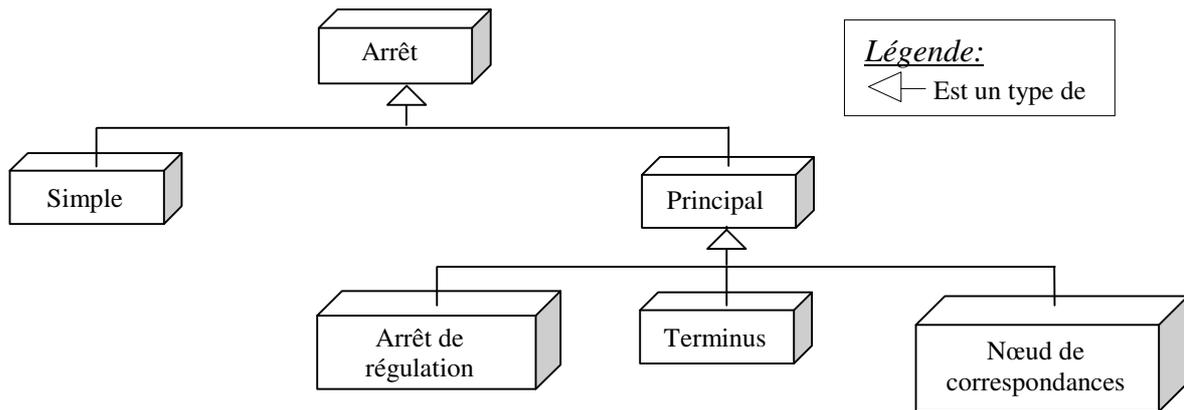


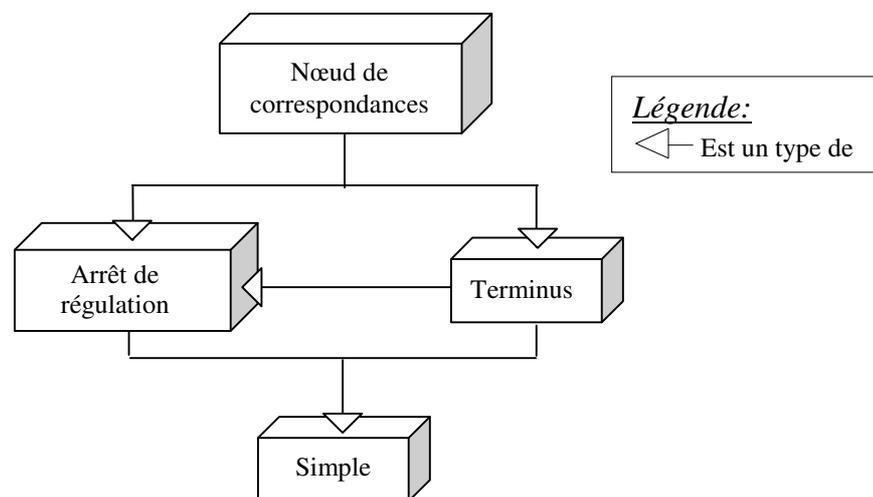
Figure 3.4 : La structure d'un réseau de transport



**Figure 3.5 : Les types d'arrêts**

Nous avons établi une hiérarchie entre les différents types d'arrêts (figure 3.6). Dans celle-ci, l'arrêt de base est un arrêt simple. Les arrêts de régulation et les terminus héritent les propriétés d'un arrêt simple. Ils sont équipés de capteurs pour le suivi en temps réel des véhicules. Mais les terminus sont des arrêts desservis en dernier, par des véhicules et les voyageurs descendent en fin de course. Un arrêt de régulation peut devenir un arrêt terminus à partir du moment où le régulateur le considère comme le dernier arrêt desservi de la ligne.

Les nœuds de correspondances héritent des propriétés d'un arrêt de régulation et d'un terminus. Ainsi, l'échange des voyageurs entre les véhicules est envisagé.



**Figure 3.6 : La hiérarchie des arrêts**

### 3.3.2.1.2 HORAIRE

Un horaire représente le tableau de marche préétabli avant l'exploitation (planification). Cet horaire peut changer au cours de l'exploitation car il est établi dans des conditions optimales.

Indépendamment de la typologie d'un réseau, une ligne est composée d'un ensemble d'itinéraires. Un itinéraire contient des révolutions<sup>2</sup>. Chacune d'elle est composée d'un ensemble de courses (figure 3.7).

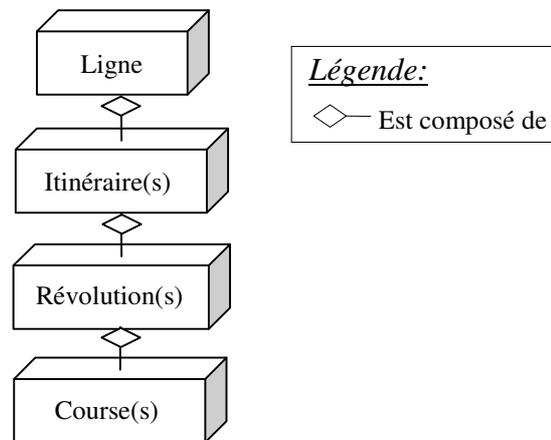


Figure 3.7 : La représentation d'une ligne selon un TM

### 3.3.2.1.3 FLUX

Il y a trois types de flux : les flux de véhicules, les flux d'informations et les flux de décisions (figure 3.8).

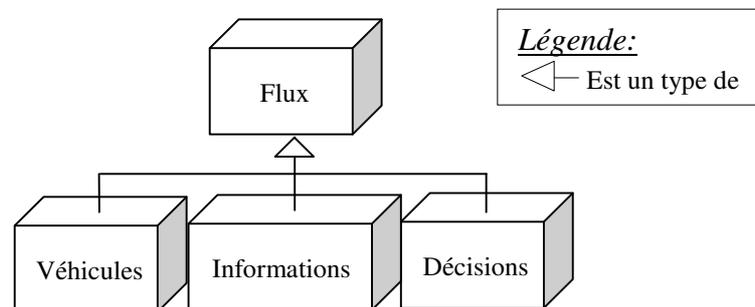


Figure 3.8 : Les flux dans un réseau de transport

Le flux de véhicules représente tous les moyens de transport utilisés (bus, tramway, train, etc.). Le flux d'informations représente les informations fournies aux voyageurs par le régulateur, les informations sur l'état de la circulation dans le réseau des véhicules fournies par le SAE. Le flux des décisions représente les décisions prises par le régulateur pour résoudre d'éventuelles perturbations.

### 3.3.2.2 REPRÉSENTATION DU RÉSEAU

Nous représentons un réseau de transport selon une représentation graduelle et une représentation vue par les correspondances.

<sup>2</sup> Pour les mots techniques propres au domaine de transport urbain collectif, il faut se référer à l'Annexe A.

### 3.3.2.2.1 REPRÉSENTATION GRADUELLE

Nous pouvons représenter un réseau de transport urbain sur plusieurs niveaux selon une représentation graduelle. Par exemple :

- Niveau 0 : Ce niveau représente tous les dépôts et les garages liés par les lignes du réseau.
- Niveau 1 : Ce niveau représente le niveau 0 ainsi que les nœuds de correspondances du réseau.
- Niveau 2 : Ce niveau représente le niveau 1 plus tous les arrêts de régulation.
- Niveau 3 : Ce niveau représente le niveau 2 plus tous les arrêts simples.
- Niveau 4 : Ce niveau représente le niveau 3 plus toutes les extensions des lignes ainsi que les déviations.
- .....

Cette représentation s'adapte suivant les éléments que nous souhaitons visualiser. Elle est à notre avis classique. En revanche, nous définissons une autre représentation. En effet, nous intervenons au niveau des nœuds de correspondances. Car, nous voulons gérer les correspondances de façon à respecter la ponctualité, surtout pour les départs des correspondances ; même si les lignes passant par les nœuds de correspondances sont gérées en intervalle (fréquence).

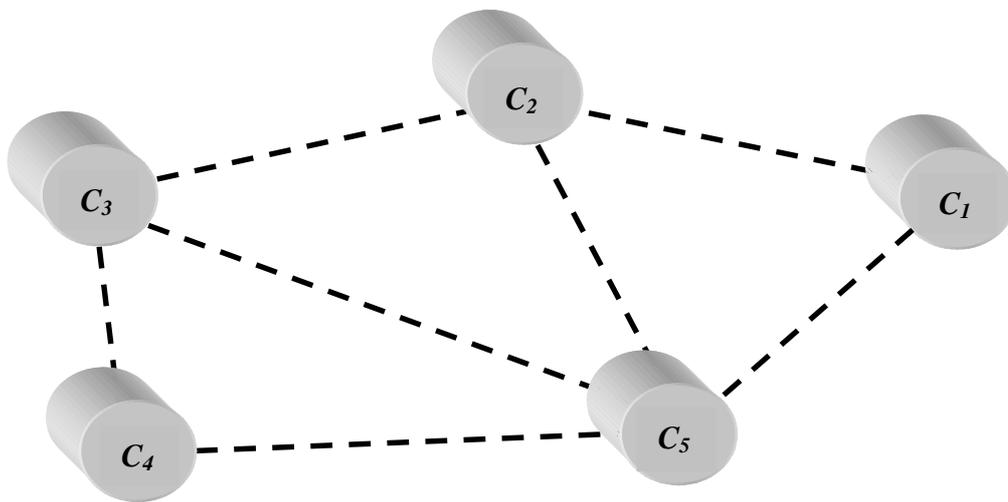
### 3.3.2.2.2 REPRÉSENTATION VUE PAR LES CORRESPONDANCES

Nous considérons un réseau de transport urbain, vu par les correspondances, comme étant un ensemble de nœuds de correspondances liés entre eux, directement ou indirectement par les lignes du réseau de transport urbain (figure 3.9). Les lignes du réseau contiennent des arrêts simples, des arrêts de régulation et des arrêts terminus. Cela ressemble beaucoup au niveau 2 de la représentation graduelle. Nous prenons en considération pour le suivi en temps réel du réseau de transport urbain, les nœuds de correspondances ainsi que les arrêts de régulation et les arrêts terminus car ceux-ci sont équipés par des moyens de localisation des véhicules (bus, tramway, train). A cette représentation du réseau, nous ajoutons deux types de régulation :

- La micro-régulation : elle consiste à réguler le trafic au niveau d'un nœud de correspondances (régulation locale). Il s'agit de réagir avec un point de vue local (nœud de correspondances) à une perturbation. Dans ce cas, nous essayons de trouver les décisions pertinentes au niveau d'un nœud de correspondances sans prendre en compte l'ensemble du réseau.

- La macro-régulation : cette régulation consiste à prendre en considération les décisions locales (micro-régulation) et observer si ces décisions ne provoquent pas de perturbations au niveau des autres nœuds de correspondances du réseau. Il s'agit de prévoir à plus au moins long terme, les effets des actions de décision sur les autres nœuds de correspondances.

Une représentation du réseau vue des correspondances est donnée ci-dessous (figure 3.9).



**Figure 3.9 : Une représentation d'un réseau de transport vue par les nœuds de correspondances**

Il est évident que la représentation d'un réseau de transport par rapport aux nœuds de correspondances est un graphe connexe car l'accessibilité d'un nœud à un autre est assurée à partir de n'importe quel nœud.

### 3.3.3 MODÉLISATION MULTI-AGENT

Les systèmes multi-agents sont des systèmes idéaux pour représenter des problèmes possédant de multiples méthodes de résolution, de multiples perspectives et/ou de multiples résolveurs [Chaib-Draa & *al.*, 01].

L'approche multi-agent propose des modèles multi-agents ouverts qui permettent d'avoir une granularité assez fine. Les avantages par rapport aux approches classiques de modélisation de transport urbain sont multiples. Parmi ces avantages, nous citons :

- Modularité : Les systèmes multi-agents sont construits à partir des entités de base qui sont les objets et les agents. Cette décomposition permet de regrouper dans une même classe, différents éléments du réseau ayant les mêmes caractéristiques. On retrouve alors les propriétés d'encapsulation et d'héritage de la programmation orientée objets.

- Précision : Un modèle multi-agent permet de définir les propriétés générales de chaque classe d'agents. Ainsi, la création d'une entité par rapport à une classe d'agents lui permet d'hériter de toutes les propriétés de la classe concernée.
- Fiabilité : Les systèmes multi-agents reposent sur le principe d'interaction entre les agents du système. Une décision prise par un agent est discutée entre les autres agents concernés par la décision. Ces agents valident la décision ou non. En cas de désaccord, il existe différents protocoles de négociation qui permettent de résoudre les conflits.
- Réutilisabilité : Un modèle multi-agent permet de définir des classes qui peuvent être réutilisées dans d'autres applications.

La modélisation et la conception d'un système multi-agent sont des problèmes majeurs et très délicats [Galland, 01]. En effet, la communauté système multi-agent (SMA) ne trouve pas encore de consensus pour définir ce qu'est un système multi-agent. Ainsi, les différentes visions d'un système multi-agent résident essentiellement dans l'approche et la méthodologie de modélisation et de conception de ce dernier. Malgré l'existence de nombreuses approches et méthodologies (chapitre 2), le concepteur se pose toujours la question sur la meilleure façon de concevoir son système multi-agent. Les tentatives d'unification des méthodologies de conception sont les bienvenues.

L'approche multi-agent d'un problème consiste à définir une répartition des compétences et des connaissances (identifier les agents), à fournir un outil de recombinaison (définir les interactions) puis à préciser les règles de la recombinaison (établir une organisation) dans un domaine donné (déterminer l'environnement).

Pour la conception d'un SMA destiné à la régulation des correspondances, nous choisissons l'approche Voyelles. Le choix d'une approche ou d'une méthodologie est l'une des difficultés majeures pour la conception d'un SMA. Notre choix de l'approche Voyelles [Demazeau, 95] se justifie par la grande liberté donnée au concepteur pour concevoir son SMA. Ainsi, il est possible de l'utiliser en mettant l'accent sur n'importe quelle composante (Agent, Interaction, Environnement, et Organisation). Dans [Collinot & al., 96], la méthode Cassiopée propose un cadre méthodologique qui s'adapte parfaitement à l'approche Voyelles.

La méthode Cassiopée part du problème à résoudre pour arriver à la spécification des agents organisés. Ces derniers vont composer le SMA devant résoudre le problème. Elle procède en trois phases qui intègrent le point de vue local et le point de vue global [Collinot & al., 96]. Les auteurs modélisent ce cadre méthodologique suivant trois étapes :

- Définition des agents : Dans cette première étape, le concepteur structure les comportements élémentaires nécessaires à la résolution du problème en vue de

définir les agents. Il répartit donc entre les agents, les connaissances et les compétences nécessaires aux systèmes [Balbo, 00]. La méthode Cassiopée n'impose pas de méthode pour l'identification des comportements. Elle peut provenir d'une étape d'analyse objet ou fonctionnelle.

- Définition des interactions : Dans cette deuxième étape, le concepteur réalise une description structurelle de l'organisation des différents types d'agents dans la résolution collective du problème. Il définit donc le mode de communication entre les agents, la nature de leurs échanges [Balbo, 00].
- Définition de l'organisation : Dans cette dernière étape, le concepteur décrit la dynamique de l'organisation. Il définit donc les liens entre les agents qu'il a conçus.

Pour la modélisation, nous suivons l'approche Voyelles pour analyser, concevoir et décrire notre système multi-agent et nous adaptons le cadre méthodologique proposé par la méthode Cassiopée. Cependant, nous introduisons la composante environnement car elle nous semble nécessaire.

Dans un premier temps, nous commençons par la définition des différents agents. Nous donnons ensuite leur modèle organisationnel. Nous détaillons les différentes interactions possibles. Enfin, nous décrivons le modèle de l'environnement. Pour atteindre cet objectif, une description fonctionnelle du système à concevoir est proposée.

### **3.3.3.1 DESCRIPTION FONCTIONNELLE DU SYSTÈME**

L'objectif de la régulation dans les réseaux de transport urbain est de minimiser le temps d'attente des voyageurs. Nous sommes convaincus que la garantie des correspondances est l'un des atouts principaux pour atteindre cet objectif. Ainsi, la régulation en temps réel doit prendre en compte les différentes perturbations possibles.

Il s'agit de concevoir un Système d'Aide à la Régulation des Correspondances (SARC) en conditions normales ou perturbées dans un réseau de transport urbain. Ce système d'aide SARC doit permettre :

- D'assister les régulateurs de transport urbain pour les aider à gérer au mieux les correspondances et éviter d'éventuelles perturbations.
- D'anticiper les perturbations afin de réduire leurs effets sur le réseau de transport urbain.

- De proposer des solutions pertinentes aux régulateurs pour qu'ils choisissent la mieux adaptée.
- De simuler les solutions afin de prévoir leurs effets à plus ou moins long terme.

Notre optique est de reproduire le monde réel du fonctionnement d'un réseau de transport urbain en définissant des agents capables d'assurer les caractéristiques ci-dessus pour gérer les correspondances. Nous souhaitons également assurer la micro-régulation au niveau des nœuds de correspondances (résolution locale d'une perturbation) ainsi que la macro-régulation afin de garder une stabilité totale du fonctionnement d'un réseau de transport, surtout au niveau des nœuds de correspondances concernées (adaptation du point de vue local sur le niveau global).

La prévention des perturbations est possible en anticipant les horaires théoriques de départ des correspondances à l'aide de simulations par anticipation.

Dans ce processus de simulation, on détermine, au niveau de chaque nœud de correspondances, un temps  $T$  de l'ordre de quelques minutes. L'horaire d'une correspondance est donc anticipé de  $T$  minutes pour la simulation. Dans ce cas, une surveillance des correspondances est assurée dans chaque nœud. Sur la figure 3.10, nous illustrons l'état du nœud  $C_i$ ,  $T$  minutes avant l'horaire réel d'une correspondance donnée que nous notons  $t_0$ , avec  $t_0 = \text{HoraireCorrespondanceThéorique} - T$ . Autour de  $C_i$ , nous retrouvons un nœud voisin  $C_j$  et un ensemble de lignes du réseau. Sur ces dernières, les positions des véhicules  $\{V_1, V_2, V_3\}$ , concernés par la même correspondance, sont indiquées.

La simulation de l'état réel du nœud  $C_i$ , correspondant à la figure 3.10, commence à partir de l'instant  $t=t_0$ .

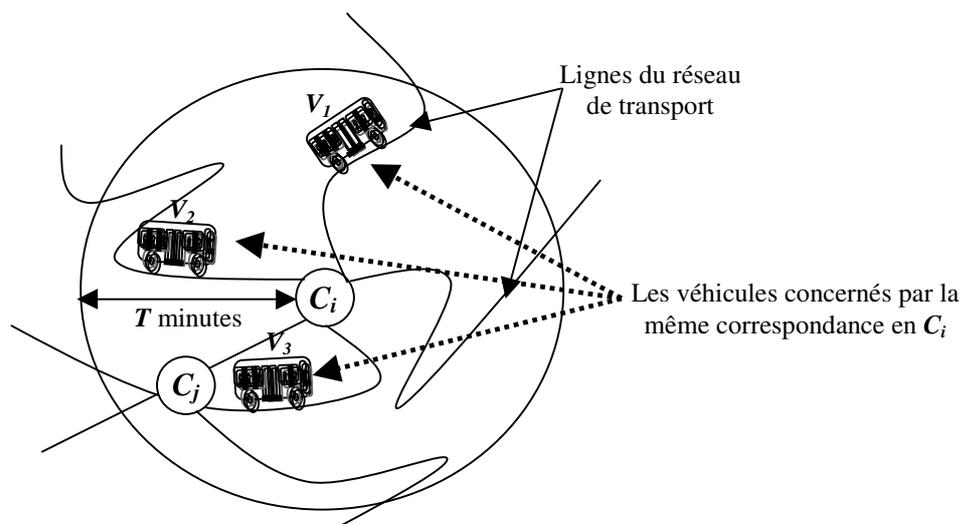
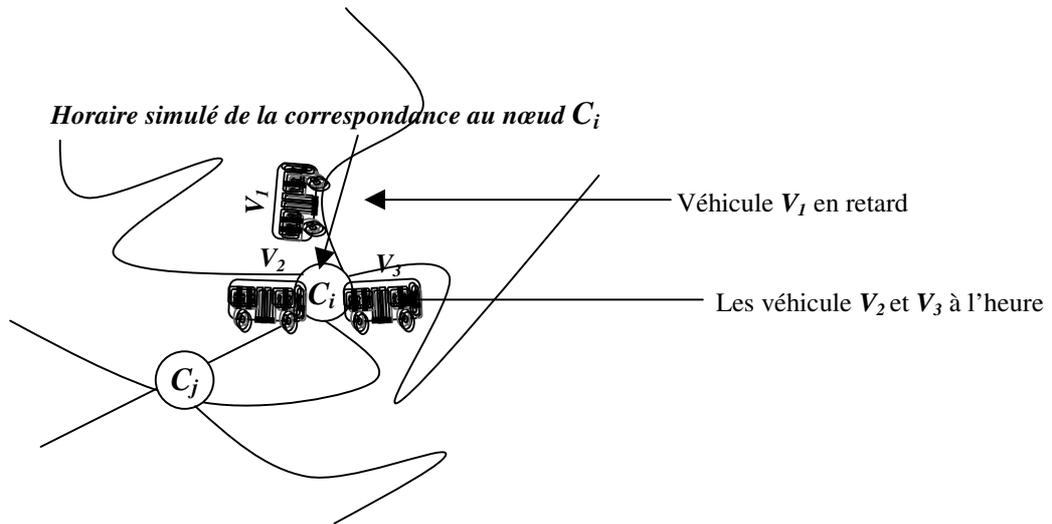


Figure 3.10 : L'état du réseau avant une correspondance au nœud  $C_i$  de  $T$  minutes

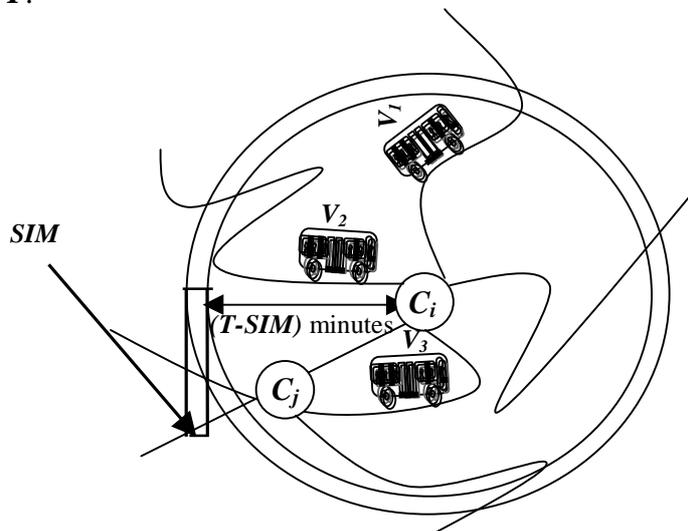
Après un temps de simulation, à l'instant  $t=t_1$ , avec  $t_1=t_0+SIM$ , où  $SIM$  représente le temps de la simulation de l'instant  $t_0$  à l'instant  $t_1$ , nous vérifions l'état du nœud. Les positions simulées

des véhicules concernés par cette correspondance sont déterminées (figure 3.11). Par exemple, on constate que le véhicule  $V_1$  est en retard et les véhicules  $\{V_2, V_3\}$  sont à l'heure pour la correspondance en nœud  $C_i$ .



**Figure 3.11 : L'état simulé du nœud  $C_i$  par rapport à l'horaire réel simulé de la correspondance concernée**

En réalité, nous anticipons l'horaire réel de la correspondance de  $(T-SIM)$  minutes (figure 3.12). Dans ce cas,  $SIM=(t_1-t_0)$ . Le temps de la simulation globale  $SIM$  doit être négligeable par rapport à  $T$ .



**Figure 3.12 : L'état réel du réseau par rapport au nœud  $C_i$  après un temps de simulation  $SIM$**

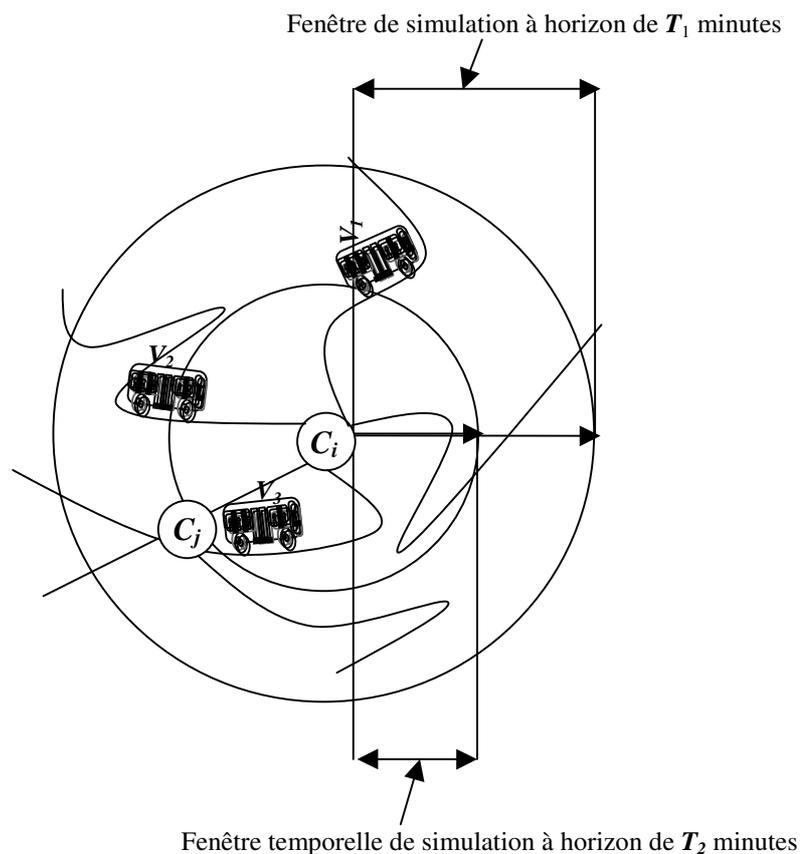
A l'instant  $t_1$ , nous détectons les véhicules en difficulté : par exemple, en retard ou en avance par rapport à l'horaire réel simulé. Nous pouvons, ainsi, décider quelles sont les décisions à prendre pour éviter d'éventuelles perturbations. Les décisions pertinentes retenues sont alors présentées au régulateur.

Pour la simulation, le régulateur peut intervenir dans les trois cas suivants :

- Formuler des demandes de simulations afin d'obtenir l'état d'un nœud de correspondances à un moment donné de la journée et ainsi pouvoir réagir de manière préventive.
- Changer le rayon de la fenêtre temporelle de simulation au niveau d'un nœud de correspondances, en agrandissant le cercle temporel.
- Choisir et prendre des décisions dans le processus de la régulation.

Le temps de simulation par anticipation, en prenant en compte la prise de décisions et le calcul des conséquences de ces décisions, doit être négligeable par rapport au temps ( $T-SIM$ ) qui reste pour la réalisation effective d'une correspondance. Ce temps de simulation est une contrainte temporelle qu'il faut obligatoirement respecter.

Dans ce laps de temps, plusieurs simulations peuvent s'effectuer au niveau d'un nœud de correspondances avec des fenêtres temporelles différentes ; car il peut y avoir plusieurs correspondances au niveau d'un nœud à un instant donné (ou à des instants différents) de la journée. Dans figure 3.13, on a deux fenêtres avec des temps d'anticipation  $T_1$  et  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ).



**Figure 3.13 : La représentation macroscopique d'un nœud de correspondances dans le temps**

Dans la suite de notre étude, nous définissons les agents constituant le système multi-agent proposé. Ces agents sont identifiés selon leurs rôles dans le processus de contrôle. En effet, rappelons que notre objectif principal vise à respecter les horaires des correspondances et le

maintien de stabilité relative du réseau de transport dans sa totalité et dans les conditions normales ou perturbées.

### 3.3.3.2 DESCRIPTION DES AGENTS

Les agents peuvent être des entités physiques qui agissent sur le monde réel ou des programmes informatiques que l'on désigne par des entités virtuelles comme dans la définition d'un agent donnée par N.R. Jennings [Jennings & *al.*, 98]. Dans ce cas, nous nous intéressons à ce dernier type d'agent. Il n'existe pas de consensus sur la méthode à utiliser pour déterminer les agents (agentification).

Dans le chapitre 1, nous avons vu que les Systèmes d'Aide à l'Exploitation (SAE) assurent, en temps réel, le suivi d'un réseau de transport urbain. Le suivi est possible grâce aux capteurs installés au niveau des arrêts de régulation, des terminus et des nœuds de correspondances. Ainsi, une perturbation peut être détectée en comparant les horaires théoriques et les horaires réelles. Les rôles des agents consistent à :

- Détecter au plus tôt des perturbations au niveau des nœuds de correspondances ;
- Anticiper la résolution des perturbations au niveau d'un nœud de correspondances ;
- Assurer le dialogue entre le régulateur et les agents.

Pour cette modélisation, nous considérons les terminus au même niveau que les arrêts de régulation. Les arrêts de régulation sont équipés de capteurs. Ces derniers permettent la localisation des véhicules. Parfois, dans certains réseaux de transport urbain, les dépôts peuvent aussi jouer le rôle d'un arrêt de régulation ou d'un terminus (comme dans le réseau actuel de Valenciennes).

Pour anticiper la détection des perturbations au niveau des nœuds de correspondances, nous définissons un seul type d'agent au niveau des arrêts de régulation (terminus aussi ou dépôt dans d'autres réseaux de transport) appelé agent ACQUISITION. Ce type d'agent est destiné, essentiellement à l'acquisition des informations sur les passages des véhicules.

Pour anticiper la résolution des perturbations et assurer la micro-régulation au niveau des nœuds de correspondances, nous définissons un type d'agent appelé agent CORRESPONDANCE. Ce type d'agent propose des solutions pertinentes pour la résolution des perturbations et joue le rôle de décideur au niveau d'un nœud de correspondances. Les agents de ce type ont la possibilité de communiquer entre eux pour coordonner leurs décisions (coopération) afin d'éviter d'éventuels conflits.

Pour assurer le dialogue entre le régulateur et le système multi-agent, nous définissons un type d'agent appelé agent SUPERVISEUR. Il est chargé de l'échange d'informations décisionnelles entre les agents CORRESPONDANCE et le régulateur.

Les véhicules et les conducteurs sont des objets faisant partie de l'environnement des agents.

### 3.3.3.2.1 AGENT ACQUISITION

Chaque agent ACQUISITION est une unité élémentaire de traitement de l'information relative à un arrêt de régulation. Comme nous l'avons déjà précisé, ce type d'agent englobe les arrêts terminus, les arrêts de régulation et parfois les dépôts. Un agent ACQUISITION connaît sa position dans le réseau en tant que représentant d'un arrêt de régulation.

Les agents ACQUISITION prennent en charge l'enregistrement des paramètres liés aux passages des véhicules aux arrêts de régulation, afin de répondre aux requêtes des agents CORRESPONDANCE. Ces derniers ont besoin de connaître les positions des véhicules dans le réseau et des informations concernant ces véhicules.

Nous définissons pour les agents ACQUISITION les rôles suivants :

- Enregistrement des horaires des passages des véhicules et les informations concernant ces véhicules (nombre de passagers à bord, etc.).
- Mise à jour des informations concernant les passages des véhicules.
- Traitement des requêtes des agents CORRESPONDANCE.

### 3.3.3.2.2 AGENT CORRESPONDANCE

Les agents CORRESPONDANCE jouent un rôle très important dans la détection des perturbations, le diagnostic et la détermination d'un ensemble de décisions pour les résoudre. Les fonctions essentielles accomplies par un agent CORRESPONDANCE sont les suivantes :

- Effectuer des tâches de simulations pour anticiper l'apparition des perturbations.
- Gérer les événements internes et les messages envoyés par ses accointances.
- Envoyer des messages à ses accointances.

### 3.3.3.2.3 AGENT SUPERVISEUR

L'agent SUPERVISEUR a la mission d'interfacer entre le Système d'Aide à la Régulation des Correspondances, appelé SARC, et le régulateur. Il présente les décisions au régulateur et transmet les demandes aux agents. Son rôle consiste à :

- Traiter des messages transmis par le régulateur et les agents CORRESPONDANCE.
- Envoyer des messages vers le régulateur et les agents CORRESPONDANCE.

### 3.3.3.3 DÉFINITION DES INTERACTIONS

Les interactions possibles entre ces trois types d'agents sont :

- Les agents ACQUISITION transmettent les informations sur les passages des véhicules aux agents CORRESPONDANCE.
- Les agents CORRESPONDANCE demandent des informations aux agents ACQUISITION et fournissent les décisions à prendre à l'agent SUPERVISEUR. Une coopération entre les agents CORRESPONDANCE est envisagée pour échanger des messages d'informations et de décisions afin d'éviter d'éventuels conflits.
- L'agent SUPERVISEUR transmet les décisions des agents CORRESPONDANCE au régulateur afin de les valider. Il leur transmet aussi les requêtes faites par le régulateur.

Nous venons de définir les interactions possibles entre les agents et le régulateur afin d'identifier les accointances des agents.

#### 3.3.3.3.1 AGENT ACQUISITION

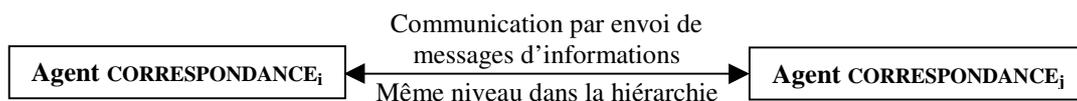
Les agents ACQUISITION ne possèdent pas d'accointances. Ils répondent seulement aux requêtes faites par des agents CORRESPONDANCE.

Les agents ACQUISITION communiquent avec les agents CORRESPONDANCE en répondant à leurs requêtes. Le rôle d'un agent ACQUISITION est très important vu les informations qu'il peut fournir à des agents CORRESPONDANCE dans le choix des décisions.

### 3.3.3.3.2 AGENT CORRESPONDANCE

Les accointances d'un agent CORRESPONDANCE sont les agents CORRESPONDANCE qui lui sont reliés par une ligne, l'agent SUPERVISEUR et l'ensemble d'agents ACQUISITION qui se trouvent à l'intérieur la fenêtre temporelle de simulation de l'agent CORRESPONDANCE concerné.

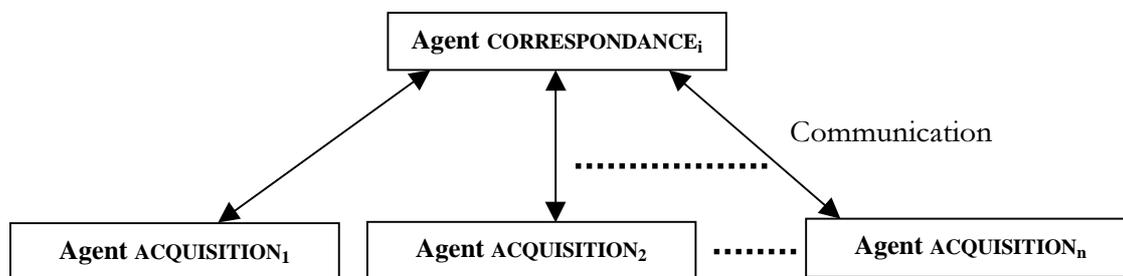
La communication d'un agent CORRESPONDANCE s'effectue avec un groupe d'agents CORRESPONDANCE concernés par les décisions déterminées au niveau du nœud qu'il représente (figure 3.14).



**Figure 3.14 : La communication entre des agents CORRESPONDANCE**

Un agent CORRESPONDANCE envoie les décisions prises à l'agent SUPERVISEUR. Ce dernier propose des requêtes de simulations à un agent CORRESPONDANCE ou à un ensemble d'agents CORRESPONDANCE.

Un agent CORRESPONDANCE établit des requêtes d'informations aux agents ACQUISITION. Un agent ACQUISITION transmet aux agents CORRESPONDANCE les paramètres liés aux véhicules et à leurs passages (figure 3.15).



**Figure 3.15 : La communication entre un agent CORRESPONDANCE et des agents ACQUISITION**

### 3.3.3.3.3 AGENT SUPERVISEUR

Cette partie représente les communications possibles entre l'agent SUPERVISEUR et ses accointances (les agents correspondances et le régulateur).

L'agent SUPERVISEUR présente au régulateur les décisions (actions) et/ou l'état du réseau après une simulation réalisée par les agents CORRESPONDANCE (figure 3.16).

Par contre, le régulateur peut établir des requêtes de simulations pour prédire l'état du réseau après avoir effectué quelques modifications au niveau du tableau de marche (prises d'autres actions, par exemple : décaler quelques départs, suppression d'un départ, ...) ou imaginer des défaillances éventuelles, etc.

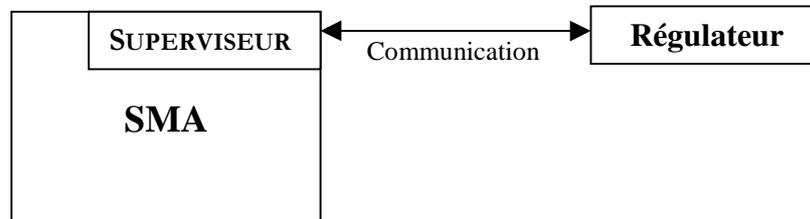


Figure 3.16 : La communication entre SARC et le régulateur par le biais de l'agent SUPERVISEUR

L'agent SUPERVISEUR transmet les requêtes du régulateur aux agents CORRESPONDANCE.

Les agents CORRESPONDANCE transmettent à l'agent SUPERVISEUR les décisions pertinentes à prendre au niveau d'un nœud de correspondances (figure 3.17).

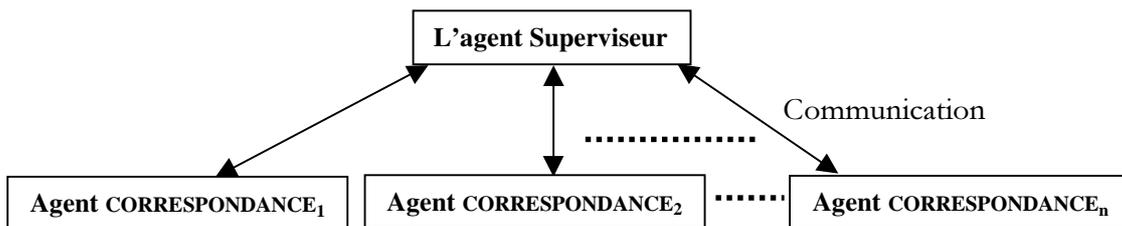


Figure 3.17 : La communication entre l'agent SUPERVISEUR et les agents CORRESPONDANCE

### 3.3.3.4 DESCRIPTION DE L'ORGANISATION

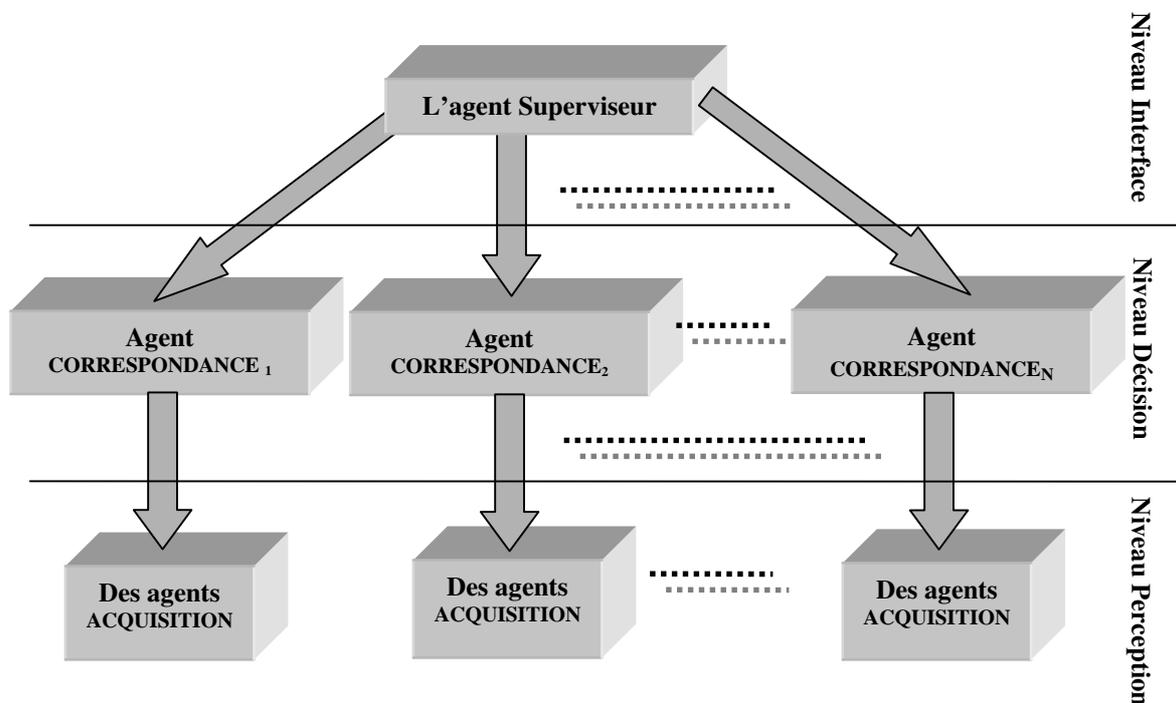
La question de l'organisation se pose dans notre étude. Il existe des dépendances fonctionnelles inhérentes à l'accomplissement collectif de la tâche considérée : la mise en œuvre d'un comportement de résolution individuelle affecte ou est affectée par les comportements mis en œuvre par d'autres agents. L'ensemble de ces dépendances constitue le couplage du problème d'organisation sous-jacent à l'accomplissement de la tâche. Dans [Collinot & al., 96], les auteurs distinguent deux types de couplage selon la mise en situation des dépendances. Soit il n'y a pas de concurrence à gérer entre les comportements de résolution. Dans ce cas, le couplage est statique. L'organisation entre les agents est statique et le concepteur peut la définir à l'avance. Soit il y a une forme de concurrence à gérer : pour une situation donnée, il existe des comportements de résolution équivalents ou un même comportement peut être mis en œuvre par différents agents. Dans ce dernier cas, le couplage est dynamique : l'organisation ne peut pas être définie à l'avance puisqu'elle dépend du

contexte. Alors, le concepteur ne peut s'intéresser aux structures d'organisation entre les agents, qui ne sont concrétisées que dans le contexte de la résolution.

Dans la modélisation proposée, nous avons trois types d'agents ayant des rôles différents. Il n'existe pas de concurrence entre eux. Par contre, entre les agents du même type, il peut y avoir une concurrence. Dans le type d'agent CORRESPONDANCE, les agents sont chargés de la partie décisionnelle. Une négociation entre les agents de ce type est envisagée pour éviter d'éventuels conflits. Ainsi, les agents se dotent des mêmes comportements. Dans ce cas, l'organisation entre ces agents est dynamique et sa détermination s'établit au moment de la résolution d'une perturbation.

Le problème ne se pose pas pour les types d'agents : ACQUISITION et SUPERVISEUR. Les agents ACQUISITION ne communiquent pas entre eux malgré leurs comportements identiques.

Puisque nos trois types d'agents n'ont pas les mêmes comportements, nous proposons une organisation statique. Cette organisation statique fait l'objet d'une modélisation d'un réseau de transport urbain destinée pour la régulation des correspondances en respectant la représentation vue par les correspondances (figure 3.9). La modélisation multi-agent proposée est hiérarchique [Laïchour & al., 02b] (figure 3.18).



**Figure 3.18 : La modélisation d'un réseau de transport urbain par un SMA hiérarchique**

Nous retrouvons les trois niveaux dans cette approche :

- Niveau Interface : Ce niveau représente l'agent SUPERVISEUR, chargé du dialogue avec le régulateur.

- Niveau Décision : Ce niveau représente les agents CORRESPONDANCE, responsables de la partie décisionnelle.
- Niveau Perception : Ce dernier niveau représente les agents ACQUISITION, destinés à la perception de leur environnement, c'est-à-dire aux passages des véhicules et éventuellement aux informations sur ces mêmes véhicules.

### 3.3.3.5 DÉFINITION DE L'ENVIRONNEMENT

L'environnement du SMA proposé est représenté par les objets suivants :

- Le SAE : il fournit des informations aux agents ACQUISITION pour la localisation des véhicules sur le réseau de transport.
- Le régulateur : il formule des requêtes d'information ou de décision à l'agent SUPERVISEUR. Ce dernier fournit au régulateur des informations et des décisions. Ces décisions sont appliquées sur les couples conducteur-véhicule du réseau de transport. Le SMA agit sur ces objets indirectement par l'intermédiaire du régulateur.

Cet environnement multi-agent repose sur les interactions existantes entre les différents agents, le régulateur et le SAE.

## 3.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons parcouru les travaux réalisés dans le domaine du transport urbain utilisant les systèmes multi-agents. Nous nous sommes intéressés aux travaux concernant les réseaux de transport urbain.

Nous avons proposé une modélisation multi-agent destinée à la régulation du trafic au niveau des correspondances [Laïchour & *al.*, 03]. Cette modélisation se constitue de trois types d'agents : agent ACQUISITION un pour chaque arrêt de régulation, agent CORRESPONDANCE un pour chaque nœud, et l'agent SUPERVISEUR comme interface avec le régulateur. Nous avons utilisé l'approche Voyelles pour la conception du système multi-agent. Cette approche a été choisie pour sa souplesse. Pour la conception, nous avons suivi le cadre méthodologique préconisé par la méthode Cassiopée.

Ce chapitre est le cœur de notre contribution à la modélisation en vue de la prévention des perturbations.

## CHAPITRE 4

# RÉGULATION DES CORRESPONDANCES

4.1	INTRODUCTION.....	106
4.2	CORRESPONDANCES .....	107
4.3	RÉGULATION .....	113
4.4	RÉGULATION DES CORRESPONDANCES .....	125
4.5	MODÈLE INTERNE D'UN AGENT CORRESPONDANCE.....	135
4.6	CONCLUSION.....	137

## CHAPITRE 4

# RÉGULATION DES CORRESPONDANCES

## 4.1 INTRODUCTION

La nature d'un réseau de transport urbain nécessite une gestion efficace du trafic. Une stratégie de régulation doit permettre la réalisation des objectifs d'exploitation malgré l'existence d'éventuelles perturbations. Parmi les objectifs d'exploitation, nous citons :

- Le respect des correspondances.
- Le respect des horaires théoriques aux arrêts (la ponctualité).
- L'évitement des trains de bus (la régularité).
- La réalisation des spécificités de confort et de sécurité pour les clients.

Pour le respect de ces objectifs, la régulation est nécessaire en cas de perturbations. Nous classons la régulation selon trois types : la régulation active, la régulation passive et la régulation préventive.

Les régulateurs utilisent actuellement, dans les réseaux de transport urbain équipés d'un SAE, la régulation active. Cette dernière consiste à localiser les perturbations par la visualisation et agir avant que la perturbation ne dégénère davantage. Dans ce type de régulation, on compte principalement sur le système de localisation et sur la vigilance du régulateur.

Par contre, il existe un autre type de régulation appelé la régulation passive qui consiste dans la constatation tardive des perturbations. Dans ce cas, une perturbation est traitée de manière ponctuelle et expéditive sans prendre en compte le coût lié aux déplacements. En général, ce type de régulation n'est plus utilisé dans les réseaux de transport modernes.

Dans notre étude sur la régulation des correspondances, nous souhaitons utiliser un autre type de régulation appelé la régulation préventive. Elle consiste à anticiper une perturbation avant son "apparition" réelle dans le réseau de transport surveillé. C'est sur ce type de régulation que nous concevons le système d'aide à la décision SARC. Dans ce type de régulation, nous utilisons le système de localisation mais le régulateur n'intervient que pour donner un avis et pour choisir ce qu'il lui convient comme actions de régulation (décision). SARC est donc préventif et interactif. La prévention est surtout basée sur la simulation. Le processus de

contrôle par anticipation a d'ailleurs été présenté dans le chapitre 3. Nous avons abordé le fonctionnement préventif du processus et l'aide apportée au régulateur.

La modélisation multi-agent proposée opère selon différents niveaux. Dans ce chapitre, nous insistons sur le niveau décision basé sur les agents CORRESPONDANCE [Laïchour & *al.*, 01b]. Tout d'abord, nous discutons des correspondances dans les réseaux de transport urbain : la notion de correspondance, leur impact sur les voyageurs, leur gestion et la représentation d'un nœud de correspondances. De plus, nous décrivons la régulation du point de vue décisionnel, c'est-à-dire les critères de décisions, les types de régulation, etc. Puis, nous présentons les algorithmes usuels de régulation des réseaux d'autobus. Ensuite, nous présentons deux algorithmes pour la régulation des correspondances : le premier proposé dans [Soulhi, 00] et le deuxième que nous introduisons. Nous citons ainsi les critères et les actions de régulation applicables au niveau d'un nœud de correspondances pour le choix des décisions. Nous donnons, enfin, le modèle agent représentatif de l'architecture interne d'un agent CORRESPONDANCE.

## 4.2 CORRESPONDANCES

La mobilité des hommes est aujourd'hui un phénomène majeur à tous les niveaux, qu'il s'agisse des déplacements domicile-travail, intra-urbain, ou qu'il s'agisse des déplacements des ruraux attirés par les villes ou des citadins en mal de campagne.

La technologie n'arrive pas à faire face aux évolutions de mentalité du voyageur qui est de plus en plus exigeant ; en tant que voyageur, il n'accepte pas d'être traité comme une marchandise et en tant que client, il se plie très difficilement à la discipline des files d'attentes.

Si les exigences en matière de confort et de sécurité deviennent de plus en plus grandes, ce sont la vitesse et la rapidité du transport qui retiennent le plus l'attention. Pour cela, les exploitants de réseaux de transport urbain n'hésitent pas à connecter les lignes entre elles pour former un maillage.

La connexion consiste en l'établissement d'un lien ou d'une liaison entre deux points ou deux axes du réseau d'un même moyen de transport. Elle peut être réalisée de deux manières :

- Par adjonction d'un tronçon.
- Par l'amélioration du fonctionnement des stations mises en jeu lors de la correspondance : c'est-à-dire, organiser le jeu des correspondances de façon optimale, de sorte que le voyageur se rendant d'un point à un autre, en changeant de véhicules, perde le moins de temps possible en transit. Cette connexion ponctuelle est par définition spatio-temporelle.

La correspondance fait donc partie intégrante de la chaîne des transports urbains. Elle doit être soumise aux mêmes exigences de qualité de service que les autres maillons de cette chaîne. Ce sont les critères de vitesse et de confort qui structurent la correspondance afin de la rendre optimale pour le voyageur.

Il existe un deuxième type de connexion appelé l'interconnexion. Elle consiste à mettre en relation deux modes de transport différents, à les connecter entre eux, de façon à rendre compatibles les transbordements de l'un à l'autre dans les conditions optimales de temps et d'efficacité. L'interconnexion ainsi conçue traduit la volonté de bâtir un système intégré de transport. Dans ce cas de figure, le réseau de transport urbain est multimodal.

La réunion en un seul lieu comme une grande gare ferroviaire, une autoroute, un réseau de bus, un métro et un grand parking, est appelé pôle d'échange. Ce dernier facilite les déplacements des voyageurs par réduction des temps de parcours et des temps d'attente. Un pôle d'échange est un nœud de correspondances.

#### 4.2.1 NOTION DE CORRESPONDANCE

On définit une correspondance, généralement, comme suit :

---

**Définition 4.1 : (Correspondance)**

Une correspondance s'effectue par l'échange des voyageurs entre deux modes de transports identiques (bus/bus, train/train, tramway/tramway ...) ou différents (bus/train, bus/tramway, tramway/train ...).

---

Cette définition nous donne une idée vague sur la notion de correspondance car nous pouvons parler dans ce cas de transbordement. Alors, nous suggérons d'ajouter les notions d'espace et de temps afin de distinguer entre correspondance et transbordement. L'espace d'une correspondance est un lieu d'échange des voyageurs. Ce lieu est déterminé, généralement, par l'intersection d'au moins deux lignes d'un réseau de transport urbain (maillage). Le temps de la correspondance est la date (ou l'instant) à laquelle aura lieu la correspondance. Cet instant est déterminé, généralement, après avoir déterminé les horaires des lignes du réseau de transport urbain.

Ceci permet de donner une autre définition d'une correspondance qui est :

---

**Définition 4.2 : (Correspondance)**

Une correspondance est un endroit d'échange de voyageurs entre deux modes de transport à une date donnée. Donc, une correspondance est par définition spatio-temporelle [Laïchour & *al.*, 01c].

---

Dans les réseaux de transport équipés par un SAE, il existe trois types de correspondances selon les moyens de transport utilisés [Laïchour & *al.*, 01d] :

- Véhicule SAE avec un véhicule SAE : Dans ce cas, les deux véhicules sont localisés par le régulateur grâce au SAE. Ainsi, le régulateur peut s'assurer de la réalisation ou non d'une correspondance.
- Véhicule SAE avec un véhiculé affrété : Dans ce cas, les deux véhicules essaient de respecter le plus possible l'horaire théorique.
- Véhicule SAE avec un train : Dans ce cas, le véhicule SAE subit la contrainte temporelle imposée par le train comme dans le cas précédent.

On retrouve ces types de correspondances dans les réseaux de transport urbain multimodal.

#### 4.2.2 IMPACT DES CORRESPONDANCES SUR LES VOYAGEURS

Dans [Durrande-Moreau, 94], la qualité du service offert par des entreprises de service (en particulier, les entreprises de transport des voyageurs), et la perception du temps par les êtres humains ont été étudiés.

Dans les réseaux de transport urbain, les exploitants cherchent à proposer des prestations qui répondent aux besoins de la clientèle. Alors, ils procèdent au sondage des désirs des voyageurs et de leurs perceptions afin d'améliorer la qualité du service offert. La qualité de service perçue par le client dépend, d'une part de la réalité de la qualité du service délivré, d'autre part de la manière dont l'individu a interprété cette réalité. La relation entre le réel et le perçu est intéressante car elle caractérise la relation entre le prestataire et le client. Certains auteurs proposent des systèmes multiples de perception du temps. Cependant, le découpage le plus utilisé consiste à ne retenir que le temps objectif et le temps subjectif :

- Le temps objectif est celui mesuré par les horloges, que l'on peut comparer, ajouter, multiplier.
- Le temps subjectif est celui des individus qui vivent une situation de façon plus ou moins intense, plus ou moins individuelle ou collective. Il est élastique et flexible ; car il y a des individus qui sont plus ou moins sensibles au temps, certains sont pressés, d'autres sont plus patients.

Compte tenu de ces aspects temporels et de la perception d'un voyageur, les notions affectant le voyageur lors de son trajet avec correspondances sont les suivants [Soussaul, 98] : l'allongement du temps de parcours, l'accroissement de la complexité du déplacement et le stress induit.

#### **4.2.2.1 ALLONGEMENT DU TEMPS DE PARCOURS**

Les voyageurs comparent le déplacement en correspondance à un déplacement idéal à attente nulle (par exemple, en voiture personnelle).

Le temps d'attente correspond à un moment particulier du voyage. Il est souvent ressenti comme un problème, surtout par le voyageur qui préférerait être servi sans délai.

- Le temps d'attente est toujours surestimé pour des raisons suggestives.
- Le temps d'attente, déjà considéré comme du temps perdu, induit chez le client une sensation de malaise aggravée par l'inconfort des stations d'échanges, la monotonie de l'environnement et l'ennui.

La non-fiabilité des correspondances et les expériences passées incitent les voyageurs à prendre des temps de précaution supplémentaires.

#### **4.2.2.2 ACCROISSEMENT DE LA COMPLEXITÉ DU DÉPLACEMENT**

L'augmentation de la complexité du déplacement modifie le travail de planification demandé aux clients. La préparation de l'itinéraire est plus délicate, de même que la gestion du déplacement en temps réel :

- Pour se déplacer sur un réseau fortement maillé, le voyageur doit lui-même définir son parcours optimal, i.e. identifier les lignes, trouver leurs intersections, évaluer les temps, chercher les horaires de correspondances. Ce raisonnement est perçu comme une difficulté supplémentaire.
- Lors du déplacement, le voyageur doit en permanence suivre sa progression pour repérer la station de correspondances, ensuite, identifier le quai et rester attentif en attendant le bus suivant.

#### **4.2.2.3 STRESS INDUIT**

Une étude suédoise [Durrande-Moreau, 94] effectuée sur le réseau de transport urbain de Stockholm a permis de déterminer l'évolution du stress d'un voyageur lors d'un déplacement effectué dans l'ordre suivant : tout d'abord un trajet à pieds, après un temps d'attente, ensuite

un trajet en transport en commun pour effectuer une correspondance avec retard, puis un trajet en transport en commun pour effectuer une correspondance sans retard, ensuite un trajet en transport en commun et enfin une marche à pieds pour arriver à destination.

Cette étude montre que le voyageur ressent tout au long de son déplacement un stress minimal dû à l'incertitude du transport. Ce stress ressenti par le voyageur est légèrement supérieur aux moments des correspondances que le voyageur perçoit comme incertaines. En effet, lors de la première correspondance, le stress du voyageur a augmenté de façon brusque lorsque celui-ci s'est rendu compte qu'il y aurait du retard et que par conséquent, il n'arriverait pas à destination à l'heure prévue.

Il est donc souhaitable de fournir aux passagers des informations fiables sur lesquelles ils puissent se baser pour modifier leur parcours en cas de perturbations.

### 4.2.3 GESTION DES CORRESPONDANCES

Dans les SAE actuels [Khorovitch & al., 91], un conducteur détient les informations concernant les véhicules avec lesquels la correspondance doit être réalisée. Le non-repérage (absence de visualisation sur l'écran du SAE) d'un véhicule, en correspondance à un arrêt, donne la possibilité au conducteur qui attend (bus attendant) de s'informer auprès du régulateur (par radio) de la position d'un bus attendu.

Les régulateurs suivent en temps réel la réalisation des correspondances en un nœud de correspondances. Sur un écran SAE du suivi en temps réel, le régulateur peut suivre la réalisation d'une correspondance, en choisissant un nœud de correspondances, quelques minutes avant sa réalisation. Il peut, aussi, commander une correspondance entre plusieurs véhicules, quelques minutes avant l'arrivée des véhicules au nœud de correspondances.

En général, dans les réseaux de transport urbain, les horaires des correspondances sont établis afin que les véhicules sortants (les véhicules qui assurent les correspondances) arrivent à l'avance aux nœuds de correspondances (un nœud de correspondances devient alors un vrai centre d'échange). Le véhicule sortant doit impérativement attendre le(s) véhicule(s) entrant(s). Les véhicules sortants/entrants doivent s'attendre mutuellement.

Dans la gestion des réseaux de transport urbain, deux sortes de correspondances sont principalement définies :

- Des correspondances programmées : Ce type de correspondances concerne les horaires déjà établis par les graphiqueurs (TM initial) ou par saisie par anticipation par un régulateur.

- Des correspondances en fonction de l'opportunité : Ce type de correspondances est constaté par les régulateurs quelques minutes avant l'arrivée des véhicules aux nœuds de correspondances. Dans ce cas, le régulateur commande des correspondances réalisables.

Les régulateurs peuvent aussi annuler des correspondances.

#### 4.2.4 REPRÉSENTATION D'UN NŒUD DE CORRESPONDANCES

Nous considérons un nœud de correspondances comme étant un point dans l'espace avec des flux entrants et des flux sortants. Les flux entrants correspondent aux véhicules entrants que nous notons  $VE_i$ . Les flux sortants correspondent aux véhicules sortants que nous notons  $VS_j$ .

Dans la figure 4.1, on a un nœud de correspondances  $C_i$  avec des flux entrants  $VE_i$  et des flux sortants  $VS_j$ .

Pour chaque véhicule entrant  $VE_i$ , il faut connaître :

- $TA_t$  : le temps d'arrivée théorique au nœud de correspondances.
- $TA_r$  : le temps d'arrivée réel au nœud de correspondances.

Et pour chaque véhicule sortant  $VS_j$ , il faut connaître :

- $TD_t$  : le temps de départ théorique du nœud de correspondances.
- $TD_r$  : le temps de départ réel du nœud de correspondances.

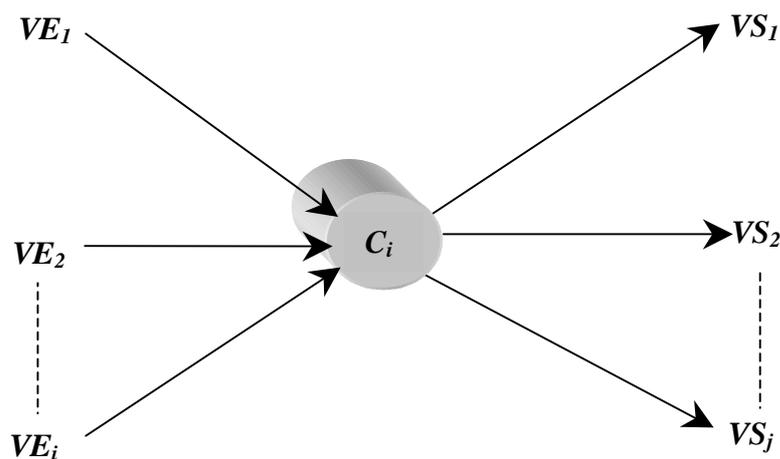


Figure 4.1 : Représentation d'un nœud de correspondances dans l'espace

Ainsi le temps de battement<sup>1</sup> de chaque véhicule se trouvant au niveau du nœud de correspondances  $C_i$  (véhicule entrant  $VE_i$  ou véhicule sortant  $VS_j$ ) :

- $TB_t$  : le temps de battement théorique au nœud de correspondances.
- $TB_r$  : le temps de battement réel au nœud de correspondances.

Les départs des correspondances sont gérés au niveau du nœud de correspondances suivant une file d'attente.

Pour chaque véhicule entrant  $VE_i$  ou véhicule sortant  $VS_j$ , il est nécessaire de connaître les lignes qui relient le nœud de correspondances  $C_i$  aux autres nœuds de correspondances voisins :

Pour les lignes reliant le nœud  $C_i$  à ses nœuds voisins, il faut préciser les propriétés suivantes :

- Les arrêts de régulation.
- La vitesse de circulation maximale et minimale.
- Le temps du parcours.
- Le temps de battement aux arrêts de régulation.
- Le Tableau de Marche : les heures de passage aux arrêts de régulation.
- Les extensions possibles de ces lignes.

Dans cette partie, nous avons introduit la notion de correspondance. Ainsi, nous avons montré l'impact des correspondances sur les voyageurs. Enfin, nous avons représenté un nœud de correspondances dans l'espace. Dans la section suivante, nous présentons la régulation en introduisant la logique de correspondance.

### 4.3 RÉGULATION

Le rôle de la régulation, dans un réseau de transport urbain, est la fonction de contrôle et de correction du mouvement des véhicules du réseau. Sa préoccupation première est de chercher à satisfaire les voyageurs en leur offrant le service approprié.

Les solutions consistant à imposer le retour des véhicules à leurs horaires initiaux de façon expéditive et à tout prix sont, évidemment, des solutions de facilité qui doivent être évitées. De même, les solutions qui s'attachent à maintenir la régularité ou la ponctualité sans se préoccuper de la remise en place des TM théoriques sont, aussi, des mesures à écarter ; car

---

<sup>1</sup> Temps de battement égal au temps d'attente à un arrêt autorisé pour un véhicule dans le TM.

elles deviennent rapidement un remède pire que le mal. En effet, le retour au TM théorique prévu au départ est souhaitable pour garantir à terme le fonctionnement automatique et donc la satisfaction des voyageurs. Mais ce retour doit être le plus transparent possible pour les voyageurs, et donc progressif.

Le principal objectif de la régulation réside essentiellement dans un retour à la normale suite à une perturbation sans que les voyageurs s'en aperçoivent.

### 4.3.1 PROCESSUS DE LA RÉGULATION

L'offre de service dans les réseaux de transport urbain, repose sur un TM théorique conçu à partir des conditions optimales (Chapitre 1). Le respect du TM théorique est appelé processus de régulation. Nous proposons un algorithme décrivant le fonctionnement de la régulation (figure 4.2) [Laïchour & al., 01d].

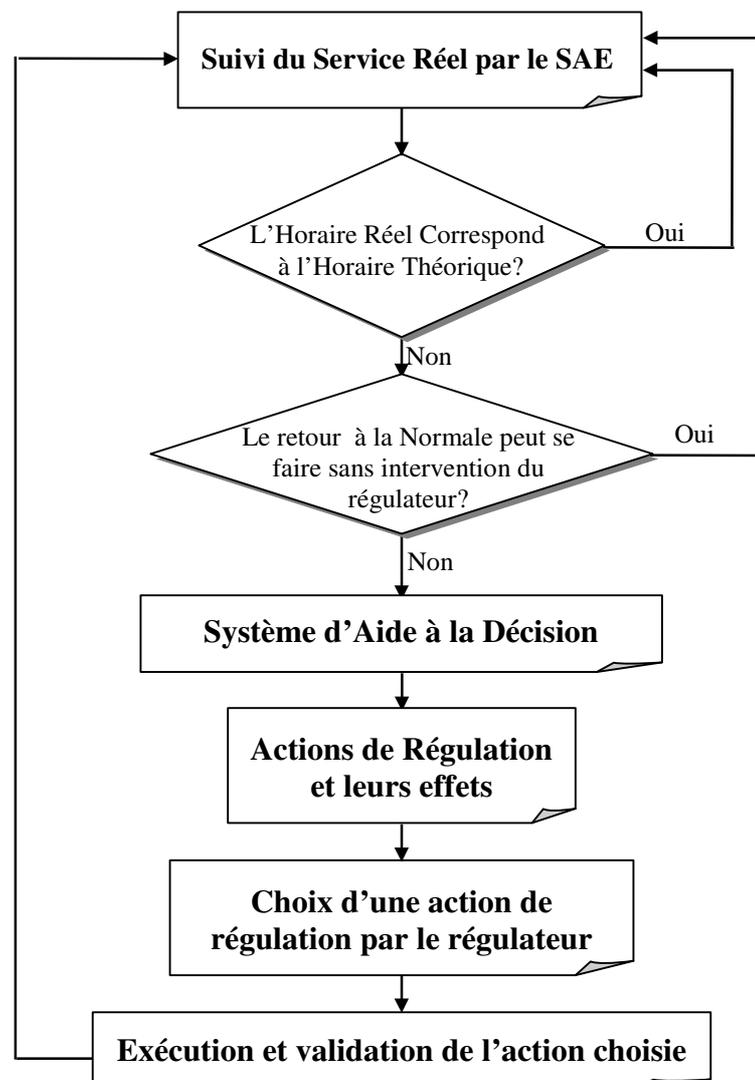


Figure 4.2 : Les étapes du processus de régulation

D'après la figure 4.2, le suivi en temps réel d'un réseau de transport s'effectue par le SAE. En général, une perturbation est signalée au moment où le non-respect des horaires théoriques (les avances ou les retards) par rapport aux horaires réels est produit. Dans le cas d'une perturbation, le régulateur observe si la perturbation est sans conséquence négative sur le réseau, sinon une intervention de sa part est nécessaire afin d'y remédier. Le régulateur peut proposer plusieurs solutions (actions de régulation). Il essaie d'en choisir une qui lui semble la plus adaptée. Les régulateurs se basent dans leurs décisions, en cas de perturbations, sur leur expérience. Mais, il est difficile de prendre en considération toutes les informations concernant une perturbation ainsi que la détermination de plusieurs solutions et les effets de leurs applications. Pour résoudre ce problème, la solution consiste à proposer au régulateur un Système d'Aide à la Décision (SAD). Ce dernier doit être capable de prendre en considération toutes les informations concernant une perturbation et de proposer les solutions pertinentes ainsi que leurs effets sur le réseau. Le SAD est un moyen d'aide au régulateur afin de lui faciliter sa tâche de régulation.

### 4.3.2 COMPOSITION DES LOGIQUES DE RÉGULATION

Le choix de la logique (chapitre 1) dépend principalement du moment de la journée mais peut dépendre également du lieu de l'intervention [Balbo, 00]. Une ligne peut ainsi être gérée en logique d'enlèvement de la charge et de régularité en journée, puis en logique d'enlèvement de la charge et de ponctualité la nuit. Dans la journée, ce cas correspond à une charge importante, également répartie sur l'ensemble d'une ligne du réseau. Il faut assurer une offre importante en continu. Durant la période nocturne, la charge est également importante mais ponctuelle, il s'agit ici d'offrir une offre organisée sous la forme de rendez-vous avec la demande.

De plus, sur une même ligne, certaines courses peuvent être soumises à des logiques particulières. Par exemple, les premières courses de la journée peuvent être soumises à une logique de ponctualité. L'offre étant faible à ces heures de la journée, il est important que les voyageurs puissent obtenir le passage d'un véhicule à l'heure prévu.

La prise en compte des logiques de régulation, ainsi que leur composition modifient la tâche de la régulation. Elle est cependant nécessaire à une gestion fine du réseau. L'objectif n'est plus de se rapprocher d'un horaire théorique immuable, ne correspondant plus à la réalité, mais de remplir au mieux les objectifs à l'origine de ces horaires.

### 4.3.3 IMPORTANCE DES LOGIQUES DE RÉGULATION

Le régulateur doit, dans la globalité du processus de décision, prendre en compte la logique inhérente à la création des courses qui constitue le Tableau de Marche et qu'il est susceptible de modifier.

L'introduction de la notion de logique de régulation [Rizzi & al., 89][Rizzi & al., 97], concept nouveau pour la régulation en temps réel, consiste à relativiser l'importance à accorder à une perturbation. Dans une logique de régularité, le retard d'un véhicule peut ne pas porter à conséquence si ce retard est constant sur l'ensemble de la ligne et ne modifie pas de manière significative l'écart horaire entre les véhicules. Au contraire, dans une logique de ponctualité, le moindre retard a son importance et nécessite une intervention du régulateur au plus tôt.

Le régulateur doit également prendre en compte la logique courante dans le choix des procédures de régulation qu'il met en place. Il ne modifie pas ainsi la course d'un véhicule assurant un service en logique de ponctualité s'il ne lui trouve pas de remplaçant. S'il choisit de détourner un véhicule assurant un service en logique de régularité, il essaie de répercuter ce changement sur les autres véhicules de la ligne concernée afin de conserver un écart horaire constant entre les véhicules restants. Il ne s'agit ici que de quelques exemples dont l'objectif est de montrer comment la tâche de la régulation est modifiée par la prise en compte de ces logiques.

La définition de la régulation proposée dans le chapitre 1 (définition 1.2) "la régulation comme étant un ensemble des méthodes permettant de se rapprocher au plus près du Tableau de Marche initial malgré les perturbations", n'est plus valable à partir du moment où le Tableau de Marche n'est plus respecté à cause des logiques de régulation à suivre. La définition de la régulation devient alors comme suit (définition 4.3) :

---

**Définition 4.3 : (Régulation)**

La régulation est l'ensemble des mesures permettant de respecter non plus le Tableau de Marche en tant que table d'horaires, mais de respecter les règles de gestion qui ont amené à la définition de celui-ci [Balbo, 00].

---

Cette définition de la régulation s'applique essentiellement en cas d'importantes perturbations du réseau de transport. Dans ce cas, il est plus important d'assurer les objectifs du Tableau de Marche (par le respect des logiques de régulation) que le Tableau de Marche initial qui peut être très éloigné de la situation courante.

#### 4.3.4 LOGIQUE DE CORRESPONDANCE

Dans le chapitre 1, nous avons abordé les logiques de régulation existantes. Nous avons présenté quatre logiques de régulation : enlèvement de la charge, régularité, ponctualité et gestion du personnel. A ces logiques, nous ajoutons, ici, la logique de correspondance.

Cette logique est présente lorsqu'il existe des échanges de voyageurs entre deux lignes du réseau ou bien entre une ligne du réseau et un autre mode de transport indépendant de l'exploitation situé en amont ou en aval de celle-ci (c'est le cas pour les lignes de bus desservant une gare de chemin de fer, un aéroport, voire un métro). L'objectif avoué est de minimiser le temps de correspondance des voyageurs en transit.

Les logiques de régulation représentent les objectifs de l'exploitation d'un réseau de transport urbain. L'existence de plusieurs objectifs amène éventuellement le régulateur à pratiquer un arbitrage entre ces objectifs (Tableau 4.1). Dans la tableau 4.1, une table d'arbitrage dressée entre les différentes logiques de régulation est établie [Rizzi & al., 97].

**Tableau 4.1 : Arbitrage entre les objectifs de la régulation**

#### Objectifs complémentaires

	<b>Enlèvement de la charge</b>	<b>Régularité</b>	<b>Ponctualité</b>	<b>Correspondance</b>	<b>Gestion du personnel</b>
<b>Enlèvement de la charge</b>		Demande répartie sur toute la ligne	Demande réelle telle que prévue	Demande principale avant la correspondance	Demande dans le secteur du point de relève
<b>Régularité</b>	Demande concentrée en une zone		Ligne à l'heure	Intervalles compatibles sur les deux modes	Ligne à l'heure
<b>Ponctualité</b>	Demande réelle différente de celle prévue	Ligne en retard		Ligne amont à l'heure	Ligne à l'heure
<b>Correspondance</b>	Demande principale après la correspondance	Intervalles incompatibles sur les deux modes	Ligne amont en retard		Services agents relevés sur la ligne amont
<b>Gestion du personnel</b>	Demande à l'opposé du point de relève	Ligne en retard	Ligne en retard	Services agents relevés sur la ligne aval	

#### Objectifs contradictoires

#### 4.3.5 CRITÈRES DE LA RÉGULATION LIÉS AUX LOGIQUES DE RÉGULATION

A la RATP, on a défini des critères liés au travail de la régulation [Rizzi & al., 89]. La notion de critère est à rapprocher de celle d'objectif dans la mesure où les points de vue considérés par un décideur (régulateur) correspondent implicitement aux objectifs que celui-ci cherche à satisfaire.

La détermination des critères de la régulation doit se fonder sur les principes suivants :

- Chercher des critères isolant le travail de la régulation du reste du processus d'exploitation.
- Partir des objectifs fixés par le régulateur, c'est-à-dire des logiques de régulation définies, et non pas du TM car on a vu qu'il ne peut pas être considéré comme une norme absolue.

#### 4.3.5.1 CRITÈRE RELATIF À LA LOGIQUE D'ENLÈVEMENT DE LA CHARGE

Le critère le plus naturel pour prendre en compte cette logique est le nombre de voyageurs en attente à l'arrêt, noté  $ENL$ , et que le régulateur doit chercher à minimiser.

Dans le cas de recueil de données sur le terrain, il est impossible de couvrir la totalité des arrêts de la ligne. On effectue un comptage à l'arrêt critique dans le sens de la plus grande charge aux périodes horaires où cette logique est dominante pour la ligne considérée (pointe du matin et de l'après-midi essentiellement).

#### 4.3.5.2 CRITÈRE RELATIF À LA LOGIQUE DE RÉGULARITÉ

Le coefficient d'irrégularité  $IREG$  est défini par J.L. DORAS [Rizzi & al., 89] par la formule suivante :

$$IREG = V(I)/E(I)^2$$

Où  $V(I)$  est la variance des intervalles réels et  $E(I)$  leur moyenne en un point d'arrêt donné de la ligne qui peut servir de base à la construction d'un critère de régularité.

Ce coefficient est égal à 0 si la régularité est parfaite, à 1 si les voitures sont groupées deux par deux, à 2 si elles sont groupées trois par trois, etc.

**Exemple1:** Sur la figure 4.3, la régularité est maintenue entre les véhicules.

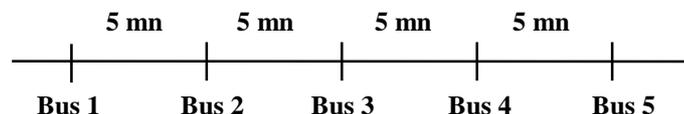
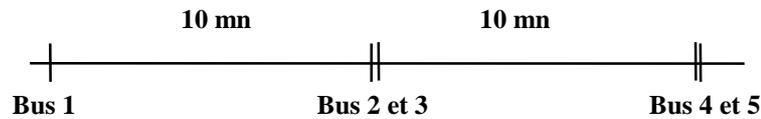


Figure 4.3 : La régularité entre les véhicules

En appliquant la formule citée ci-dessus, on a la variance des intervalles égale à zéro et leur moyenne au carré égale à 25, alors on obtient  $IREG = 0/25 = 0$ .

**Exemple2:** Sur la figure 4.4, le groupement des véhicules deux à deux s'est produit (bus 2 avec bus 3 et bus 4 avec le bus 5).



**Figure 4.4 : Le groupage des véhicules**

Dans cet exemple, on a la variance des intervalles égale à 25 et leur moyenne au carré égale à 25, alors on obtient  $IREG = \frac{25}{25} = 1$ .

**Remarque:** La minimisation de ce coefficient permet de minimiser l'attente des voyageurs et d'optimiser le confort à bord des voitures.

On peut déterminer un critère de régularité  $REG$  qui est égal à la moyenne des coefficients  $V(I)/E(I)^2$  calculés pour l'ensemble des arrêts de régulation de la ligne dans les deux directions (terminus inclus). Puis, on cherche à le minimiser.

Ce critère est calculé pour une tranche horaire homogène : c'est-à-dire au cours de laquelle le niveau de la demande et par conséquent le niveau des moyens engagés, restent constants.

Pour obtenir une valeur sur l'ensemble de la journée, il suffit d'établir la moyenne des valeurs obtenues sur chaque tranche horaire homogène (période de pointe, période creuse et soirée).

**Remarque:** Concrètement, ce calcul ne pose pas de problème pour les lignes dotées d'un SAE prévoyant l'enregistrement des heures de passage aux arrêts de régulation pour le sens de plus grande charge et à certaines périodes de la journée.

#### 4.3.5.3 CRITÈRE RELATIF À LA LOGIQUE DE PONCTUALITÉ

Actuellement, pour mesurer la ponctualité, les exploitants du réseau utilisent les documents de terminus (transparent ou relevé de CCD<sup>2</sup>) et étudient le nombre de départs effectués conformément à l'horaire de base.

**Problème:** Ce critère n'est pas suffisant car il ne répercute pas les écarts de l'horaire réel par rapport à l'horaire de base intervenus après le départ du terminus.

**Solution:** Pour surmonter cette difficulté, on propose de retenir le critère  $PON$  qui correspond au pourcentage de courses prévues au TM ne démarrant pas ou n'arrivant pas à l'heure.

<sup>2</sup> Commande Centralisée des Départs. Voir annexe A pour les termes utilisés dans le transport urbain.

Ce critère que le régulateur doit chercher à minimiser, permet en particulier de prendre en compte le cas des courses partant à l'heure prévue, mais subissant un changement de mission.

**Remarque:** Ce critère peut être calculé sur toute la journée ou bien seulement sur une tranche horaire donnée (il en est ainsi pour les lignes ne disposant pas d'un outil d'enregistrement complet des heures de départ et d'arrivée et où une partie des relevés doit être effectuée manuellement).

#### 4.3.5.4 CRITÈRE RELATIF À LA LOGIQUE DE GESTION DU PERSONNEL

Il est possible de concevoir un critère intégrant à la fois la nécessité de minimiser le nombre et l'ampleur des dérogations aux conditions réglementaires du travail et la nécessité de minimiser l'importance des écarts par rapport aux heures de débuts et de fins de service programmées au TM. Un tel critère sera noté *GPE*. Ce dernier existe si le temps supplémentaire est payé quotidiennement aux conducteurs. Ce temps présente la particularité de prendre en compte les allongements de service et de compenser toute action entraînant des dépassements sur les services aux limites des conditions normales.

#### 4.3.5.5 CRITÈRE RELATIF À LA LOGIQUE DE CORRESPONDANCE

Nous jugeons utile d'ajouter un critère relatif à la logique de correspondance afin de donner une importance aux correspondances [Laïchour & al., 00]. Le problème se pose lorsqu'il y a une correspondance en un arrêt donné du réseau de transport car notre souci est de minimiser le temps de transfert et le temps d'attente des voyageurs. Cette logique est dominante lorsque :

- le mode de transport entrant est en retard au nœud de correspondances et,
- la gestion des lignes, passant par le nœud de correspondances, n'est pas en fréquence.

Pour cela, nous proposons un critère *COR* qui donne le retard effectué en minutes pour une correspondance. Le plus simple est de déterminer un seuil de correspondance autorisé au-delà duquel la correspondance est annulée.

Ainsi, il existe cinq critères (Tableau 4.2) :

**Tableau 4.2 : Les Critères liés aux logiques de régulation**

<b>Critère</b>	<b>Domaine de variation</b>	<b>Optimum</b>
<i>ENL</i>	De 0 à <i>N</i> voyageurs	0 voyageurs
<i>REG</i>	De 0 à <i>N</i>	0
<i>PON</i>	De 0% à 100%	0%
<i>GPE</i>	De 0 à <i>N</i> minutes	0 minutes
<i>COR</i>	De 0 à <i>N</i> minutes	0 minutes

Les logiques de régulation peuvent présenter un caractère contradictoire dans certaines conditions, en particulier lorsque les conditions réelles d'exploitation s'écartent des conditions retenues pour l'élaboration du TM. C'est alors le critère relatif à la logique prioritaire au moment considéré qui est privilégié au détriment des autres.

Dans le processus d'optimisation de la régulation, la dérogation des critères non prioritaires représente en quelque sorte le prix pour résoudre la contradiction entre les logiques. Il en va de même dans les cas où plusieurs logiques sont simultanément dominantes : le régulateur est amené à s'éloigner de l'optimum de chacun des critères correspondants pour trouver un compromis acceptable parmi les objectifs poursuivis. Dans ce cas, une approche multicritère peut être utilisée entre les objectifs [Laïchour & al., 02a].

#### **4.3.6 TYPES DE RÉGULATION**

Il existe différents types de régulation [Gival, 02]. Ces types correspondent bien aux objectifs de régulation. Pour la réalisation d'un type, plusieurs actions de régulation élémentaires sont combinées. Dans ce cas, nous pouvons parler de stratégies de régulation.

Les types de régulation les plus utilisés dans les réseaux de transport urbain sont :

- La régulation en horaires (la ponctualité) : Elle consiste à appliquer la logique de ponctualité, c'est-à-dire le respect au mieux de l'horaire théorique.
- La régulation en intervalles (en fréquence) : Elle consiste dans l'application de la logique de régularité, c'est-à-dire le maintien d'un intervalle constant entre les véhicules qui se suivent.
- La régulation mixte : Elle consiste à combiner entre les deux types de régulation (en horaires et en intervalles).

Comme nous l'avons vu dans l'arbitrage des logiques de régulation, le régulateur peut combiner les types de régulation selon les logiques qu'il veut respecter, si celles-ci ne sont pas contradictoires. Dans le cas où le type de régulation utilisé est une combinaison de deux types

au moins (par exemple, la combinaison d'un type de régulation en horaires et d'un type de régulation en intervalles). Alors, ce type est appelé type de régulation mixte.

#### 4.3.6.1 RÉGULATION EN INTERVALLES

Elle consiste à observer les départs des véhicules des terminus, et à maintenir tout au long du parcours d'une ligne, des intervalles égaux ou faiblement différents entre les véhicules.

Elle est utilisée lorsque les intervalles prévus sont courts (inférieurs à 10 minutes selon la SEMURVAL<sup>3</sup>). Dans ce cas, les voyageurs sont attachés à la régularité des passages, c'est-à-dire une arrivée continue des voyageurs aux arrêts est produite. Ainsi leur satisfaction exige le passage régulier des véhicules.

Les recommandations d'une régulation en intervalles sont :

- Répartir équitablement la charge entre les véhicules et éviter ainsi de provoquer des retards dus à des afflux de voyageurs.
- Gagner la confiance des voyageurs en mettant à leur disposition un service régulier sur lequel ils peuvent compter.
- Confirmer par l'affichage des fréquences de passage aux arrêts (sans l'affichage des horaires ponctuels de passage).

En cas de perturbation isolée du TM théorique, une régulation en intervalles doit être aussitôt mise en œuvre pour empêcher l'apparition d'une lacune<sup>4</sup> (une perturbation). Dans ce cas, un décalage des véhicules entourant le véhicule perturbé est effectué de telle sorte que les intervalles entre eux restent sensiblement égaux. Empêcher l'apparition d'une lacune consiste à :

- Eviter son aggravation.
- Permettre le retour rapide au TM théorique sans injection de véhicule et sans suppression de course.
- Faire en sorte que la perturbation passe pratiquement ou même totalement inaperçue pour les voyageurs.

En cas de perturbation généralisée du TM théorique, l'action prioritaire consiste à combler au plus vite la ou les lacunes qui n'ont pu être évitées. La régulation en intervalles consiste ici à répartir équitablement les véhicules le long de la ligne, de façon à ce que de bout en bout et

<sup>3</sup> Compagnie de transport gérant le réseau d'autobus de la ville de Valenciennes et de ses environs.

<sup>4</sup> La différence entre le temps réel de passage et l'horaire théorique.

dans les deux sens, les délais d'attente des voyageurs soient raisonnables. Ainsi, la perturbation est acceptable pour la clientèle.

#### 4.3.6.2 RÉGULATION EN HORAIRES

La régulation en horaires consiste à assurer aux terminus et en ligne le maximum de départs et de passages prévus, si possible aux heures exactes prévues, à défaut avec des retards les plus faibles possibles, et jamais avec des avances.

Elle est utilisée lorsque les intervalles prévus sont importants (supérieurs ou égaux à 10 minutes à la SEMURVAL). Pour ce type d'intervalles, la régulation en intervalles est interdite. Dans ce cadre, les voyageurs sont attachés au respect des horaires précis annoncés et la régulation en horaires donne une confiance du service offert aux voyageurs. Par contre, le maintien d'intervalles égaux (la régulation en intervalles) est inefficace et source d'insatisfaction pour les voyageurs qui peut se manifester par :

- L'inefficacité pour la répartition de la charge à l'arrivée des voyageurs aux stations n'est pas suffisamment étalée dans le temps. Généralement, une pointe est constatée dans les instants précédant l'heure de passage prévue (un véhicule décalé en retard ne soulagerait pas notablement le véhicule suivant, et un véhicule décalé en avance prendrait peu de voyageurs).
- La source d'insatisfaction des voyageurs : un véhicule en retard entraîne un temps d'attente plus important et une arrivée à destination plus tardive que prévue. Un véhicule décalé en avance serait manqué par une grande partie des voyageurs et correspondrait naturellement pour eux à une course non assurée.

Les recommandations d'une régulation en horaires sont :

- Un véhicule assurant un horaire avec retard est mieux que de le supprimer du TM.
- L'horaire d'un véhicule n'est modifié qu'à conditions qu'un autre véhicule puisse le remplacer dans le TM.
- Les véhicules de réserve sont souvent nécessaires. Ils ne doivent pas cependant être gaspillés sur les lignes à forte fréquence où la régulation en intervalles est adaptée.

En cas de perturbation isolée du TM théorique, les principes de la régulation en horaires doivent être appliqués selon le type de la perturbation :

- Cas d'une perturbation correspondant à un véhicule en retard :

- Si le retard est résorbé par le temps de battement<sup>5</sup> du prochain terminus, alors aucune action n'est appliquée ni sur ce véhicule ni sur les autres véhicules de la ligne.
- Si le retard est résorbé par le temps de battement au terminus suivant, alors aucune action n'est appliquée sauf opportunité de rattrapage par une injection d'un véhicule ou l'utilisation d'un véhicule disponible.
- Si le retard n'est pas récupéré sur les deux prochains temps de battement, alors la perturbation est importante (panne, accident, etc.). Dans ce cas, nous nous situons dans une situation d'un véhicule en panne (paragraphe suivant).
- Cas d'une perturbation correspondant à un véhicule en panne :
  - Injecter rapidement un véhicule (réserve ou autre) sur l'horaire qui n'est pas assuré et récupérer dès que possible le véhicule en panne.
  - Modifier, mais uniquement au terminus, les horaires des autres véhicules de la ligne lorsque les temps de battement sont importants (égaux ou faiblement inférieurs à l'intervalle) : le véhicule suivant est alors avancé pour assurer à l'heure ou légèrement en retard le départ manquant ; le départ de ce deuxième véhicule est lui-même assuré par le troisième véhicule et ainsi de suite jusqu'à la récupération du premier véhicule ou d'un autre véhicule disponible.
  - Avancer un véhicule sur l'horaire précédent, si une surcharge est prévisible. C'est là, le seul cas autorisé de départ avancé en régulation en horaires. A ce moment là, il ne faut pas confondre véhicule avancé et départ avancé.

En cas de perturbation généralisée du TM théorique, la régulation en horaires consiste à replacer progressivement les véhicules sur des horaires prévus (pas nécessairement les leurs dans un premier temps) tout en n'interrompant pas la continuité du service.

La consigne à respecter dans la régulation en horaires, est d'éviter les prises d'avance et revenir au tant que possible au TM.

### 4.3.6.3 RÉGULATION MIXTE

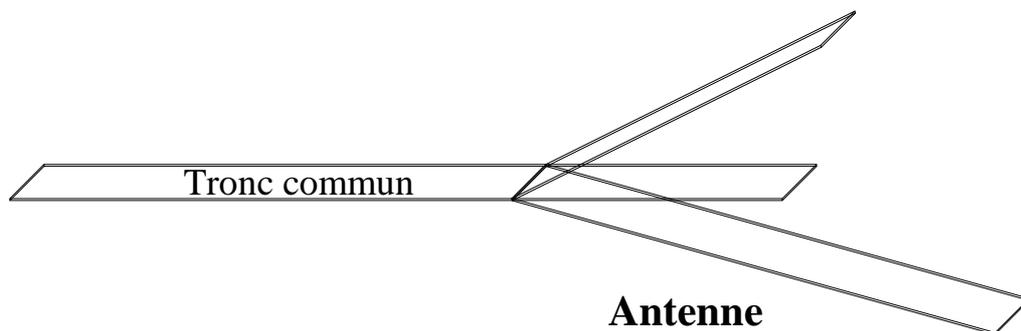
La régulation mixte permet d'adapter la régulation en horaires et en intervalles en même temps. Elle est utilisée dans le cas des lignes à antennes par la SEMURVAL (figure 4.5). Cela

---

<sup>5</sup> Temps d'attente autorisé à un arrêt.

vient du fait que les intervalles courts sur le tronçon commun permettent une régulation en intervalles mais que les intervalles longs sur les antennes n'autorisent que la régulation en horaires. Dans ce cas :

- Les départs des antennes doivent être traités en régulation en horaires (ponctualité).
- Les intervalles doivent être réguliers entre les véhicules lorsqu'ils circulent sur le tronçon commun, qu'ils viennent des antennes ou qu'ils s'y dirigent, car la régularité sur le tronçon commun est alors à privilégier.



**Figure 4.5 : Une ligne avec antenne**

Dans cette section, nous avons présenté la régulation d'un point de vue décisionnel. Dans la section suivante, nous discutons de la régulation des correspondances à travers des algorithmes.

## **4.4 RÉGULATION DES CORRESPONDANCES**

Dans cette section, nous présentons quelques algorithmes usuels de régulation, puis nous proposons un algorithme pour la régulation des correspondances. Cet algorithme adapte une régulation préventive qui consiste à prévenir les perturbations au niveau des nœuds de correspondances.

### **4.4.1 ALGORITHMES USUELS DE RÉGULATION DES RÉSEAUX D'AUTOBUS**

Dans cette section, nous allons présenter des algorithmes usuels de régulation utilisés dans les réseaux d'autobus : ceux utilisés en terminus et ceux utilisés en ligne [Cure & al., 84].

#### **4.4.1.1 ALGORITHMES EN TERMINUS**

Dans ce type d'algorithme, la régulation est effectuée au niveau des terminus. Nous allons parler de l'algorithme de Départ Programmé (DP) et de l'algorithme de Départ Programmé

par Anticipation (DPA). Ces algorithmes sont des algorithmes mixtes qui utilisent les deux procédures de régulation : en intervalles et en horaires.

#### 4.4.1.1.1 ALGORITHME DE DÉPART PROGRAMMÉ

L'algorithme de départ programmé se déclenche dès qu'un véhicule arrive au terminus avec un retard excédant le temps de battement. Il opère en retardant les véhicules suivants le véhicule perturbé lors de leur passage au terminus, de façon à conserver des intervalles aussi réguliers que possible (figure 4.6)

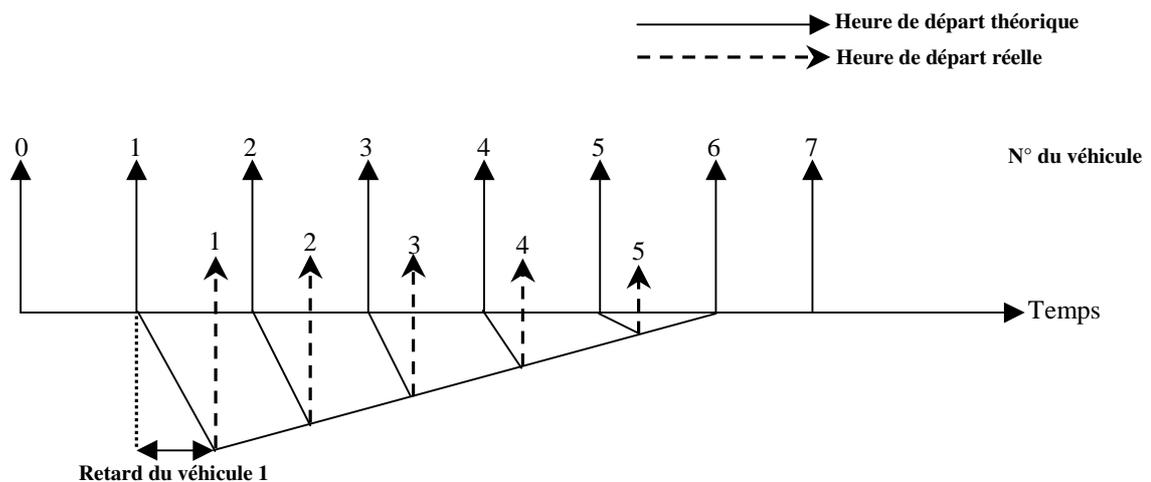


Figure 4.6 : Le principe de l'algorithme DP

#### 4.4.1.1.2 ALGORITHME DE DÉPART PROGRAMMÉ AVEC ANTICIPATION

Dans cet algorithme, le retard du véhicule perturbé étant détecté en ligne, il est donc possible d'agir en terminus sur les véhicules qui le précèdent de façon à combler d'éventuelles lacunes. Ainsi, on peut agir sur ceux qui le suivent comme dans l'algorithme DP.

La détection d'une perturbation (une lacune avec un retard) peut s'effectuer de deux façons :

- Par localisation continue : à tout instant, le retard de chaque véhicule sur le réseau est calculé.
- Par localisation discrète et par défaut : un état de non-passage en un arrêt est détecté (ce type d'arrêt est appelé, généralement, arrêt de régulation). Tant que le véhicule perturbé n'a pas franchi cet arrêt, son retard effectif ne peut être calculé exactement.

A l'inverse de l'algorithme DP, l'algorithme DPA présente un caractère préventif qui doit réduire les risques de report de l'irrégularité d'un parcours à l'autre.

#### 4.4.1.1.3 DISCUSSION

Nous présentons les limitations des algorithmes en terminus [Cure & al., 84]. Les limites de l'algorithme DP sont :

- Il accroît l'instabilité d'une ligne, c'est-à-dire des retards imposés. Ils risquent d'accroître le nombre de véhicules en retard à l'arrivée au terminus opposé.
- Dans le cas de légers retards (inférieurs à 3 minutes) au départ du terminus régulé, l'amélioration significative de la qualité de service n'est pas observée.
- Dans le cas de retards importants au départ, les retards imposés conduisent à une perte de capacité qui risque d'accroître le nombre de voyageurs refusés pour charge (dans ce cas la capacité maximale du véhicule est atteinte).

De ce fait, la détection d'une perturbation en amont du terminus constitue la seule voie à explorer qui permet d'améliorer la faible performance de l'algorithme DP ; Car, ce dernier permet d'éviter l'apparition d'une lacune en aval du véhicule perturbé mais pas en amont.

Les limites de l'algorithme DPA sont :

- En régime stable (faibles perturbations), il est peu opérant.
- En régime très instable (retards très élevés), il peut être préférable de recourir à des mesures plus radicales de remise à l'heure.

Entre ces deux situations extrêmes (régime stable et instable), l'algorithme DPA agit en apportant uniquement des gains très limités du point de vue de la qualité de service et aucun avantage significatif au niveau de la stabilité d'une ligne.

#### 4.4.1.2 ALGORITHMES EN LIGNE

Ce type d'algorithmes est utilisé pour la régulation en ligne, i.e. la régulation est effectuée en inter-station et au niveau des arrêts de la ligne autres que les terminus. De la même façon, nous présentons deux algorithmes mixtes. Nous commençons par l'algorithme de régulation à vue, et nous finissons par l'algorithme de régulation à vue par anticipation [Cure & al., 84].

##### 4.4.1.2.1 ALGORITHME DE RÉGULATION À VUE

Il consiste à empêcher le rattrapage d'un véhicule par celui qui le suit (éviter un train de véhicules). Dès que l'intervalle entre un véhicule et son prédécesseur devient inférieur à un certain seuil, on retarde ce véhicule jusqu'à reconstituer l'intervalle minimum, et ce dans les

limites d'un retard maximum admissible par rapport à l'horaire. Ceci a pour fonction d'éviter des prises de retard trop importantes, néfastes du point de vue de la stabilité de la ligne.

#### 4.4.1.2.2 ALGORITHME DE RÉGULATION À VUE PAR ANTICIPATION

A la différence du premier algorithme, l'action porte ici sur le véhicule précédent celui qui déclenche l'intervention (la cause de la perturbation). Afin d'éviter que le retard du véhicule perturbé ne s'amplifie, le véhicule précédent est retardé de façon à éviter la formation d'une perturbation de type lacune en aval du véhicule perturbé. Dans ce cas, il faut satisfaire deux conditions :

- Eviter l'apparition d'une autre lacune en aval du véhicule que l'on souhaite retarder. Il y a deux cas. Soit l'intervalle théorique devant le véhicule perturbé est reconstitué. Soit une lacune devant le véhicule retardé est apparue, alors, les deux intervalles précédant le véhicule perturbé seront égalisés.
- Respecter une valeur plafond autorisée pour le véhicule retardé.

Dans tous les cas, tout véhicule en avance est systématiquement mis à l'heure.

#### 4.4.1.2.3 DISCUSSION

Finalement et à l'inverse du premier algorithme "la régulation à vue", le second algorithme "la régulation à vue par anticipation" est préventive dans la mesure où il vise à éviter l'amplification de l'irrégularité tandis que le premier algorithme se contente de la corriger.

Dans l'algorithme de régulation à vue par anticipation, l'anticipation permet largement de prévenir l'amplification de l'irrégularité en limitant la prise de retard des véhicules perturbés ainsi que l'apparition de lacunes. Elle agit donc plus vite et de façon plus continue (l'action prend en compte l'état de trois véhicules successifs, ce qui permet de lisser les intervalles). La contrainte sur les retards maximaux admissibles permet de limiter le déclenchement de l'algorithme. Cet algorithme est considéré comme un algorithme efficace car il réalise un compromis entre exigences de régularité et de stabilité.

Les algorithmes de régulation en ligne peuvent être appliqués pour la régulation des correspondances car l'anticipation de la perturbation est assurée. Mais, cela se fait sur le compte d'autres véhicules. Dans notre cas, nous ne voulons pas agir sur d'autres véhicules mais sur les véhicules entrants pour la correspondance et entraînant une perturbation ou sur le véhicule sortant assurant la correspondance.

#### 4.4.2 ALGORITHMES DE RÉGULATION DES CORRESPONDANCES

Dans la littérature, on trouve souvent des algorithmes qui traitent les logiques de régularité et de ponctualité sans la prise en compte des autres logiques. C'est le cas des algorithmes présentés ci-dessus. Ces deux logiques entraînent, parfois, le respect des logiques d'enlèvement de la charge et la gestion du personnel. Mais, la logique de correspondance reste non-traitée.

Dans cette section, nous présentons deux algorithmes de régulation des correspondances. Le premier est proposé par A. Soulhi "Algorithme flou". Il est basé sur l'expérience des régulateurs. La seconde que nous proposons, est basé sur le processus de contrôle par anticipation (discuté dans le chapitre 3).

##### 4.4.2.1 ALGORITHME FLOU

Dans [Soulhi, 00], un algorithme de régulation des correspondances est proposé pour le réseau de transport de Montbéliard. L'algorithme repose sur un modèle de décisions basé sur la théorie de la logique floue (figure 4.7).

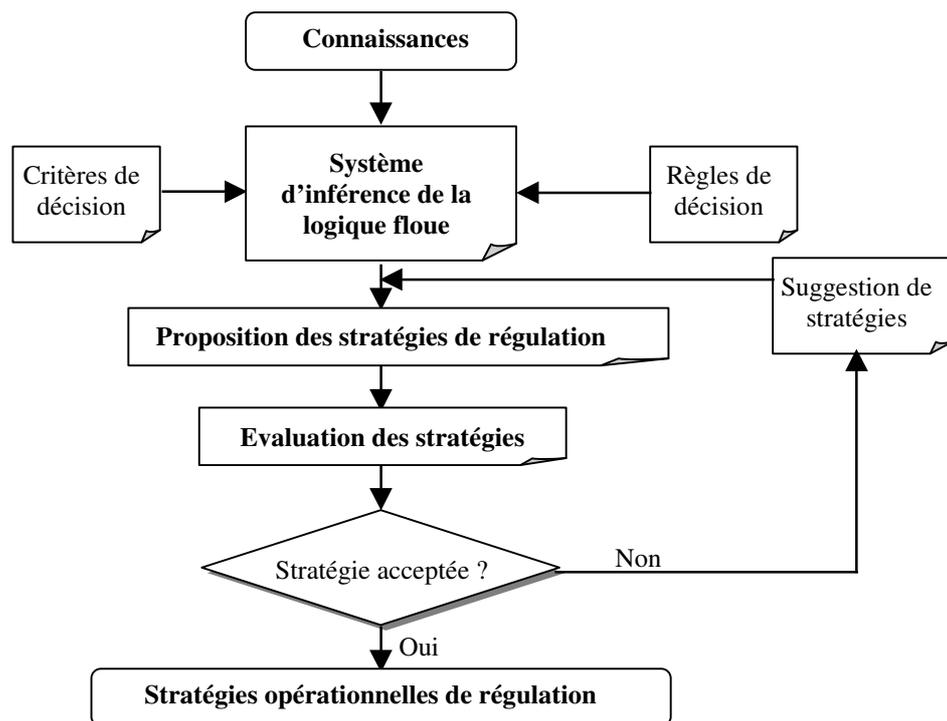
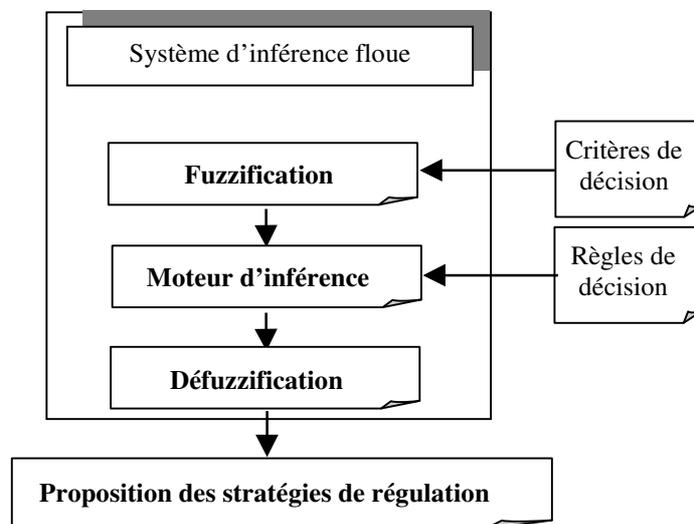


Figure 4.7 : L'algorithme flou de régulation des correspondances

Cet algorithme fonctionne selon trois phases : la phase d'élaboration des stratégies de régulation, la phase d'évaluation des stratégies à l'aide des simulations et enfin, la phase de mise en application des stratégies de régulation dans les systèmes de transport. La première et la deuxième phase servent pour l'apprentissage des stratégies de régulation. La troisième phase consiste en l'implémentation réelle des stratégies de régulation dans le système de transport. Les différentes étapes de l'algorithme sont :

1. Acquisition des connaissances : elle représente l'acquisition de l'expérience de régulation dont dispose les régulateurs et les responsables du service de régulation.
2. Déclaration des critères de décision et les règles de décision. Les règles représentent des consignes à respecter.
3. Modélisation des critères de décision grâce à la théorie de la logique floue (la phase de fuzzification) pour définir des classes de situations probables. Puis, un moteur d'inférence à bases de règles floues (règles de décision pour la régulation) permet d'associer à chaque classe de situation une classe de décision. Enfin, une phase de défuzzification permet de déterminer quelle est la décision à prendre dans un cas précis selon les valeurs des critères de décision et le respect des règles de décisions (figure 4.8)



**Figure 4.8 : Système d'inférence floue**

4. Proposition des stratégies de régulation pour être validées par des simulations. Dans le cas où une stratégie n'est pas acceptée par les régulateurs ou par les responsables de régulation, alors il faut proposer une autre stratégie, sinon aller à l'étape 5 (l'étape suivante).
5. Implémentation des stratégies validées dans le système d'aide à la régulation sous forme d'une base de règles.

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

Cet algorithme peut être généralisé pour tous les véhicules concernant une même correspondance et utiliser l'ensemble de règles générées dans le SMA proposé (chapitre 3). L'implémentation des règles est structurée au niveau des agents CORRESPONDANCE. Dans ce SMA, nous prévoyons la macro-régulation. Nous présenterons un algorithme pour la macro-régulation (communication entre les agents CORRESPONDANCE) dans le chapitre 5.

#### 4.4.2.2 ALGORITHME PROPOSÉ

A part l'algorithme présenté ci-dessus, il n'existe pas à notre connaissance d'autres algorithmes destinés à la régulation des correspondances (respect de la logique de correspondance). Nous proposons un algorithme capable de réguler les correspondances, en temps réel.

En se basant sur les informations fournies par le SAE, une perturbation désigne l'avance ou le retard d'un véhicule par rapport à son horaire théorique.

En chaque nœud de correspondances, nous utilisons l'algorithme décrit par la figure 4.9. Cet algorithme fonctionne selon les étapes suivantes :

1. Tout d'abord, une simulation de veille est déclenchée au niveau d'un nœud de correspondances à chaque correspondance. Cela s'effectue en quelques minutes avant l'horaire théorique de la correspondance prescrit dans le TM.
2. Dans la simulation de veille, les positions des véhicules par rapport au nœud de correspondances sont déterminées et calculées.
3. Après, nous testons l'horaire des véhicules par rapport aux horaires prescrits dans le TM grâce à leurs positions calculées précédemment. Si une perturbation est détectée, alors une simulation des départs est effectuée (étape 4). Sinon, il faut attendre le déclenchement d'une autre simulation de veille avant une autre correspondance (reprise étape 1).
4. Déclenchement de la simulation de départ : dans ce cas, les positions des véhicules sont calculées au moment de la réalisation effective de la correspondance. Bien sûr, ces positions indiquent les horaires simulés des véhicules. Dans le cas où la

correspondance risque de ne pas être assurée à causes d'éventuelles perturbations (des véhicules en retard), alors le module de décision doit proposer des actions afin d'assurer la correspondance (l'étape 5). Sinon, il faut attendre le déclenchement d'une autre simulation de veille avant une autre correspondance (étape 1).

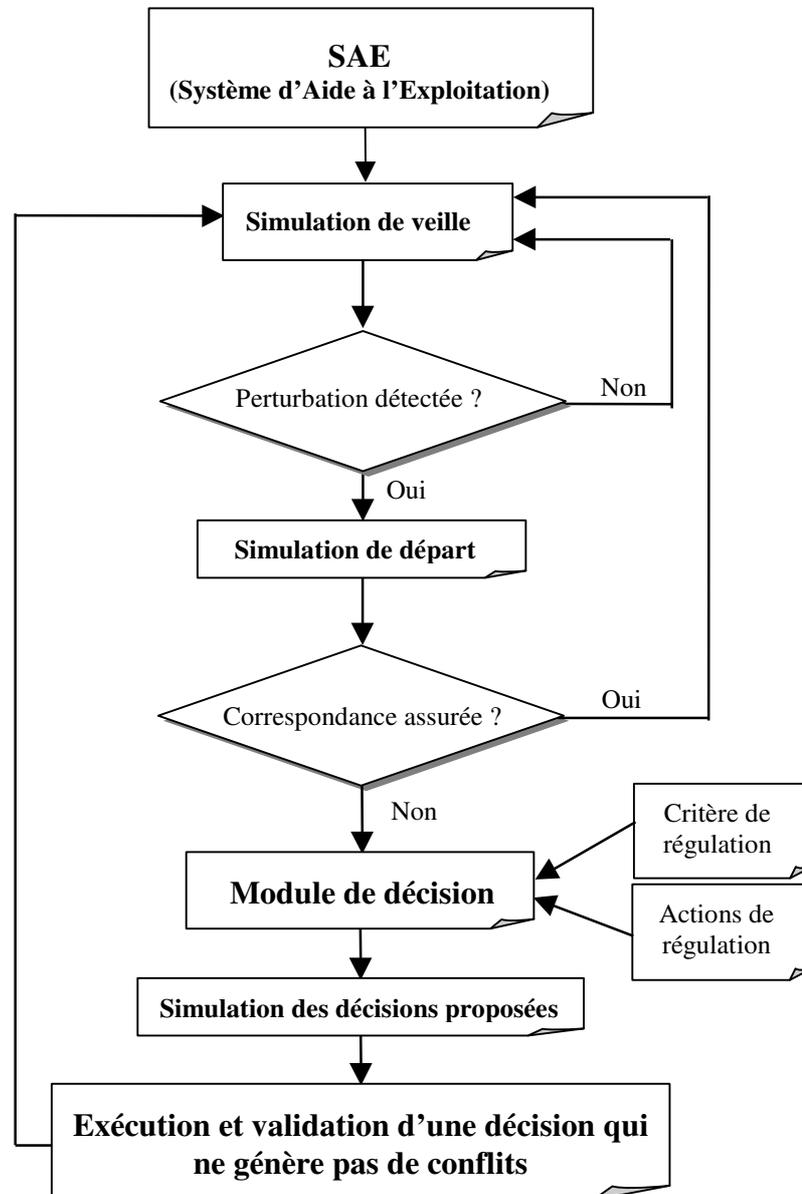


Figure 4.9 : Algorithme de régulation des correspondances

5. La correspondance ne sera pas assurée, alors le système de décision est mis en route afin de trouver des solutions pertinentes pour éviter le non-respect de la correspondance.
6. Après avoir déterminé les décisions susceptibles d'assurer la correspondance, la simulation de ces décisions est lancée. Cette dernière consiste à déterminer les effets des décisions proposées par le module de décision. Les effets sont calculés à partir des positions des véhicules, avant l'horaire réel de la correspondance, en

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

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

Dans le module de décision, des actions de régulation sont proposées, mais ces actions (ou décisions) sont soumises à certains critères qui influent sur le choix des actions à entreprendre. Nous présenterons par la suite les critères susceptibles d'être déterminants, au niveau d'un nœud de correspondances pour le choix des actions de régulation. Ainsi, nous présenterons selon notre point de vue l'ensemble, des actions susceptibles d'être appliquées au niveau d'un nœud de correspondances.

Dans cet algorithme, nous considérons la régulation au niveau d'un seul nœud de correspondances (la micro-régulation). Dans le module de décision, la macro-régulation n'est pas prise en compte, c'est-à-dire l'évaluation des décisions locales n'est pas étudiée sur l'ensemble du réseau de transport. Dans le chapitre 5, nous présenterons un algorithme complémentaire pour la macro-régulation basé sur les temps de battements afin de valider les décisions prises par un agent CORRESPONDANCE.

#### 4.4.2.2.1 CRITÈRES DE DÉCISION DE PRISE DANS LA GESTION DES CORRESPONDANCES

Il y a plusieurs critères pouvant intervenir dans la prise de décision au niveau d'un nœud de correspondances. L'objectif visé, ici, est d'assurer les correspondances. Parmi les critères établis, nous citons les suivants :

- Les caractéristiques des véhicules en correspondance : Ces caractéristiques sont l'état (avance ou retard) et la charge (nombre de voyageurs à bord) d'un véhicule. Par exemple, si le véhicule entrant est en retard avec un seul voyageur à son bord prenant la correspondance. Il est préférable de laisser partir la correspondance si une autre correspondance a lieu quelques minutes après. Par contre, si le nombre de voyageurs est plus important, le choix est différent.
- Le nombre de voyageurs en attente d'une correspondance : Par exemple, au moment où un véhicule entrant est en retard à une correspondance et le nombre de voyageurs en attente est important, le régulateur décide le départ de la correspondance. Puis, il prend d'autres directives.
- La période de la journée : Il y a trois périodes ; heures de pointe, heures creuses ou soirée (exemple : dernière correspondance). L'application d'une décision diffère

suivant la période. Par exemple, en soirée, une dernière correspondance doit être assurée même avec retard.

A partir de ces critères, les décisions peuvent être choisies. Une décision représente une ou plusieurs actions de régulation.

#### 4.4.2.2 ACTIONS DE RÉGULATION DES CORRESPONDANCES

Dans le chapitre 1, nous avons présenté un ensemble d'actions de régulation mais elles ne sont pas toutes applicables au niveau d'un nœud de correspondances. Parmi ces actions, nous allons présenter celles qui le sont. Celles-ci agissent sur les véhicules entrants et sortants concernés par la même correspondance. Nous avons jugé qu'il n'existe que quatre actions exécutables au niveau des nœuds de correspondances :

- Avancer le véhicule entrant (attendu) : Demander au chauffeur d'accélérer afin de résorber son retard à la correspondance.
- Retarder le véhicule entrant : Demander au chauffeur de ralentir suite à une avance par rapport à l'horaire théorique et ainsi arriver juste à l'heure à la correspondance.
- Retarder le véhicule sortant : Demander au chauffeur d'attendre quelques minutes les véhicules entrants en retard à la correspondance ; mais, l'attente ne doit pas dépasser le seuil autorisé par l'exploitation. De plus, le véhicule sortant retardé ne doit pas rattraper la prochaine correspondance programmée dans la même destination.
- Injecter un véhicule : Le régulateur demande l'injection d'un véhicule, en cas d'absence du véhicule assurant la correspondance ou si ce véhicule a atteint une charge maximale. De même, la demande est identique si la charge est très élevée au nœud de correspondances car le véhicule sortant assurant la correspondance a dépassé sa capacité maximale.
- N'appliquer aucune action : Aucune action n'est prise si la perturbation avec un retard peut être résorbée par le temps de battement, c'est-à-dire le retard ne dépasse pas le temps de battement.

Ces actions de régulation peuvent être implémentées sous forme de règles conditionnelles.

Il peut exister d'autres actions de régulation applicables au niveau d'un nœud de correspondances. Tout dépend du type de réseau de transport urbain ainsi que la possibilité d'appliquer les actions de régulation.

Dans cette section, nous avons présenté la régulation des correspondances suivant deux algorithmes celui proposé par A. Soulhi [Soulhi, 00] et celui que nous proposons. Ce dernier est utilisé par les agents CORRESPONDANCE. Dans la section suivante, nous présentons le modèle agent de ces agents.

## 4.5 MODÈLE INTERNE D'UN AGENT CORRESPONDANCE

Rappelons que le SMA proposé dans le chapitre 3 contient trois types d'agents : agent SUPERVISEUR jouant le rôle d'interface entre le système multi-agent et le régulateur, des agents CORRESPONDANCE jouant le rôle décisionnel au niveau des nœuds de correspondances, et enfin des agents ACQUISITION jouant le rôle de perception des informations sur les véhicules aux arrêts de régulation. Dans cette section, nous allons présenter le modèle interne de l'agent CORRESPONDANCE.

Le modèle d'agent CORRESPONDANCE est constitué de cinq parties (figure 4.10).

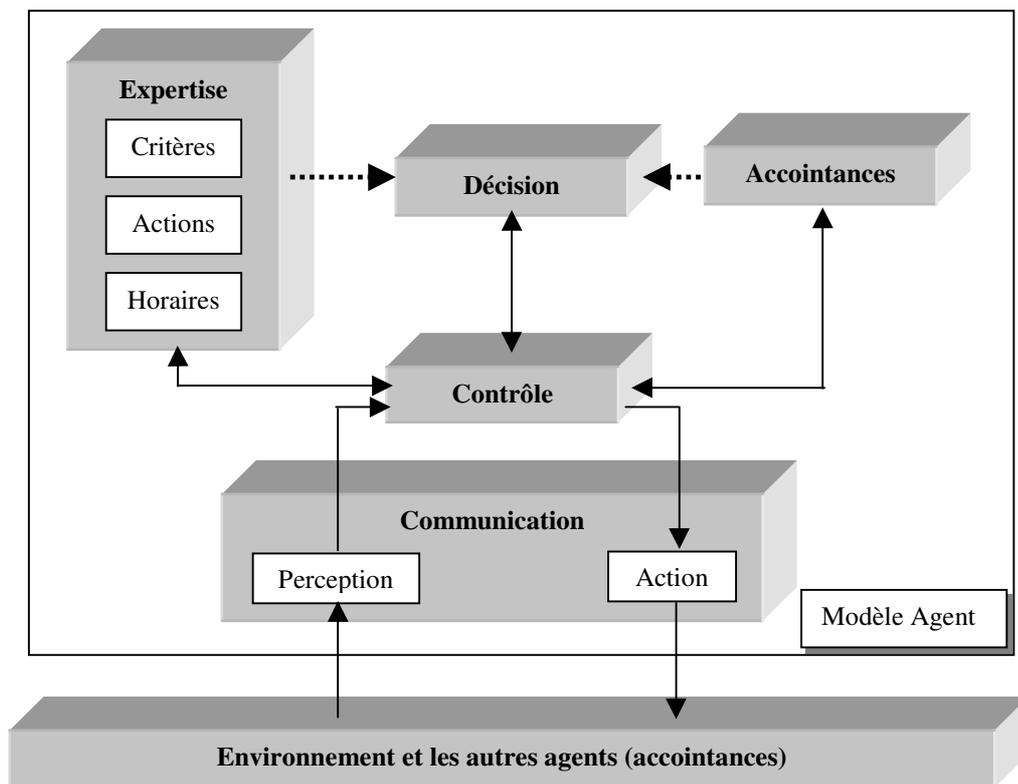


Figure 4.10 : Le modèle agent

### MODULE EXPERTISE :

Cette partie concerne le domaine de spécification de l'agent. Chaque agent dispose d'un ensemble de méthodes ou de règles qui décrivent son comportement, notamment la réalisation des buts (objectifs ou critères de décisions), le traitement des événements, etc. Dans notre cas,

ce module contient les critères de régulation, les actions de régulation et les informations horaires des correspondances. Ces dernières changent d'un agent correspondance à un autre.

#### **MODULE ACCOINTANCES :**

Un agent évolue dans un environnement où existe aussi d'autres agents qu'il connaît et qui sont appelés ses accointances. L'agent dispose donc d'un modèle de soi et des autres agents. Ce modèle évolue en fonction des messages qui arrivent à l'agent et en fonction de l'évolution du système. Parmi ces accointances, certaines sont statiques, d'autres sont dynamiques et évoluent en fonction du contexte et des messages qui arrivent. Dans notre modélisation multi-agent, les accointances d'un agent CORRESPONDANCE sont :

- Les agents ACQUISITION qui font partie de la même fenêtre temporelle de simulation. Donc, cet ensemble d'accointances est dynamique selon le rayon de la fenêtre de simulation.
- L'agent SUPERVISEUR.
- Les autres agents CORRESPONDANCE voisins qui sont reliés directement par une ligne du réseau de transport urbain. Cet ensemble est aussi dynamique comme l'ensemble d'accointances agents ACQUISITION.

#### **MODULE COMMUNICATION :**

Le module de communication permet aux agents d'échanger des informations et des résultats. Il gère l'ensemble des messages reçus et émis.

La partie perception permet à l'agent de recevoir des informations de l'extérieur, c'est-à-dire de l'environnement et des autres agents (les accointances). A la réception d'un message, le module de communication avertit le module de contrôle de l'arrivée de nouveaux messages.

La partie action met en application une tâche (action ou envoi d'un message) que doit effectuer l'agent. Donc, le module de communication prend en charge les messages à émettre.

#### **MODULE CONTRÔLE :**

Le module de contrôle permet à l'agent de gérer ses activités internes. Donc, il active les différents modules de l'agent. Il active la partie perception du module de communication afin de traiter l'ensemble des messages reçus par l'agent. Si un message attend un retour immédiat, alors le module de contrôle envoie la réponse en activant directement la partie action du module de communication. Sinon, l'activation du module de décision se fait pour lancer des tâches de simulation des correspondances grâce à l'algorithme de régulation. Il

modifie les accointances en activant le module des accointances. Ainsi, il modifie les critères de régulation, les décisions de régulation et les horaires des correspondances en activant le module d'expertise.

Enfin, le module de contrôle gère l'algorithme de régulation pour le bon fonctionnement des correspondances.

#### **MODULE DÉCISION :**

Ce module représente le processus de décision. Ce dernier contient un algorithme de régulation capable de proposer des actions de régulation (ou des décisions) en cas de perturbations. Le module de décision de l'algorithme de régulation, proposé précédemment pour la régulation des correspondances, est implémenté dans ce module.

Le module de décision a besoin des critères et des actions de régulation ainsi que des informations horaires des correspondances se trouvant dans le module d'expertise.

## **4.6 CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons abordé la notion de correspondance qui nous semble être un aspect crucial. Ainsi, nous avons discuté de l'utilité des correspondances dans un réseau de transport urbain, leur impact sur les voyageurs et leur gestion. Bien sur, la satisfaction des voyageurs est acquise grâce à la bonne régulation des correspondances. Nous avons ensuite présenté la régulation du point de vue décisionnel : les critères de régulation, les actions de régulation, les logiques de régulation et les algorithmes de régulation. Enfin, nous avons présenté la structure du modèle d'un agent CORRESPONDANCE.

Les critères de régulation et les actions de régulation changent d'un nœud de correspondance à un autre dans le même réseau de transport urbain. Ils varient, aussi, selon les périodes de la journée (pointe, creuses ou soirée).

Notons le manque de travaux de recherche consacrés à la régulation des correspondances. Nous avons proposé un algorithme qualifié de préventif et d'interactif.

Dans le chapitre suivant, nous aborderons l'architecture du SMA proposé. Nous insisterons alors sur la réalisation logicielle et les difficultés rencontrées pour l'implémentation de ce SMA.

## CHAPITRE 5

# VALIDATION DE LA MODÉLISATION MULTI-AGENT

5.1	INTRODUCTION.....	139
5.2	ARCHITECTURE DU SMA PROPOSÉ.....	141
5.3	IMPLÉMENTATION SOUS EM-PLANT .....	148
5.4	RÉSEAU DE TRANSPORT URBAIN DE VALENCIENNES.....	153
5.5	DESCRIPTION DU RÉSEAU D'AUTOBUS DE MONTBÉLIARD.....	164
5.6	SCÉNARIIS APPLIQUÉS AUX CORRESPONDANCES.....	166
5.7	CONCLUSION.....	170

## CHAPITRE 5

## VALIDATION DE LA MODÉLISATION MULTI-AGENT

## 5.1 INTRODUCTION

L'implémentation proposée est basée sur le choix d'un outil logiciel qui servira de plate-forme de développement du système. L'inexistence de plate-forme de développement générique standard laisse le concepteur confronté au problème du choix du logiciel. Notre objectif est de transformer la modélisation multi-agent obtenue précédemment en un SMA directement exécutable [Galland, 01].

L'implémentation du système d'aide SARC<sup>1</sup> s'effectue en deux étapes :

- Une première étape qui consiste à réaliser des simulations sur PC sans lien direct avec le SAE de SEMURVAL<sup>2</sup>. Dans ce cas, l'organisation de l'application est illustrée à la figure 5.1.

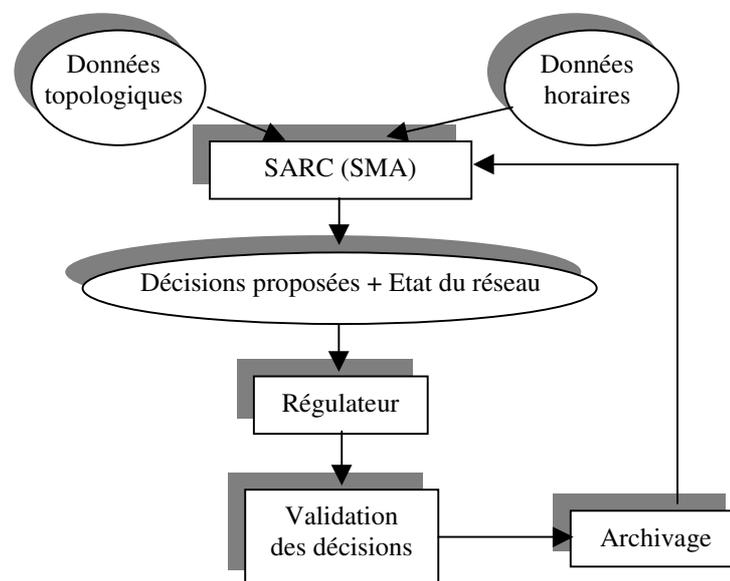


Figure 5.1 : Organisation de l'application pour la première étape

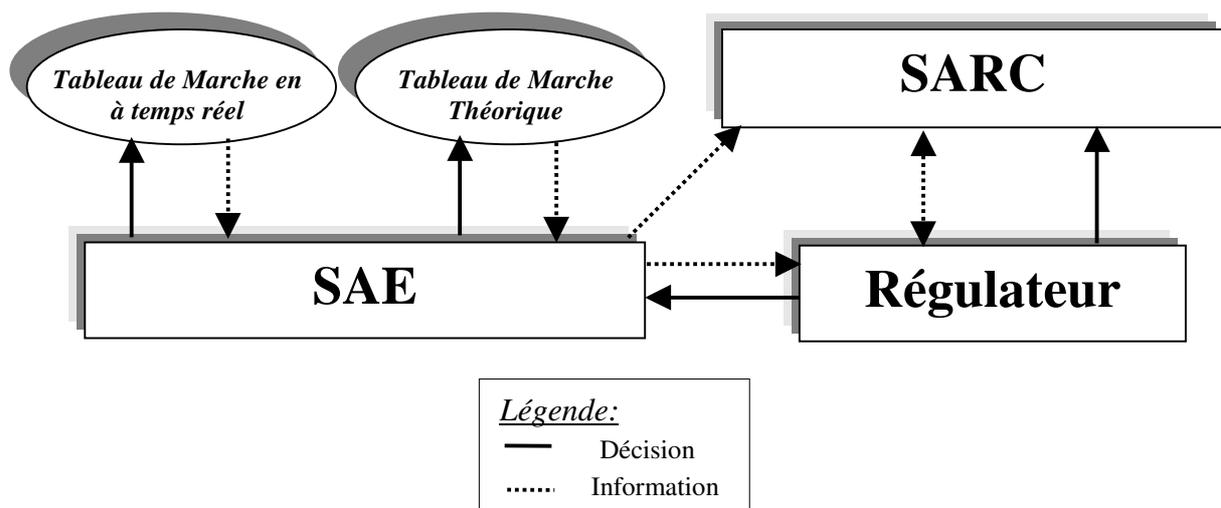
<sup>1</sup> SARC signifie Système d'Aide à la Régulation des Correspondances. C'est le nom que nous avons donné à notre SMA.

<sup>2</sup> Exploitant du réseau de transport urbain d'autobus pour la ville de Valenciennes et de ses environs.

Sur la figure 5.1, les données topologiques représentent les informations sur le réseau du point de vue structurel. Quant aux données horaires, elles représentent le TM théorique. L'archivage permet de garder une trace des décisions prises dans les situations antérieures.

Dans cette étape, les simulations sont réalisées dans des conditions de circulations normales (pas de perturbations). Ensuite, des perturbations sont provoquées afin de tester l'application au niveau des nœuds de correspondances. Celle-ci permet de juger de la fiabilité de SARC.

- Une seconde étape qui consiste à relier SARC au SAE de SEMURVAL pour le suivi en temps réel des correspondances et la proposition des décisions pertinentes au régulateur. Cette phase passe par l'adaptation du format de données du SAE dans SARC. La figure ci-dessous (figure 5.2) représente le positionnement de notre système au niveau du processus de régulation et le suivi en temps réel de l'exploitation d'un réseau de transport urbain.



**Figure 5.2 : Positionnement de SARC dans le processus de régulation**

Le SAE reçoit un tableau de marche théorique (informations théoriques) à appliquer. Le SAE et SARC utilisent les mêmes sources d'informations théoriques. Les régulateurs ont accès aux deux systèmes (SAE et SARC) qui fournissent une aide précieuse en attirant leur attention sur l'état du réseau et en leur proposant des actions pertinentes pour éviter les perturbations.

Dans ce chapitre, nous décrivons l'architecture du SMA proposé [Laïchour & al., 01d]. Nous donnons en suite une implémentation utilisant le logiciel de simulation de flux eM-Plant [eM-Plant, 00]. Puis, nous présentons le réseau de transport urbain de Valenciennes et celui de Montbéliard pour l'importance accordée aux correspondances. Nous concluons par quelques scénarii appliqués au réseau de Valenciennes.

## 5.2 ARCHITECTURE DU SMA PROPOSÉ

Dans le système multi-agent proposé, nous avons trois types d'agents : agent ACQUISITION, agent CORRESPONDANCE et agent SUPERVISEUR.

Nous spécifions, dans cette partie, les comportements des agents à l'aide des réseaux de Pétri [Laïchour & *al.*, 01d]. Ces derniers représentent un outil semi-formel et permettent au mieux de décrire les comportements [Agimont, 96][El Fallah-Segrouchni, 00]. En premier lieu, nous présentons les différents comportements de l'agent SUPERVISEUR, puis, le comportement d'un agent CORRESPONDANCE pour la régulation des correspondances, et en dernier lieu, les comportements d'un agent ACQUISITION pour l'enregistrement des informations de passages des véhicules aux arrêts de régulation.

### 5.2.1 AGENT ACQUISITION

Dans le chapitre 3, nous avons présenté les rôles des différents agents du SMA proposé (figure 3.18). Les agents ACQUISITION prennent en charge l'enregistrement des paramètres liés aux passages des véhicules aux arrêts de régulation afin de répondre aux requêtes des agents CORRESPONDANCE.

Ce type d'agent ne possède pas d'accointances. Il répond seulement aux requêtes faites par des agents CORRESPONDANCE.

Le rôle d'un agent ACQUISITION est très important. Il doit fournir les informations nécessaires à la détection des perturbations et à la détermination des décisions.

Nous décrivons les comportements d'un agent ACQUISITION par deux traitements essentiels d'une part, l'enregistrement des passages des véhicules (figure 5.3), d'autre part, le traitement d'une requête d'un agent CORRESPONDANCE (figure 5.4).

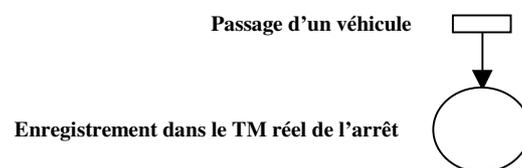


Figure 5.3 : Enregistrement des passages des véhicules

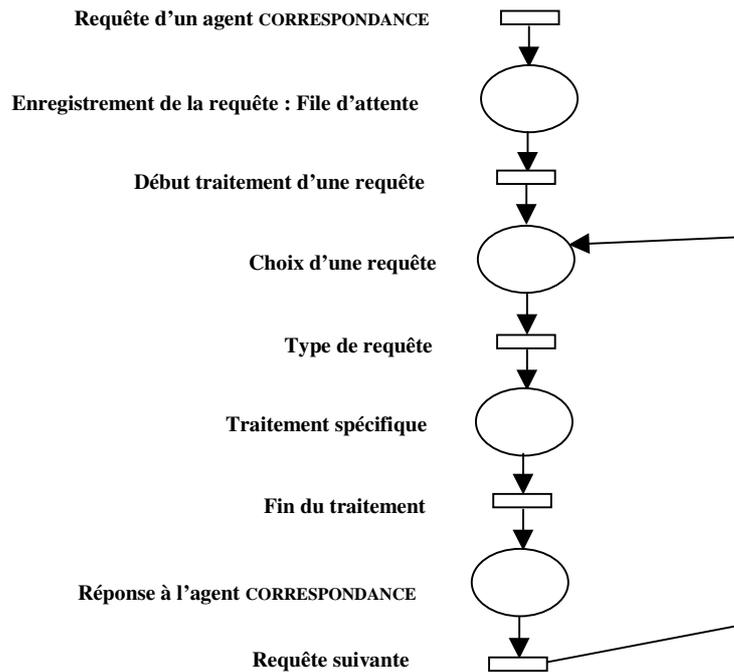


Figure 5.4 : Traitement d'une requête d'un agent correspondance

## 5.2.2 AGENT CORRESPONDANCE

Les agents CORRESPONDANCE sont chargés de la détection et de la détermination d'un ensemble de décisions pour réduire les perturbations.

Un agent CORRESPONDANCE communique avec ses accointances qui sont les autres agents CORRESPONDANCE, l'agent SUPERVISEUR et un ensemble d'agents ACQUISITION appartenant à la fenêtre temporelle de simulation. La communication d'un agent CORRESPONDANCE avec un groupe d'agents CORRESPONDANCE concernés par ses décisions est nécessaire à leur validation.

Nous décrivons le comportement du traitement des tâches de simulation par un agent CORRESPONDANCE par le réseau de Pétri de la figure 5.5.

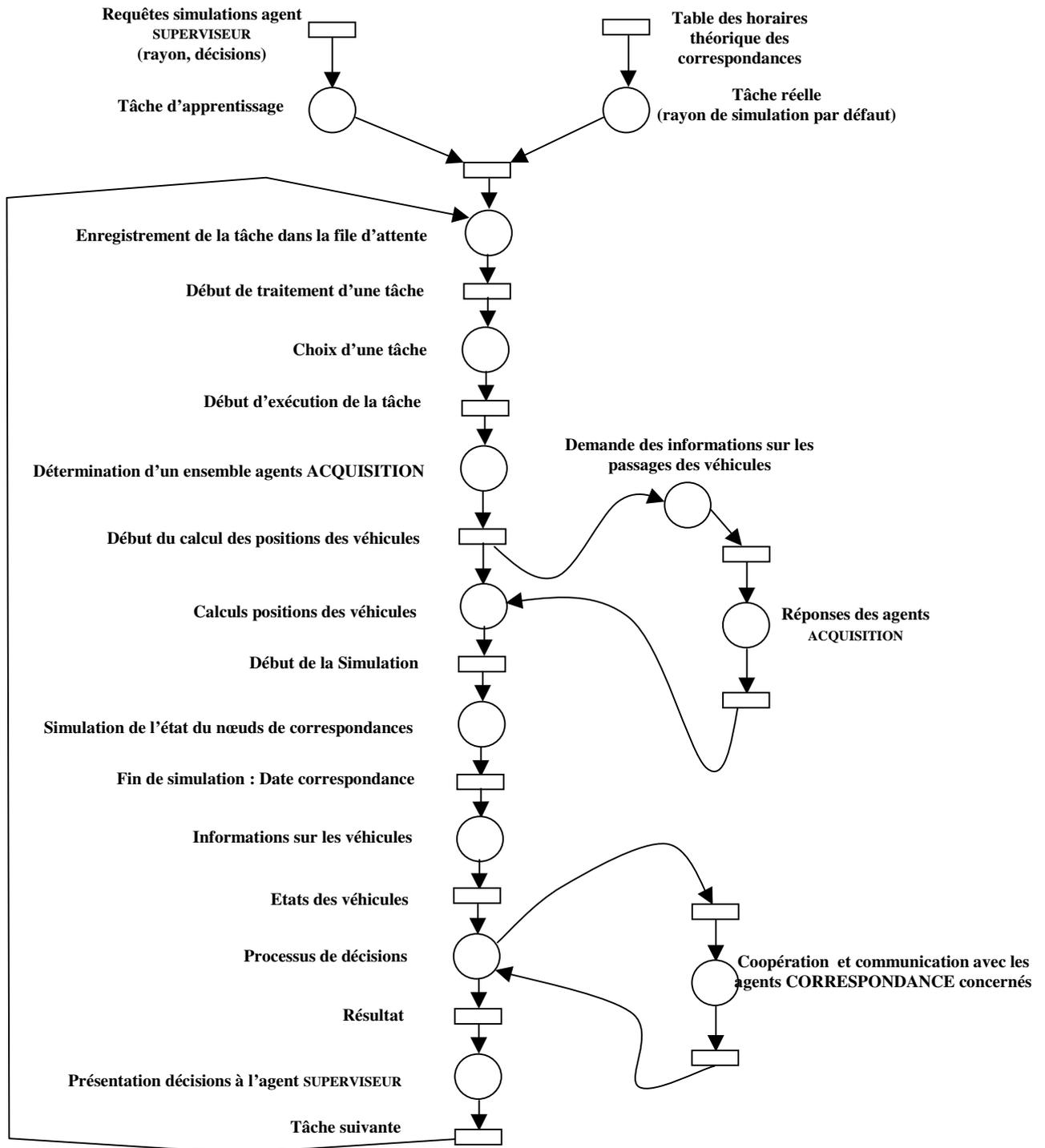


Figure 5.5 : Traitements des tâches de simulation

### 5.2.3 AGENT SUPERVISEUR

Le rôle principal de l'agent SUPERVISEUR est l'interface entre le SARC et le régulateur.

Cette interface consiste à :

- Traiter des messages.

- Envoyer des messages.

L'agent SUPERVISEUR communique avec le régulateur et ses accointances qui sont les agents CORRESPONDANCE du système multi-agent.

Parmi les traitements décrivant le comportement de l'agent SUPERVISEUR, nous présentons le traitement des requêtes du régulateur (figure 5.6).

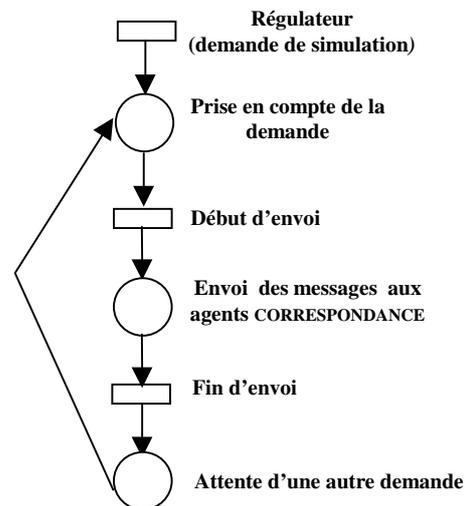


Figure 5.6 : Le traitement des requêtes du régulateur

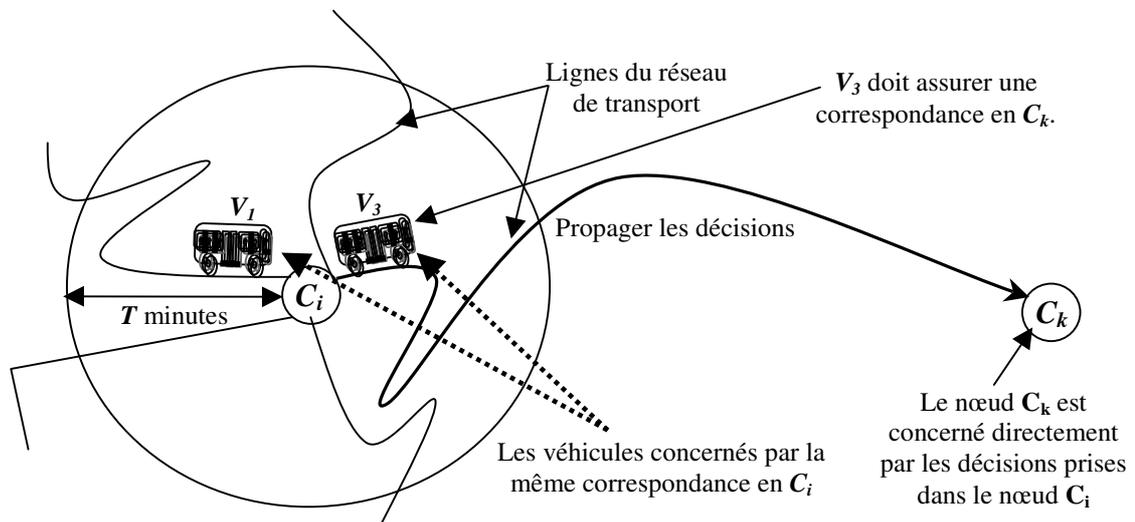
#### 5.2.4 COOPÉRATION ENTRE LES AGENTS CORRESPONDANCE

Le fonctionnement global du SMA proposé est décrit comme suit : Les agents ACQUISITION transmettent les informations sur les passages des véhicules aux agents CORRESPONDANCE. Les agents CORRESPONDANCE demandent des informations aux agents ACQUISITION et fournissent les décisions prises à l'agent SUPERVISEUR. Des décisions fournies sont des actions à réaliser sur les véhicules : accélérer, injecter, retarder, avancer, etc. L'agent SUPERVISEUR transmet les décisions des agents CORRESPONDANCE au régulateur et il leur transmet les requêtes faites par le régulateur. La relation entre ces trois types d'agents est hiérarchique. Une coopération entre les agents CORRESPONDANCE est établie pour échanger des messages d'information et de décision afin d'éviter de nouvelles perturbations. Cette coopération est basée sur une communication. La relation entre eux est égalitaire.

La communication entre les agents CORRESPONDANCES est réalisée par la propagation des actions (calcul des effets) prises au niveau d'un nœud de correspondances. Cette coopération suit les étapes suivantes :

- 1- Une simulation de veille est effectuée au niveau d'un nœud de correspondances (i.e. avant un temps équivalent à  $T$  minutes de l'horaire théorique d'une correspondance) par l'agent CORRESPONDANCE représentant ce nœud (voir

chapitre 3). Cet agent élabore des décisions en cas de perturbations, qu'il communique à l'agent CORRESPONDANCE concerné directement, c'est-à-dire représentant le nœud de correspondances relié par la ligne de transport (figure 5.7). Sur la figure 5.7, le véhicule  $V_3$ , sortant du nœud  $C_i$ , doit assurer une correspondance en nœud  $C_k$ .



**Figure 5.7 : La communication entre agents CORRESPONDANCE**

- 2- Une simulation des départs est réalisée par l'agent CORRESPONDANCE destinataire pour déterminer les effets des décisions à son niveau et donne son accord ou son refus à l'agent CORRESPONDANCE expéditeur et propage à son tour les décisions. Les décisions sont propagées d'un agent CORRESPONDANCE à un autre jusqu'à ce qu'elles soient refusées à cause d'un retard important au niveau d'un nœud, ou que le processus de simulation globale doit s'arrêter à cause d'un temps de simulation très grand. Ce genre de simulation est appelé la simulation macroscopique puisqu'elle peut concerner tous les nœuds de correspondances du réseau de transport (figure 5.8).

Nous avons utilisé le formalisme AUML<sup>3</sup> (Agent UML) [Bauer & al., 00][Bauer, 01] pour représenter la communication entre les agents CORRESPONDANCE en vue de valider les décisions locales prises par un agent CORRESPONDANCE (figure 5.8). Dans cette communication entre les agents CORRESPONDANCE, nous considérons l'importance du trafic au niveau des nœuds de correspondances. Cette considération correspond aux priorités des décisions prises par un agent CORRESPONDANCE par rapport à un autre. Dans le cas de la prise en compte du critère des priorités, un agent CORRESPONDANCE non prioritaire doit accepter les décisions prises par un agent CORRESPONDANCE plus prioritaire.

<sup>3</sup> AUML est l'extension de UML et il est utilisé pour décrire les interactions entre les agents.

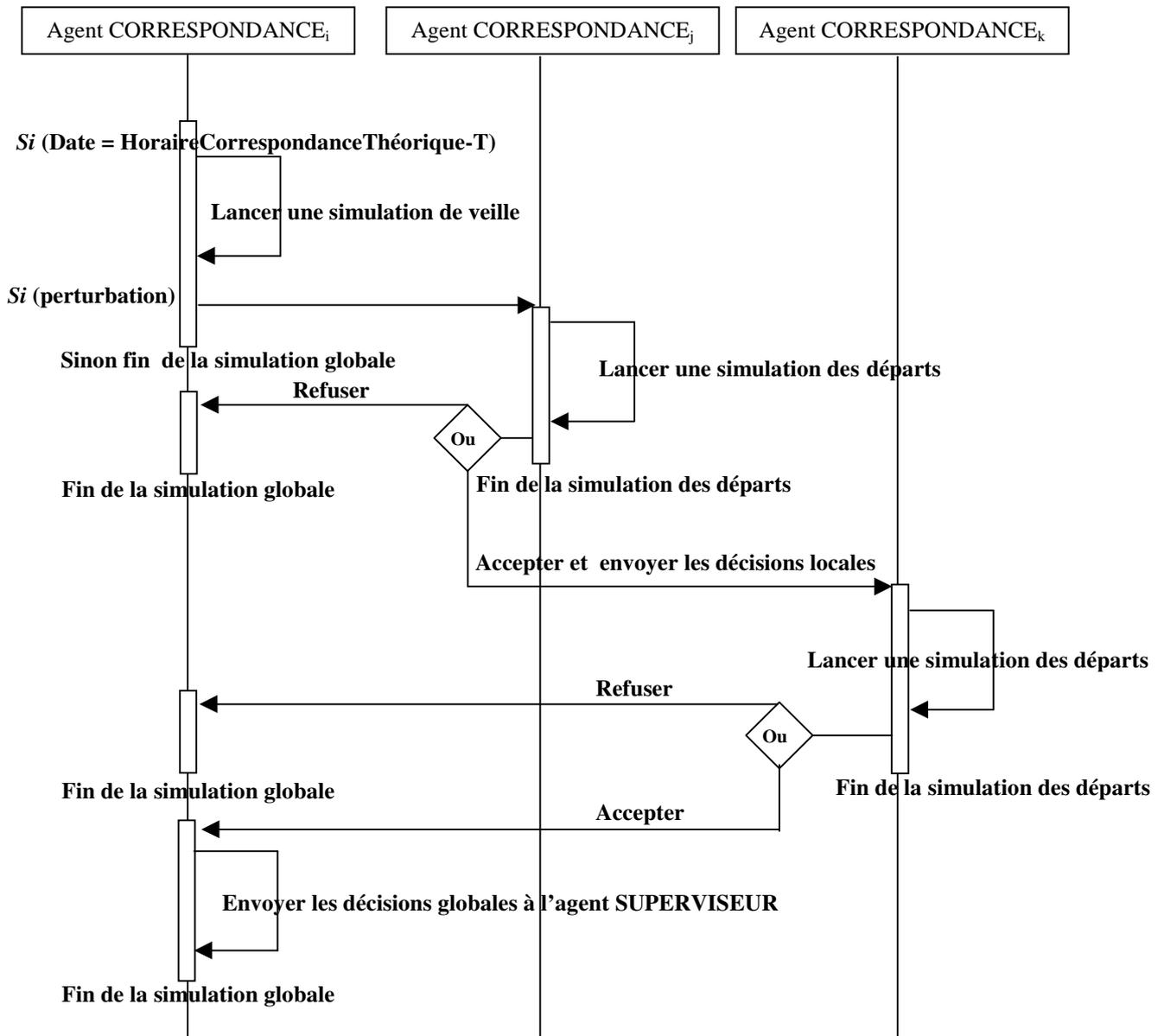
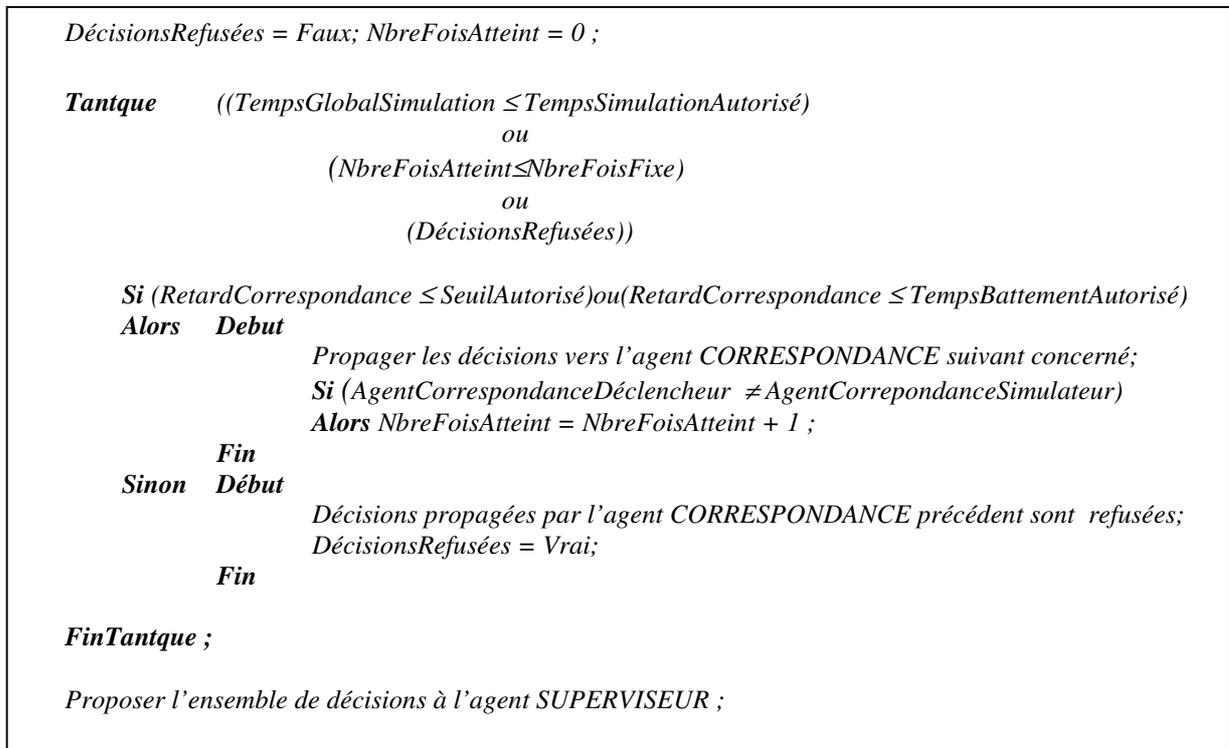


Figure 5.8 : L'illustration des interactions entre des agents CORRESPONDANCE concernés par un diagramme de séquences AUML.

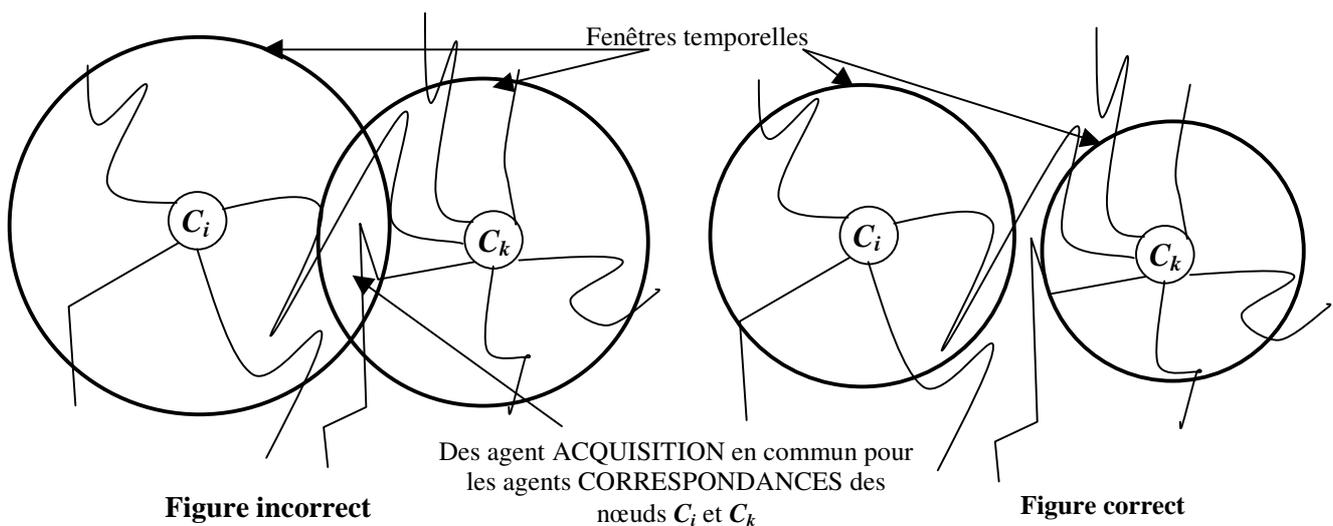
Le temps global de simulation, pour valider les décisions, doit être raisonnable sinon la simulation est arrêtée, c'est-à-dire qu'il ne doit pas dépasser l'horaire réel de la correspondance concernée sinon la simulation devient sans intérêt. L'agent CORRESPONDANCE déclenchant la simulation communique ses décisions aux autres agents CORRESPONDANCE afin d'avoir la validité ou non de ses décisions (voir figure 5.9). En cas de validité, ces décisions sont communiquées au régulateur par l'intermédiaire de l'agent SUPERVISEUR.

L'algorithme de contrôle de la coopération entre les agents CORRESPONDANCE est donné par la figure 5.9 :



**Figure 5.9 : Algorithme de contrôle de la coopération**

**Remarque :** Pendant la simulation, les rayons des fenêtres temporelles sont différents pour un agent CORRESPONDANCE. Le chevauchement entre les fenêtres temporelles de simulation au niveau des nœuds de correspondances n'est pas autorisé (figure 5.10).



**Figure 5.10 : Fenêtres temporelles de simulation**

Cette contrainte imposée évite d'avoir des agents ACQUISITION appartenant aux mêmes fenêtres temporelles. Ainsi, les agents CORRESPONDANCE n'ont pas d'accointances

d'agents ACQUISITION en commun. Car, le déclenchement de plusieurs simulations de veille par des agents correspondances entraîne une surcharge de communication pour un agent ACQUISITION en commun. Ainsi, sa réponse aux requêtes des agents CORRESPONDANCE est plus lente. Le rayon d'une fenêtre est fixé suivant la densité du réseau.

Dans la section suivante, l'implémentation du SMA proposé est présentée sous le logiciel de eM-Plant.

## 5.3 IMPLÉMENTATION SOUS EM-PLANT

Pour le développement de notre application, nous avons choisi d'utiliser le logiciel eM-Plant<sup>4</sup> [El-Hammouchi, 02]. Ce logiciel permet d'écrire du code dans un langage propre à lui nommé SimTalk et d'ajouter des programmes écrits en langage de programmation C. Il est basé sur les objets. La création de nouveaux objets permet la réutilisation de ceux déjà créés [eM-Plant, 00].

L'implémentation d'un agent est effectuée par la création d'un objet en lui associant un ensemble d'objets et un ensemble de méthodes. Cette implémentation correspond à un modèle. Dans la suite, nous allons donner l'implémentation d'un agent ACQUISITION et d'un agent CORRESPONDANCE. L'implémentation d'un agent SUPERVISEUR n'est pas encore réalisée. Car, nous considérons que les informations provenant des différents agents doivent être cohérentes entre elles pour les présenter au régulateur.

### 5.3.1 AGENT ACQUISITION

A chaque arrêt de régulation est associé un agent ACQUISITION. L'implémentation de cet agent, sous eM-Plant, consiste à représenter un arrêt de régulation avec les flux des passagers et des véhicules. La gestion des flux de passagers est effectuée suivant deux tâches :

- La montée des passagers dans des véhicules : Les passagers peuvent monter dans le véhicule de passage ou attendre un autre véhicule si la capacité du véhicule à l'arrêt est maximale
- La descente des passagers des véhicules : Les passagers peuvent quitter l'arrêt à pieds ou attendre un autre véhicule pour une autre destination (voir agent CORRESPONDANCE).

La gestion des passages des véhicules est réalisée suivant trois tâches :

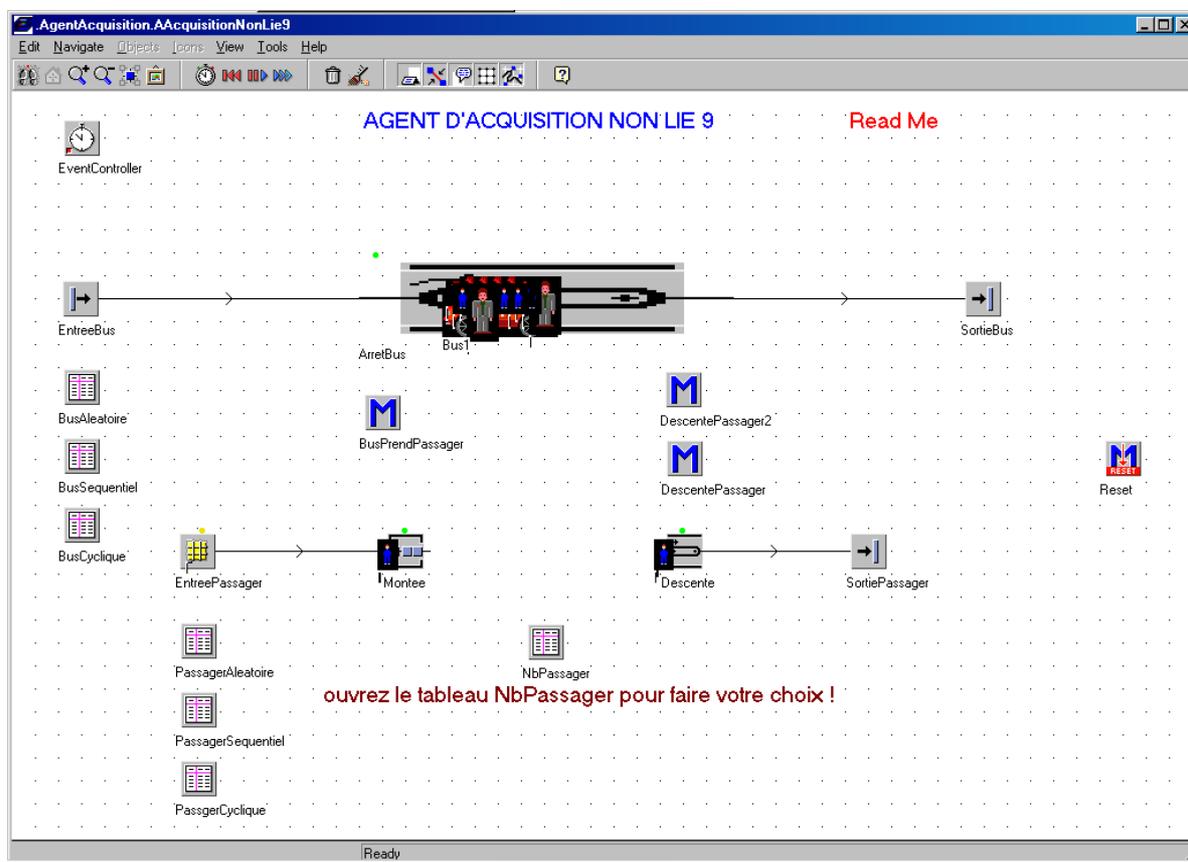
---

<sup>4</sup> Une description générale du logiciel est donnée en Annexe B.

- Les passages ponctuels des véhicules : la gestion est assurée à l'aide d'une table horaire.
- Les passages en intervalles des véhicules : la gestion est assurée par l'application d'un intervalle fixe entre les passages des véhicules.
- Les passages aléatoires des véhicules : la gestion est assurée à l'aide d'une fonction aléatoire.

La tâche d'enregistrement des horaires de passages des véhicules est aussi prévue.

Le modèle agent ACQUISITION est conçu selon les tâches citées ci-dessus. Une méthode est associée à chaque tâche. La figure 5.11 donne l'implémentation d'un agent ACQUISITION.



**Figure 5.11 : La simulation du modèle agent ACQUISITION**

eM-Plant permet la représentation de la dynamique des flux comme l'illustre la figure 5.11.

Une ligne d'un réseau de transport urbain est composée de plusieurs arrêts de régulation (un terminus est considéré comme étant un arrêt de régulation). Plusieurs instanciations de l'agent ACQUISITION sous eM-Plant constituent une ligne simple du réseau de transport. Le modèle d'une ligne simple est donné dans la figure 5.12.

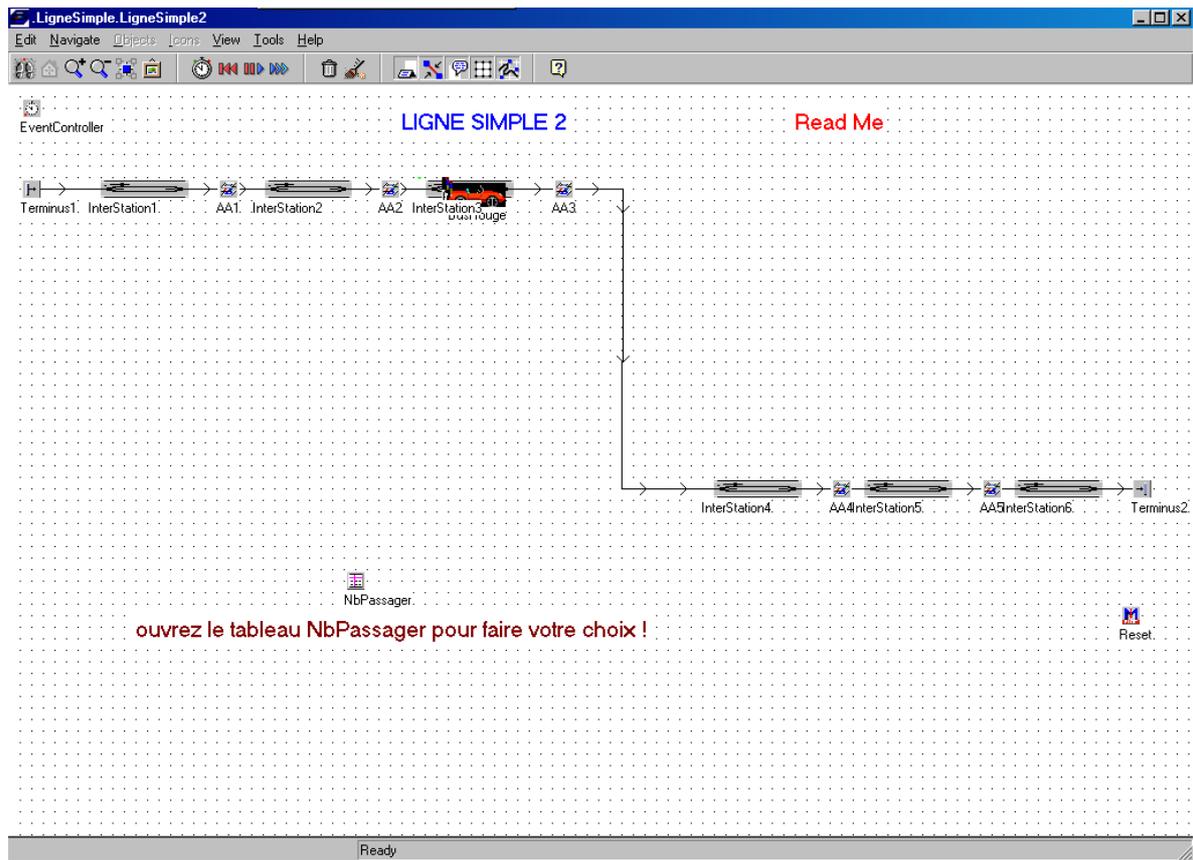


Figure 5.12 : L'illustration d'une ligne simple en utilisant des agents ACQUISITION

Sur la figure 5.12, les  $AA_i$ , avec  $i=1..5$ , représentent des agents ACQUISITION connectés entre eux par des inter-stations nommées  $InterStation_j$  avec  $j=1..6$ .

### 5.3.2 AGENT CORRESPONDANCE

Pour implémenter un agent CORRESPONDANCE sous eM-Plant, nous considérons un nœud de correspondances composé d'un ensemble d'arrêts de régulation représentatifs du nombre de lignes du réseau en un nœud. De plus, l'échange des voyageurs est prévu au niveau des nœuds. Dans ce cas, un agent CORRESPONDANCE est constitué d'un ensemble d'instances du modèle agent ACQUISITION avec l'échange des voyageurs entre les lignes. La continuité d'une ligne au niveau d'un nœud est représentée par le dédoublement d'une instance du modèle agent ACQUISITION pour cette ligne. Un modèle agent CORRESPONDANCE hérite les propriétés d'un modèle agent ACQUISITION.

L'implémentation d'un modèle agent CORRESPONDANCE nécessite au moins la représentation de deux lignes d'un réseau de transport se croisant pour réaliser un nœud. Un agent CORRESPONDANCE est chargé de la gestion d'échange des voyageurs au niveau du nœud qu'il représente. Cette gestion pour deux lignes consiste à prendre en compte les tâches suivantes :

- Les voyageurs descendant d'un véhicule partent à pied
- Les voyageurs transitent d'une ligne à une autre.

Dans un agent CORRESPONDANCE, l'implémentation de la gestion des passagers pour deux lignes, sous eM-Plant, nécessite l'association des trois méthodes suivantes (figure 5.13) :

- La gestion des descentes de la première ligne.
- La gestion des descentes de la deuxième ligne.
- La gestion de l'échange des passagers entre les deux lignes.

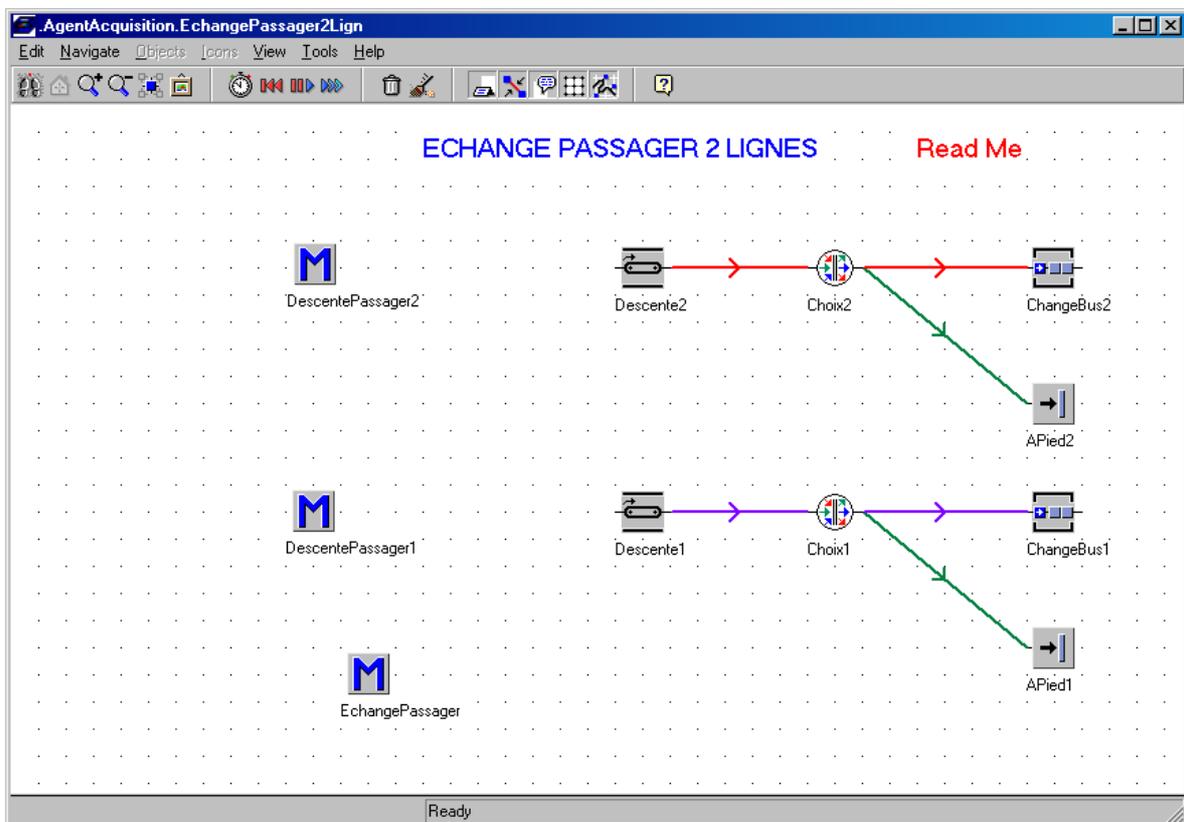


Figure 5.13 : L'échange de passagers entre deux lignes

La gestion des voyageurs entre trois lignes nécessite quatre méthodes :

- La gestion des descentes de la première ligne.
- La gestion des descentes de la deuxième ligne.
- La gestion des descentes de la troisième ligne.
- La gestion de l'échange des passagers entre les trois lignes.

L'implémentation, sous eM-Plant, de la gestion de trois lignes est donnée par la figure suivante (figure 5.14) :

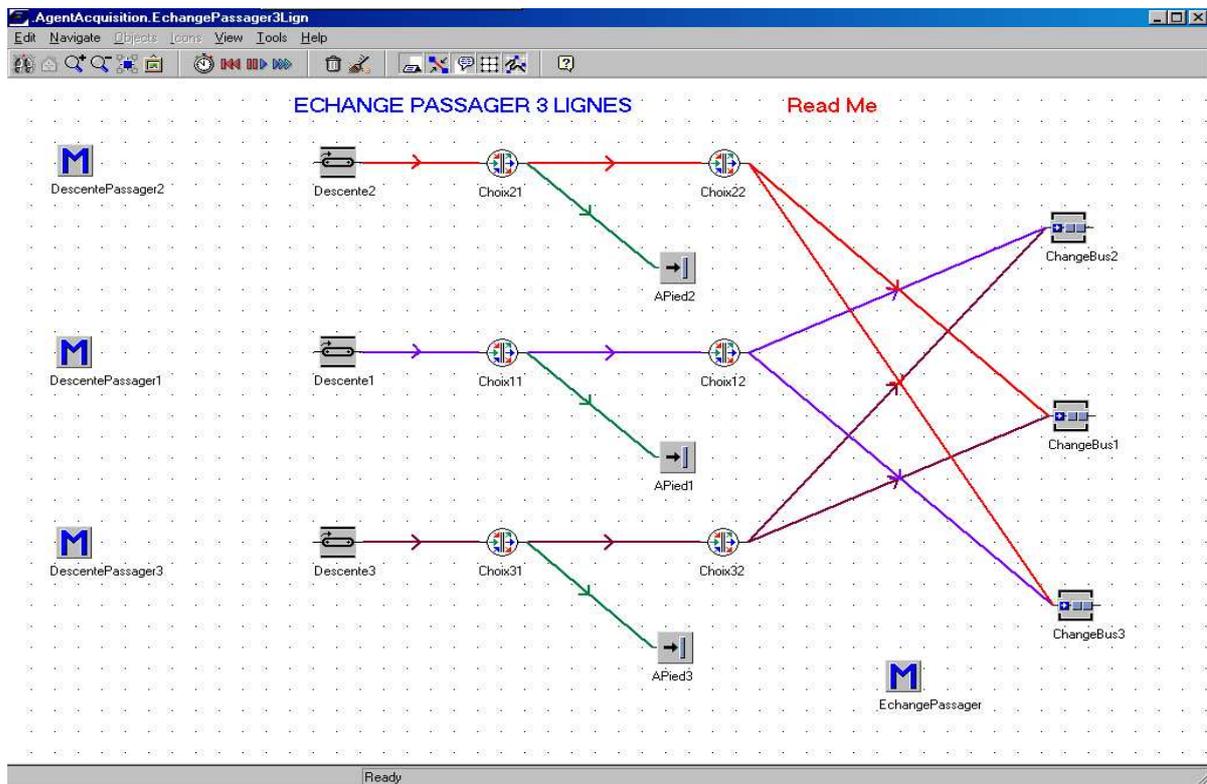


Figure 5.14 : L'échange des voyageurs entre trois lignes

Dans la figure 5.14, les passagers peuvent en descendant d'un véhicule, s'ils ne quittent pas le nœud à pieds, choisir de prendre une destination parmi les deux lignes restantes.

Pour la simulation de deux lignes, nous obtenons le résultat illustré par la figure 5.15.

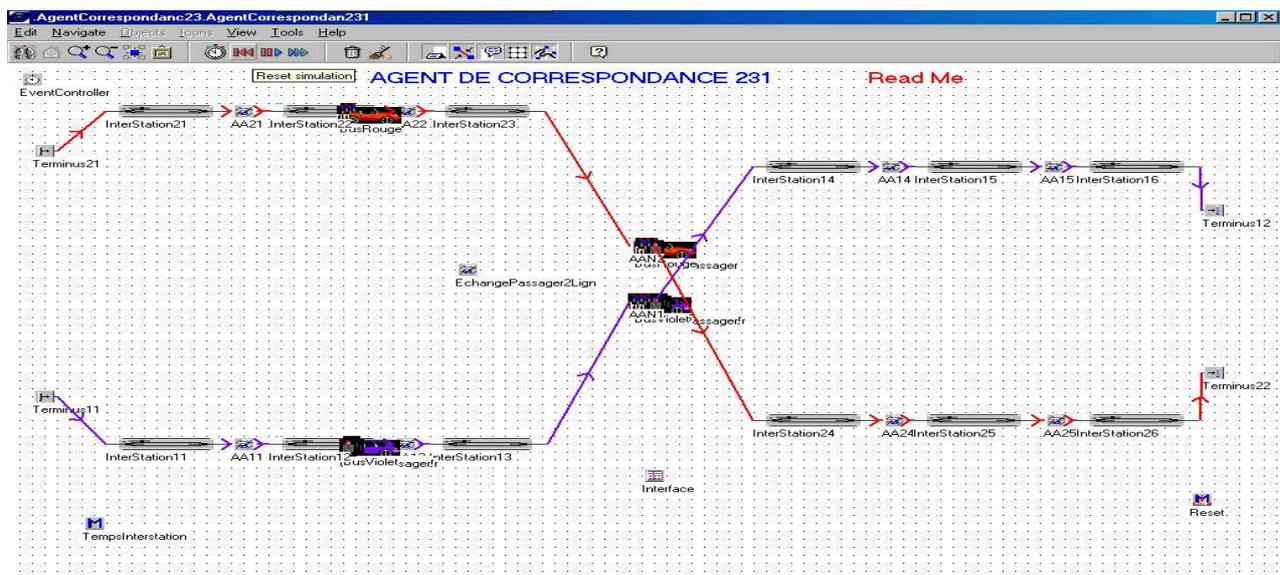


Figure 5.15 : La simulation de deux lignes avec un nœud de correspondances

La simulation de trois lignes du réseau avec un nœud de correspondances est donnée par la figure 5.16.

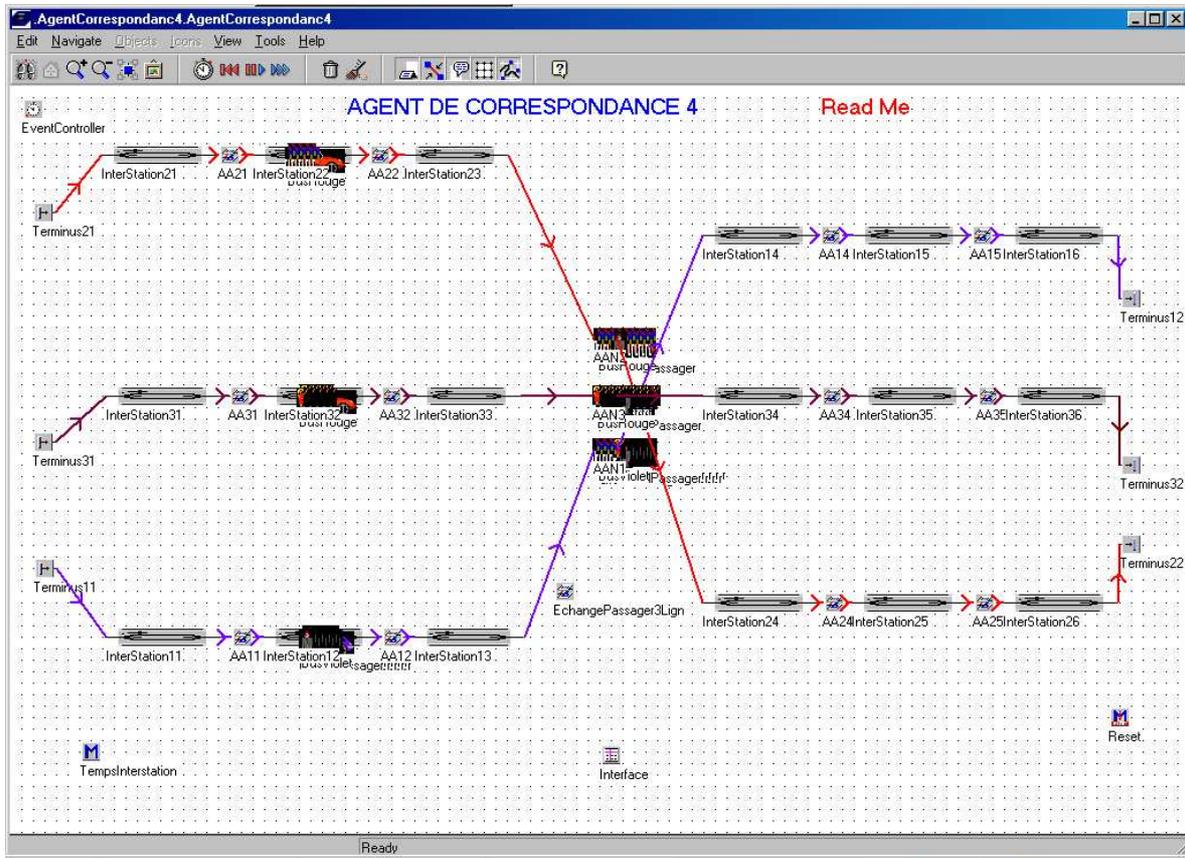


Figure 5.16 : La simulation de trois lignes avec un nœud de correspondances

Le processus d'échange des passagers peut être généralisé entre plusieurs lignes du réseau au niveau d'un nœud de correspondances. Les passagers peuvent choisir de quitter le réseau à pied ou prendre une autre ligne du réseau.

A partir des deux modèles agents présentés ci-dessus, l'implémentation d'un réseau de transport est aisée. Nous avons essayé d'appliquer ce travail au réseau de transport de Valenciennes et de Montbéliard. Ces deux applications sont présentées ci-dessous.

## 5.4 RÉSEAU DE TRANSPORT URBAIN DE VALENCIENNES

Après avoir effectué plusieurs visites au site de transport valenciennois, nous avons recueilli les données réelles et les documents concernant l'organisation du réseau et à son fonctionnement. De plus, nous avons pu observer le travail de régulation.

### 5.4.1 ARCHITECTURE DU RÉSEAU DE VALENCIENNES

Dans le cadre de nos travaux, nous décrivons le réseau de Valenciennes ainsi que son fonctionnement. Bien sûr, nous présentons le futur réseau de Valenciennes (i.e. l'intégration

du tramway). A travers l'étude du réseau valenciennois, nous montrons le fonctionnement d'un réseau de transport urbain et sa conception.

De manière classique, le réseau de Valenciennes est constitué de plusieurs lignes. Une ligne est subdivisée en tronçons ou inter-arrêts. On trouve trois types d'arrêts dans le réseau : arrêts simples, arrêts de régulation et arrêts terminus. Un arrêt de régulation peut devenir un arrêt terminus.

Actuellement, 17 lignes du réseau sont fonctionnelles (figure 5.17). Ce réseau est considéré comme un réseau de grande taille.



Figure 5.17 : Le réseau actuel de Valenciennes

Le suivi en temps réel du réseau de transport urbain est réalisé à l'aide du SAE. Ce dernier arrive à localiser les bus à l'aide des balises de détection installées au niveau de certains arrêts du réseau. La transmission des informations concernant les bus est garantie par un relais. Le régulateur peut suivre le déroulement de l'exploitation sur l'ordinateur SAE. Un bus peut commander les feux de signalisation (figure 5.18).

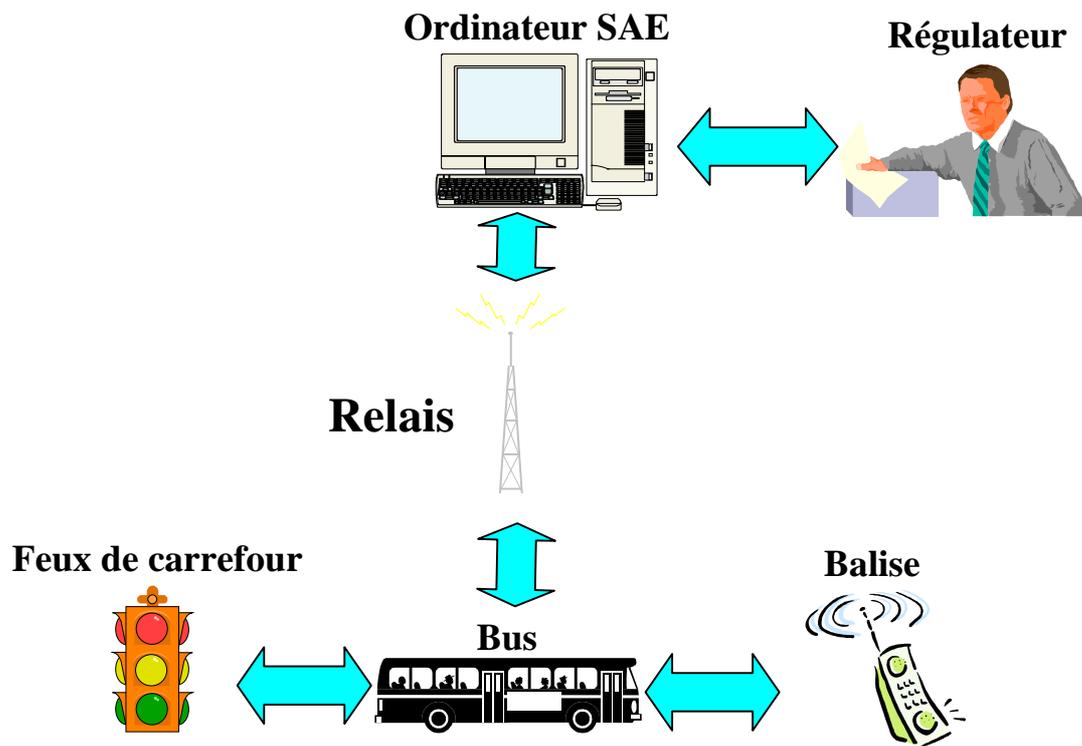


Figure 5.18 : L'exploitation du réseau de transport à l'aide du SAE (un schéma partiel)

Le réseau de transport urbain valenciennois est caractérisé par :

- La couverture d'une grande superficie (toutes les villes autour de Valenciennes).
- L'existence de lignes à antennes (5 lignes).
- L'existence de lignes à parcours long.
- L'absence de moyens nécessaires pour gérer correctement le réseau.
- L'existence de plusieurs nœuds de correspondances.

Nous pouvons hiérarchiser les nœuds de correspondances du réseau selon l'importance du trafic. Il y a deux nœuds de correspondances très importants : le nœud de la Gare du Hainaut (Valenciennes) et le nœud de Denain Liberté (Denain). La hiérarchisation des nœuds de correspondances est comme suit :

- Les nœuds : Gare du Hainaut et Denain Liberté ont la priorité la plus élevée.
- Les nœuds de correspondances du réseau desservis par les bus équipés d'un SAE.
- Les nœuds de correspondances desservis par les bus affrétés. Ces derniers appartiennent à d'autres compagnies de transport. Ils ne sont donc pas localisés par le SAE.

Le futur réseau de Valenciennes sera plus simple que l'actuel. Il sera caractérisé par des nœuds de correspondances reliés entre eux par des lignes à fréquence élevée. Sa particularité est l'introduction du tramway. Ce dernier enlèvera une très grande charge pour le centre ville. Ainsi, il améliorera la qualité du service offert aux voyageurs. De plus, le tramway évitera le passage des bus dans le centre ville afin d'éviter les congestions de trafic. La mission des bus sera concentrée, plutôt pour desservir les villes environnantes.

Ce futur réseau contiendra les moyens de transport suivants : les bus, le tramway et les trains. Les trains existent déjà dans le réseau actuel et leur gestion est subie par le réseau comme des contraintes temporelles à respecter pour la gestion des correspondances.

### 5.4.2 GRAPHICAGE ET HABILLAGE DU RÉSEAU

La mise en place d'une ligne est appelée le graphicage. Le graphicage est la détermination du tracé d'une ligne, le nombre d'arrêts sur cette ligne, leur implémentation, son temps de parcours et le nombre de véhicules nécessaires sur cette ligne selon le nombre de voyageurs en heures creuses, heures de pointe et en fin de soirée. En pratique, on compte 20 secondes pour chaque arrêt (montée et descente des voyageurs).

L'habillage est la phase d'association (ou d'affectation) d'un conducteur à un véhicule. On appelle service tout couple véhicule-conducteur. Nous avons deux types de service, service-voiture et service-agent. Un service-voiture est la course que réalise le véhicule indépendamment du conducteur et un service-agent est la course que réalise un conducteur indépendamment du véhicule.

Dans le réseau actuel de Valenciennes, on trouve les six types de services suivants (figure 5.19) :

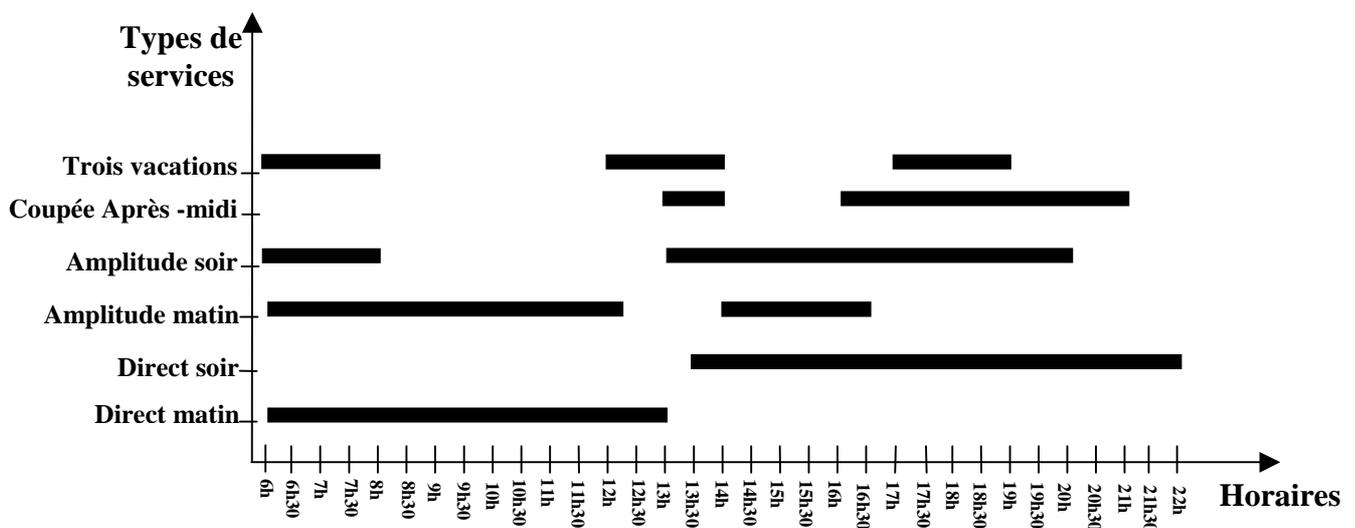


Figure 5.19 : Les différents types de services

Le direct matin : Ce service porte des numéros de 1 à 15. Il commence à 6 heures et il finit à 13h30.

- Le direct soir : Ce service est référencé par des numéros de 16 à 30. Il commence à 13h30 et se termine en fin de journée.
- Amplitude matin : Ce service est identifié par les numéros de 41 à 50. Il concerne les tranches horaires allant de 6h à 12h et de 14h à 16h.
- Amplitude soir : Ce service est numéroté de 31 à 40. Il concerne la période de la journée allant de 6h à 8h et celle allant de 13h à 20h.
- Coupé après-midi : Ce service est numéroté de 51 à 59. Il concerne les périodes 13h-14h et de 16h-21h.
- Trois vacations : Ce service sort des lignes commerciales. Il s'occupe des lignes scolaires (par exemple, les tranches horaires sont : 6h-8h, 12h-14h et 17h-19h).

### 5.4.3 ÉVALUATION DES TEMPS DE PARCOURS

Cette phase consiste à établir les horaires des lignes. A Valenciennes, l'équipe des méthodes (graphicage et habillage) de SEMURVAL utilise un logiciel nommé HASTUS [Hastus] pour déterminer les instants de passages des bus aux arrêts d'une ligne (figure 5.20).

Direction:		Station Crémazie		Inverser	Lieux...	Note	a	info					
Nte	Voi.	Ligne -voy	C	acadie	jaraca	jaresp	laujar	jarry	lielau	cremaz		M	C
<input type="checkbox"/>		1 52	0	5:00	5:10	5:15	5:16	5:19				2	5
<input type="checkbox"/>		2 52	0	5:20	5:30	5:35			5:37	5:40		1	1
<input type="checkbox"/>		1 52	0	5:40	5:50	5:53	5:55	5:58				2	6
<input type="checkbox"/>		2 52	0	6:00	6:10	6:15			6:17	6:20		1	1
<input type="checkbox"/>		1 52	0	6:20	6:30	6:34	6:35	6:38				2	6
<input type="checkbox"/>		2 52	0	6:40	6:50	6:55			6:57	7:00		1	1
<input type="checkbox"/>		3 52	0	6:58	7:08	7:13	7:14	7:17				2	2
<input type="checkbox"/>		1 52	10	7:10	7:20	7:25			7:27	7:30		0	1
<input type="checkbox"/>		2 52	0	7:20	7:30	7:35	7:36	7:39				1	5
<input type="checkbox"/>		4 52	0	7:30	7:40	7:45			7:47	7:50		0	1
<input type="checkbox"/>		3 52	5	7:40	7:50	7:55	7:56	7:59				1	5
<input type="checkbox"/>		1 52	0	7:50	8:00	8:05			8:07	8:10		0	1
<input type="checkbox"/>		2 52	0	8:00	8:10	8:15	8:16	8:19				1	5
<input type="checkbox"/>	a	4 52	0	8:10	8:20	8:25			8:27	8:30		0	1
<input type="checkbox"/>		3 52	0	8:20	8:30	8:35	8:36	8:39				1	5
<input type="checkbox"/>	a	1 52	2	8:32	8:42	8:47			8:49	8:51		0	0
<input type="checkbox"/>		2 52	5	8:45	8:55	9:00	9:01	9:04				2	4
<input type="checkbox"/>	a	3 52	0	9:00	9:10	9:15			9:17	9:21		1	0
<input type="checkbox"/>		1 52	5	9:15	9:25	9:30	9:31	9:34				2	5
<input type="checkbox"/>		2 52	6	9:30	9:40	9:45			9:47	9:50		1	1
<input type="checkbox"/>		3 52	5	9:45	9:55	10:00	10:01	10:04				2	5
<input type="checkbox"/>		1 52	5	10:00	10:10	10:15			10:17	10:20		1	1
<input type="checkbox"/>		2 52	5	10:15	10:25	10:30	10:31	10:34				2	5
<input type="checkbox"/>		3 52	5	10:30	10:40	10:45			10:47	10:50		1	1
<input type="checkbox"/>		1 52	5	10:45	10:55	11:00	11:01	11:04				2	5

Figure 5.20 : La détermination des horaires des véhicules selon HASTUS

HASTUS permet aussi la réalisation des opérations de graphycage (figure 5.21) et d’habillage.

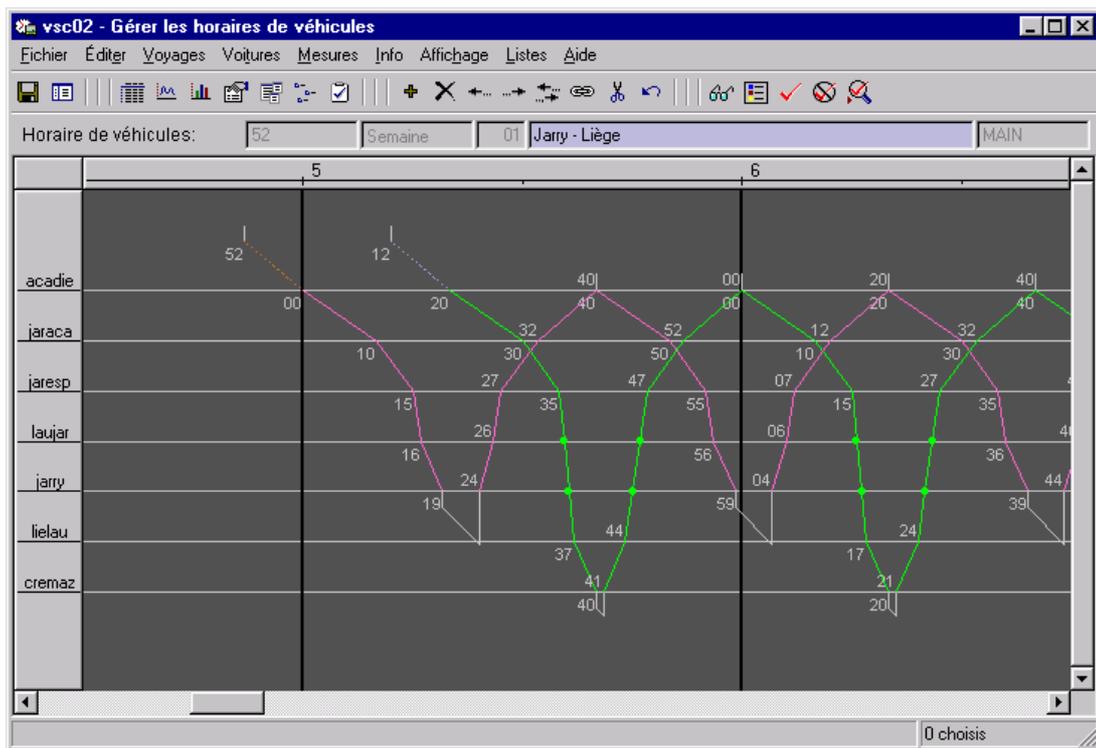


Figure 5.21 : Un exemple d’écran de graphycage selon HASTUS

Pour les calculs des instants de passages aux arrêts, le logiciel HASTUS utilise la formule suivante:

$$HeurePassageArrêt(K, V)_{AB} = HeureDépart_A + \frac{\left( \sum_{i,j \in AB}^{i=j} (distance_{ij} * facteur_{ij}(t)) \right)}{TempsTotal_{AB}}$$

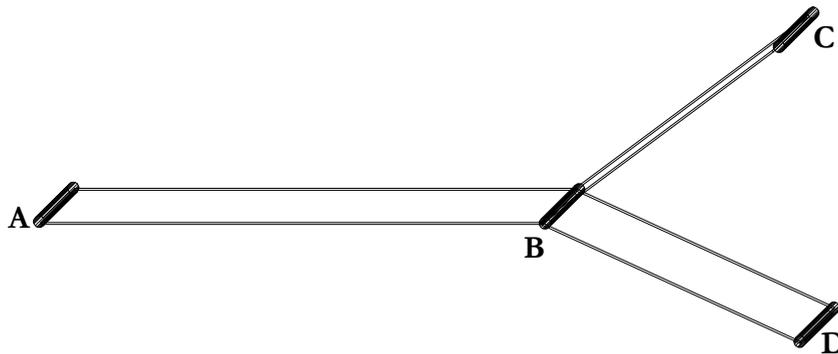
Cette formule signifie que pour la détermination de l’heure de passage d’un véhicule  $V$  à un arrêt  $K$  de la ligne  $AB$ , il faut connaître les distances inter-arrêts :  $distance_{ij}$ <sup>5</sup>, leur facteur temps selon le moment de la journée<sup>6</sup> :  $facteur_{ij}(t)$ , l’heure de départ du terminus  $A$  :  $HeureDépart_A$  et la durée du trajet allant du terminus  $A$  au terminus  $B$  :  $TempsTotal_{AB}$ . Dans la durée d’un trajet, les temps de battement sont pris en compte (temps d’attentes aux arrêts) par la fonction  $facteur_{ij}(t)$ .

Un facteur temps d’un inter-arrêt est déterminé par SEMURVAL à partir des chronométrages effectués au moins durant une journée. Son intérêt est d’indiquer à un instant donné de la journée  $t$  la fluidité du trafic sur un inter-arrêt.

<sup>5</sup> La distance entre deux arrêts successifs est calculée en minutes.

<sup>6</sup> Les moments de la journée représentent les heures de pointe, les heures creuses et les heures du soir.

Pour les antennes, le calcul s'établit segment par segment (figure 5.22):



**Figure 5.22 : Une ligne à antenne**

Le calcul est réalisé dans les deux directions :

- Direction 1 : de A à B, de B à C et de B à D.
- Direction 2 : de B à A, de C à B et de D à B.

La formule, ci-dessus, nous aide à estimer les heures de passages des véhicules à un moment donné au niveau des nœuds de correspondances pour la simulation : les agents ACQUISITION fournissent aux agents CORRESPONDANCE les derniers passages des véhicules aux arrêts de régulation. Ainsi grâce à la formule, les horaires approximatifs des véhicules sont calculés par rapport à un nœud de correspondances. Cette formule est implémentée dans la classe agent CORRESPONDANCE.

#### **5.4.4 MATÉRIEL DISPONIBLE**

SEMURVAL dispose de deux types de bus pour assurer l'exploitation du réseau. Ces bus sont :

##### **LES BUS SAE :**

Ces bus sont équipés pour le SAE. Ils sont localisés et suivis sur le réseau en temps réel. Il existe 156 Bus SAE dont 42 bus articulés et 114 Bus standards. En général, nous trouvons dans un bus l'équipement SAE suivant :

- Un tableau afficheur : il affiche le prochain arrêt desservi.
- Un écran avec clavier : l'écran affiche les noms d'arrêts à desservir et les prochaines courses du conducteur (l'horaire conducteur). Le clavier permet au conducteur de commander le tableau afficheur pour informer les voyageurs ou de

localiser (recaler) le bus par le SAE (sachant que le régulateur peut réaliser cette commande aussi).

- La radio : elle permet au conducteur de communiquer avec le régulateur surtout en cas de perturbation.
- Les voyants : ils indiquent au conducteur l'avance ou le retard du bus sur la course courante.
- Les boutons demande descente : les voyageurs ont à leur disposition des boutons pour demander de descendre à un arrêt. Le client voulant descendre doit appuyer sur un bouton demande arrêt avant de dépasser l'arrêt concerné.
- Le voyant demande descente : il permet au conducteur de savoir s'il y a des voyageurs qui veulent descendre au prochain arrêt.
- L'émetteur : il est relié au commissariat en cas d'agression afin d'enregistrer les conversations. L'émetteur sert d'alarme.
- L'appareil de compostage : l'appareil sert à valider les tickets de transport des voyageurs et aussi à compter le nombre de voyageurs dans le bus.

Dès que le conducteur prend son service, il rentre son matricule pour avoir ses horaires sur écran et sa prise de service. Le recalage d'un bus SAE est réalisable avant ou après un arrêt de régulation dans une plage de  $\pm 12$  mètres.

### **LES BUS AFFRÉTÉS :**

Ces bus ne sont pas localisés par le réseau car ils ne sont pas équipés pour le SAE. Les conducteurs ont des horaires à respecter. Ils desservent en priorité les lignes périphériques (antennes).

La SEMURVAL emploie 284 conducteurs de bus. Chaque conducteur travaille en moyenne 7,6 heures par jour (contrainte à respecter). Ainsi, la SEMURVAL traite avec des particuliers pour desservir des lignes du réseau avec les bus affrétés.

Au niveau de chaque nœud de correspondances, on trouve un chef de station qui assure la réalisation de la correspondance au niveau des arrivées des bus entrants, des départs des bus sortants et la bonne gestion des clients.

### 5.4.5 GESTION DU RÉSEAU

La gestion du réseau est divisée en sept unités. Chaque unité est constituée d'un chef d'unité, 60 conducteurs, un groupe de lignes et un sous parc (un ensemble de véhicules). La composition du réseau est présentée par la figure 5.23.

Le matin (7h00 à 7h30), 138 bus sur 156 bus sont utilisés. L'affectation des bus aux conducteurs pour le lendemain est réalisée le soir selon la fiche fournie par l'atelier (bus disponibles) à partir de 16h00.

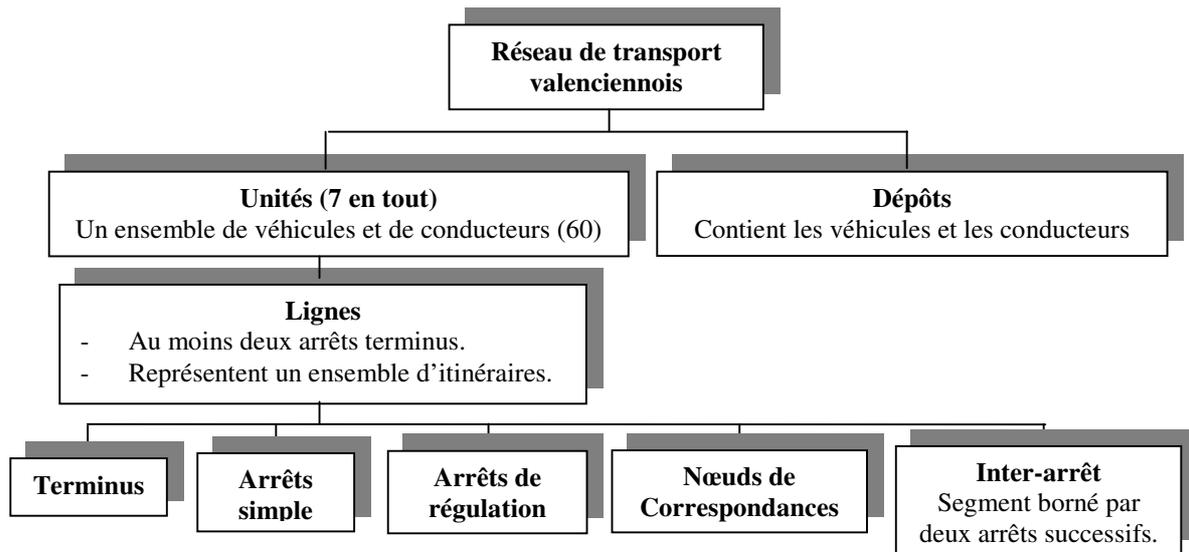
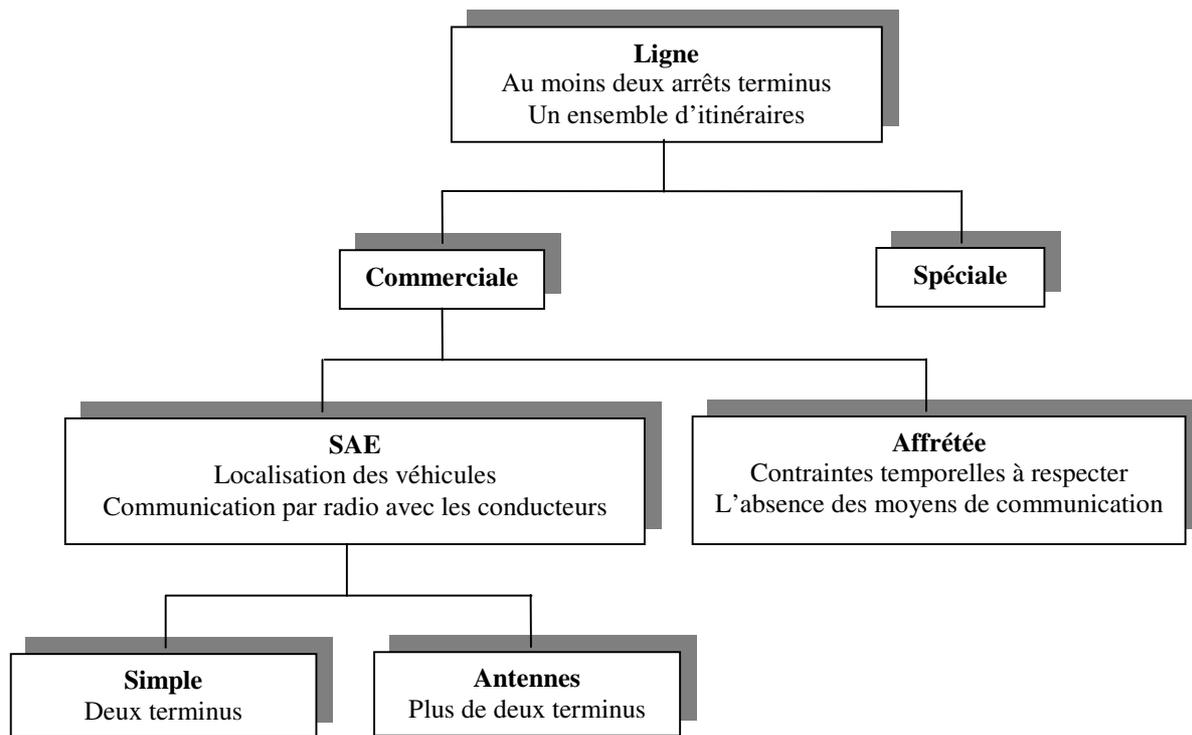


Figure 5.23 : La composition du réseau de Valenciennes

Une ligne du réseau est au moins constituée de deux arrêts terminus et un ensemble d'itinéraires (figure 5.24). Il existe des lignes spéciales et des lignes commerciales. Par exemple pour le ramassage scolaire des élèves aux sorties des écoles ou le ramassage des travailleurs aux sorties des usines, des lignes spéciales ont été définies. Ce type de lignes n'est pas visible sur le plan du réseau. Par contre, les lignes commerciales représentent les lignes existantes dans le plan du réseau et sont dotées d'horaires bien établis.

Il existe deux types de lignes : des lignes SAE et des lignes affrétées. Une ligne SAE permet la localisation permanente des véhicules grâce au SAE et une communication par radio peut être établie entre les conducteurs et le régulateur. Par contre, une ligne affrétée représente des contraintes temporelles à respecter car la localisation des véhicules est imprévue. La communication entre les conducteurs et le régulateur n'existe pas.

On trouve deux types de lignes SAE : des lignes simples et des lignes à antennes. Une ligne simple possède seulement deux terminus. Par contre, une ligne à antennes possède plus de deux terminus.



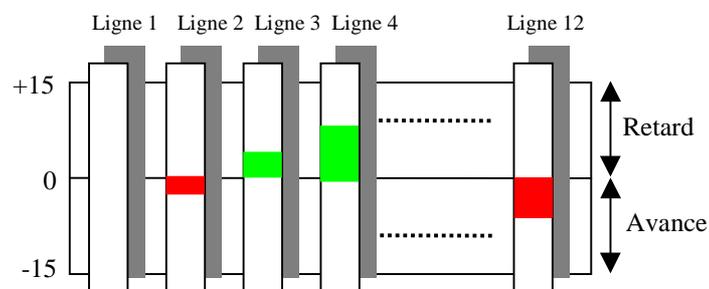
**Figure 5.24 : La classification des lignes du réseau**

Le SAE actuel a été mis en œuvre en 1986 selon un cahier des charges SEMURVAL. Son ergonomie de régulation n'est plus adaptée.

Les données acquises par le SAE sont visualisées par le régulateur à l'aide d'écrans d'affichage. Une imprimante peut imprimer tous les incidents produits (des alarmes) tout au long de la journée.

Le régulateur dispose de deux écrans d'exploitation qui lui permettent le suivi graphique des bus. Ils affichent les avances et/ou les retards des bus sur chaque ligne du réseau (12 lignes du réseau).

Pour chaque ligne, on peut visualiser le retard et/ou l'avance moyenne sur une amplitude de 15 minutes (figure 5.25).



**Figure 5.25 : L'affichage de l'état des lignes sur l'écran d'exploitation**

Sur l'écran, on peut visualiser aussi plusieurs types d'alarmes. Nous citons les alarmes suivantes :

- Appel de détresse d'un conducteur.
- Délocalisation d'un bus.
- Déviation d'un bus.
- Correspondances non assurées.
- Train de bus quant au moins deux bus se suivent.
- Relève non assurée.
- Retard au départ.

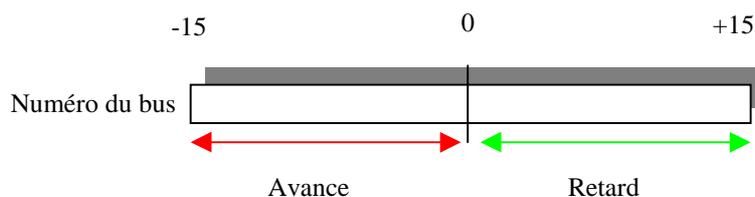
L'existence de deux écrans d'exploitation pour le suivi en temps réel donne la possibilité au régulateur d'utiliser le deuxième écran pour localiser le nom d'un conducteur en cas de perturbations (incidents) et le service du bus (son itinéraire).

Il existe aussi trois écrans radio :

- Ecran enregistreur des appels : il enregistre les appels des conducteurs et du régulateur qui sont conservés pendant 8 mois sur une bande magnétique.
- Ecran vérification d'identité fraude : il sert pour la vérification de l'identité d'un fraudeur.
- Ecran visualisation du parc de St-Saulve : il consiste à repérer les bus disponibles sur le parc.

En cliquant à l'aide d'une souris sur chaque ligne de la figure 5.25, on obtient le tracé de la ligne avec les arrêts de régulation, les nœuds de correspondances et les terminus ainsi que les bus circulant et leur prochain service (Heure, Véhicule, Terminus départ, Terminus d'arrivée). Les bus en retard sont représentés par une couleur verte, les bus en avance par une couleur rouge et les bus qui sont dans les temps par une couleur blanche.

L'état de chaque bus de la ligne est indiqué par une jauge d'avance/retard (figure 5.26).



**Figure 5.26 : L'état d'un bus**

Le retard autorisé par le régulateur est de 3 minutes maximum. Par contre, l'avance autorisée est d'une minute. Mais l'avance reste interdite pour un bus.

Il existe aussi un autre écran utilisé par le régulateur pour réaliser des fonctions de régulation. Pour la fonction correspondances du jour, le régulateur entre les données suivantes :

- Pour le véhicule assurant la correspondance (véhicule sortant) : l'heure, l'arrêt et le numéro du véhicule de la correspondance ainsi que le seuil d'attente autorisé.
- Pour le(s) véhicule(s) attendu(s) pour la correspondance (véhicule(s) entrant) : l'heure, l'arrêt et le numéro du véhicule de la correspondance.

Pour le suivi de l'exploitation, on peut aussi visualiser l'état du matériel sur un écran d'exploitation : nombre de véhicules affectés aux conducteurs, nombre de véhicules en réserve (généralement, de l'ordre de cinq véhicules), nombre de véhicules disponibles dans le parc et le nombre de véhicules en réparation (en atelier).

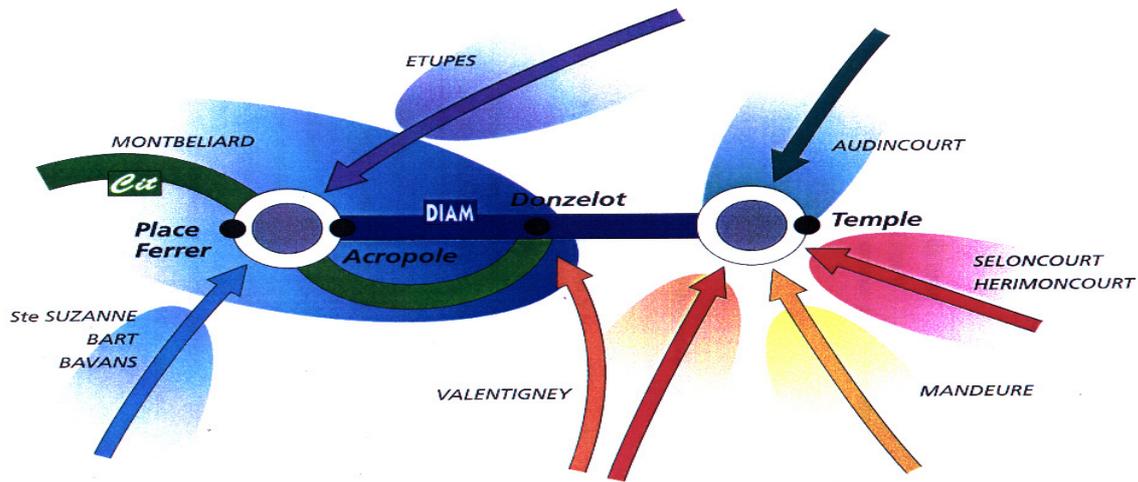
Pour la régulation, le réseau dispose de deux autres postes de régulation en plus de celui de St-Saulve : le poste de Denain Liberté et le poste de la Gare du Hainaut. Dans les deux postes de régulation, le régulateur dispose d'un écran d'exploitation et d'une radio. Il prend les décisions en demandant l'autorisation au régulateur du poste de St-Saulve.

Pour mieux gérer le réseau, SEMURVAL consulte les instructions municipales concernant la circulation, et peut jouer sur les panneaux des feux de signalisation aux carrefours.

**Remarque :** Outre sa tâche de régulation, nous avons constaté que le régulateur s'occupe de l'affectation des services et il tient le listing de pointage des conducteurs pour la prise du service.

## 5.5 DESCRIPTION DU RÉSEAU D'AUTOBUS DE MONTBÉLIARD

Nous souhaitons présenter le réseau de transport urbain de Montbéliard (figure 5.27) pour son architecture particulière (réseau en étoile) ainsi que pour l'importance de ses nœuds de correspondances. Ce réseau de transport a fait l'objet d'application pour le travail de B. Soussaul [Soussaul, 98] et celui A. Soulhi [Soulhi, 00]. De plus, nous avons visité ce réseau pour mieux comprendre la régulation des correspondances.



**Figure 5.27 : Le réseau de Montbéliard**

L'architecture du réseau de Montbéliard repose sur le principe du "hub and spoke". La méthode du "hub and spoke" a été développée aux Etats-Unis par les compagnies aériennes. Il s'agit d'une organisation du réseau aérien par rabattement systématique du trafic sur un ou plusieurs aéroports servant de pivots. Cette architecture permet d'accroître le flux de passagers dans les correspondances, d'accroître les fréquences et la taille des avions, ainsi que la rationalisation de la flotte et du personnel. Centralisateur, ce réseau étoilé correspond à une stratégie de concentration de l'offre dans l'espace (un "hub" et quelques axes privilégiés) et dans le temps (brusques périodes d'affluence dans les aéroports coupés de temps morts) [Soussaul, 98].

Pour des raisons géographiques, la Compagnie des Transports du Pays de Montbéliard (CTPM) a conçu son réseau sur le principe du "hub and spoke". En effet, le réseau de Montbéliard s'organise autour de deux grands nœuds de correspondances d'où partent toutes les lignes de bus qui desservent le territoire.

Ces deux nœuds de correspondances : Acropole et Temple, sont situés respectivement sur les plus grosses communes du pays de Montbéliard : Montbéliard et Audincourt, où le trafic de voyageurs est toujours important. Les deux nœuds sont reliés par une ligne à axe lourd (fréquence élevée : 10 minutes entre deux bus). Cette ligne, appelée la DIAM (Directe Audincourt-Montbéliard), permet de faire transiter rapidement les voyageurs d'un nœud vers l'autre.

A partir de ces deux nœuds de correspondances (Acropole et Temple), il existe des lignes secondaires qui permettent aux voyageurs d'aller à l'intérieur du territoire. Ces lignes ont une faible fréquence et de nombreux arrêts afin de desservir tout le territoire de façon homogène.

Cette architecture de réseau focalise les transits vers les deux nœuds de correspondances qui deviennent des points de passage obligatoires pour les voyageurs voulant se déplacer sur le territoire.

La CTPM dispose d'un Système d'Aide à l'exploitation (SAE) mis en place depuis plusieurs années et permettant d'une part, de fournir au poste de contrôle des informations précises sur l'état du réseau et, d'autre part, de mieux informer les voyageurs.

### 5.6 SCÉNARIIS APPLIQUÉS AUX CORRESPONDANCES

A ce jour, l'implémentation doit se poursuivre pour la description des réseaux. Pour cela, nous étudions deux exemples pour comprendre la régulation des correspondances. Pour ces scénariis, nous proposons d'utiliser une partie du réseau de transport urbain actuel de Valenciennes (figure 5.28).

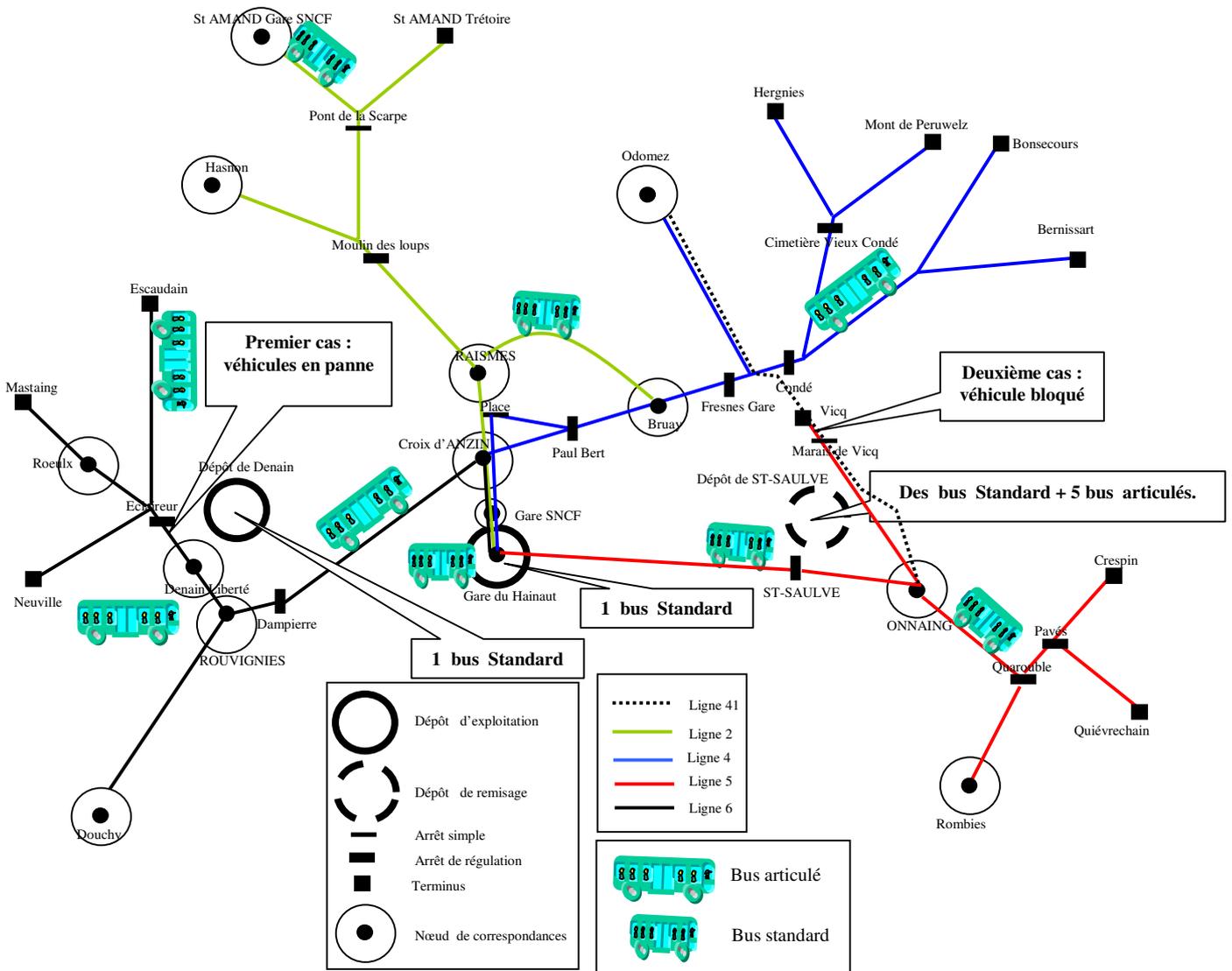


Figure 5.28 : Une partie du réseau de Valenciennes

Dans ce cadre, nous nous sommes attachés à des situations de perturbations possibles dans le réseau de transport d'autobus actuel. A travers les situations de perturbations étudiées, nous proposons des solutions jugées pertinentes pour assurer une correspondance éventuelle selon le moment de la journée (heures de pointe, heures creuses). Suite à la solution, les propositions ont été discutées avec les responsables de la régulation et au niveau du groupe du travail dont nous appartenons<sup>7</sup>.

Nous constatons que le résultat dépend de plusieurs facteurs. Parmi ces facteurs, il y a la disponibilité du matériel roulant (véhicules) et la proximité des réserves (dépôts et garages). Le manque du matériel roulant laisse les régulateurs limités dans les décisions à prendre. Car, les véhicules sont souvent indisponibles suite à la maintenance programmée par l'équipe de l'atelier et au nombre insuffisant pour desservir le réseau dans sa totalité. La proximité des réserves influence sur le temps d'application des décisions. Si les réserves sont près du lieu de la perturbation, les décisions sont appliquées plus rapidement et la perturbation est vite résorbée. Dans le cas contraire, la perturbation est amplifiée.

Nous présentons deux scénarii : le premier scénario représente une perturbation provoquée par une panne d'un bus et le deuxième scénario représente une perturbation suite au blocage d'un bus dans le trafic.

Au niveau ressources, le régulateur dispose du matériel disponible en réserve. Ce matériel est situé dans le réseau aux dépôts comme suit (figure 5.29) :

- Un bus standard au dépôt d'exploitation de Denain.
- Un bus standard au dépôt d'exploitation de la Gare du Hainaut.
- Des bus standards et 5 bus articulés au dépôt de remisage de St-Saulve.

### 5.6.1 SCÉNARIO1 : PERTURBATION SUITE À UNE PANNE DE BUS

Un bus articulé tombe en panne, sur la ligne 6, près du dépôt de Denain entre l'arrêt de régulation "Eclaireur" et le nœud de correspondances "Denain Liberté". Ce bus doit partir à destination du nœud de correspondances la "Gare du Hainaut". La perturbation est détectée par l'agent CORRESPONDANCE "Denain Liberté" à l'aide d'une simulation de veille lancée par cet agent. Ce dernier exploite l'information fournie par l'agent ACQUISITION "Eclaireur" sur l'horaire réel du passage de bus à cet arrêt.

Cette perturbation peut engendrer les risques suivants :

---

<sup>7</sup> Projet coopératif GRRT pour l'amélioration des déplacements des voyageurs dans les réseaux de transport urbain. Les partenaires sont I3D-USTL, LAMIH-UVHC, LAIL-ECL et l'INRETS de Villeneuve d'Ascq.

- Rater les correspondances au niveau des nœuds de correspondances : “Denain Liberté”, “Rouvignies”, “Croix d’Anzin” et “Gare du Hainaut”.
- Perdre au moins une révolution<sup>8</sup> sur la ligne 6.

La ligne 6 du réseau est gérée en fréquence et les bus utilisés sont des bus articulés. Ces informations doivent être prises en compte pour la résolution de cette perturbation. Une solution est proposée suivant la période de la journée (heures de pointe, heures creuses) pour la résolution totale de la perturbation.

En heures creuses, la solution envisagée est la suivante :

- Utiliser le bus de type standard en réserve au dépôt de Denain, avec une action Haut-Le-Pied (HLP) : un transbordement des voyageurs vers ce bus sera commandé à partir du bus articulé en panne.
- Conduire les voyageurs jusqu’à Valenciennes (Gare du Hainaut).
- Envoyer un bus articulé du dépôt de St-Saulve à la Gare du Hainaut pour assurer la relève sur la ligne 6. Cette action sera commandée en même temps que la précédente.
- Faire attendre les correspondances si le retard n’est pas important.
- Renvoyer au dépôt de Denain le bus de réserve une fois arrivé à Valenciennes.
- Jouer sur les temps de battement aux arrêts pour résorber le retard causé par cette perturbation.
- Prévenir l’équipe de dépannage.

Aux heures de pointe, la solution proposée est proche de la solution précédente à part qu’il faut utiliser un autre bus standard en plus de celui du dépôt de Denain liberté. A cause de l’importance de la fluidité du trafic à un tel moment de la journée, la solution est donc la suivante :

- Utiliser le bus de type standard en réserve au dépôt de Denain, avec une action Haut-Le-Pied (HLP) : un transbordement des voyageurs vers ce bus sera commandé à partir du bus articulé en panne.
- Utiliser le bus standard garé à la Gare du Hainaut pour prendre le reste des voyageurs qui n’est pas pris par le bus standard du dépôt de Denain.

---

<sup>8</sup> Trajet effectué par une voiture composé d'une course aller et d'une course retour consécutives.

- Conduire les voyageurs jusqu'à Valenciennes (Gare du Hainaut).
- Envoyer un bus articulé du dépôt de St-Saulve à la Gare du Hainaut pour assurer la relève sur la ligne 6. Cette action sera commandée en même temps que la précédente.
- Faire attendre les correspondances si le retard n'est pas important.
- Renvoyer au dépôt de Denain le bus de réserve une fois arrivé à Valenciennes.
- Jouer sur les temps de battement aux arrêts pour résorber le retard causé par cette perturbation.
- Prévenir l'équipe de dépannage.

Il existe, sûrement, d'autres solutions mais cela dépend surtout du matériel disponible en réserve, de la proximité de la perturbation et bien sur du moment de la journée.

Ces solutions sont pour la résolution générale de la perturbation. Dans ces solutions, l'agent CORRESPONDANCE "Denain Liberté" accomplit les rôles suivants :

- La détection de la perturbation sur le réseau.
- La commande des actions de régulation pour la correspondance concernée par cette perturbation. Dans ce cadre, si le retard est important, alors il faut demander au bus assurant la correspondance de partir (avancer le bus sortant), sinon il faut attendre l'arrivée des voyageurs du bus en panne.
- La coopération avec les agents CORRESPONDANCE : "Rouvignies", "Croix Anzin" et "Gare du Hainaut". Les quatre agents délimitent la zone perturbée.

### **5.6.2 SCÉNARIO2 : PERTURBATION DUE AU BLOCAGE D'UN BUS DANS LE TRAFIC**

Un bus est bloqué à l'arrêt de régulation "Vicq" vue l'importance du trafic. Ce bus est en direction de Valenciennes. Son terminus est la "Gare du Hainaut". Les risques qui peuvent être engendrés sont :

- Rater les correspondances au niveau des nœuds de : "Onnaing" et celui de la "Gare du Hainaut".
- Perdre au moins une révolution sur la ligne 5.

La perturbation est détectée par l'agent CORRESPONDANCE "Onnaing" à l'aide d'une simulation de veille lancée par cet agent. Ce dernier exploite l'information fournie par l'agent ACQUISITION "Vicq" sur l'horaire réel du passage de bus à cet arrêt.

Dans ce cas, la solution intéressante est de commander une déviation en utilisant la ligne 41 du réseau. Cette solution est valable à n'importe quel moment de la journée.

Dans cette solution, l'agent CORRESPONDANCE "Onnaing" accomplit les rôles suivants :

- La détection de la perturbation sur le réseau.
- La commande des actions de régulation pour la correspondance concernée par cette perturbation. Dans ce cadre, si le retard est important, alors il faut demander au bus assurant la correspondance de partir (avancer le bus sortant), sinon il faut attendre l'arrivée des voyageurs du bus en panne.
- La coopération avec l'agent CORRESPONDANCE "Gare du Hainaut". Les deux agents délimitent la zone perturbée.

Enfin, on peut dire que chaque régulateur propose des solutions en fonction de leur expérience et de leur expertise. Une même situation de perturbation peut être résolue par des approches totalement différentes.

## 5.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons détaillé l'architecture du système multi-agent proposé en décrivant les comportements de chaque type d'agents à l'aide des réseaux de Pétri. Pour la simulation, nous avons montré comment nous avons utilisé le logiciel eM-Plant.

Nous avons vu à travers les scénarii, la diversité des solutions pour la résolution d'une perturbation. Ainsi, nous avons constaté que la régulation est une tâche très délicate qui nécessite de l'expérience et de la maîtrise.

Dans SARC, trois types de simulations du fonctionnement du réseau de transport urbain peuvent être organisées au niveau d'un nœud de correspondances par un agent CORRESPONDANCE:

- 1- Une simulation de veille : Cette simulation permet une surveillance locale du nœud de correspondances. Elle est réalisée sur des fenêtres temporelles fixées en fonction de la densité du réseau de transport.
- 2- Une simulation des départs : Elle permet une détection automatique des retards. Un dialogue entre le groupe d'agents correspondances concernés permet de réduire

ou d'éviter les retards. On appelle ce type de simulation surveillance macroscopique.

- 3- Une simulation prédictive : Elle est demandée par le régulateur et peut être utilisée pour la formation et l'apprentissage de la régulation. Une action peut être simulée et ses effets, à plus au moins long terme, déterminés avant qu'elle soit entreprise.

Dans la suite, nous présenterons les ouvertures proposées par notre travail de recherche pour la régulation des correspondances dans les réseaux de transport urbain en utilisant un SMA. Nous expliciterons ensuite les perspectives de notre travail.

**CONCLUSION & PERSPECTIVES**

# CONCLUSION & PERSPECTIVES

Ce chapitre est décomposé en deux parties. Les conclusions, tout d'abord, font le point sur les aspects originaux qui ont été proposés dans ce travail, en restituant brièvement son contexte et les hypothèses qui ont été posées. La seconde partie concerne les perspectives d'amélioration ultérieure de SARC et son intégration dans le SAE pour un suivi en temps réel des perturbations.

## 1 CONCLUSIONS DES TRAVAUX

Un nombre significatif de recherches a été consacré à l'étude des systèmes de transport urbain. La modélisation du transport urbain tient une place importante dans le processus de planification du transport et connaît une évolution continue. Le contexte général est alors marqué par la volonté d'infléchir la croissance explosive de la mobilité individuelle à moindres frais. Cela passe par la nécessité de mieux comprendre les motivations exactes qui président aux choix de déplacement et donc la nécessité de passer d'une approche descriptive à une approche causale des phénomènes. On recherche alors des instruments de modélisation capables de prévoir la demande de transport à long terme (chapitre 1 "**Réseaux de Transport Urbain**"). Pour la modélisation d'un réseau de transport urbain en vue de la régulation des correspondances, nous avons proposé une modélisation multi-agent. L'approche multi-agent exploite la distribution géographique ainsi que la distribution des connaissances et du contrôle dans le réseau (chapitre 2 "**Systèmes Multi-Agents**"). Cette modélisation est composée de trois types d'agents : un agent SUPERVISEUR (interface) chargé du dialogue avec le régulateur, des agents CORRESPONDANCE (décision), un par nœud de correspondances et des agents ACQUISITION (perception), un par arrêt de régulation. Dans cette modélisation, la régulation des correspondances est basée sur le processus de contrôle par anticipation proposé dans le chapitre 3 (**Modélisation Multi-Agent d'un Réseau de Transport**). Une perturbation est détectée avant son apparition au niveau d'un nœud de correspondances et sa résolution est anticipée.

La dynamique de la modélisation multi-agent proposée est représentée par les agents CORRESPONDANCE. Cette dynamique est basée sur le mécanisme de communication qui

permet aux agents de coopérer afin d'éviter d'éventuelles perturbations. Ainsi, nous avons présenté l'organisation de cette coopération entre les agents CORRESPONDANCE pour valider les décisions prises par un agent au niveau d'un nœud de correspondances. Dans ce cadre, nous avons proposé un algorithme de coopération dans le chapitre 4 "**Régulation des Correspondances**".

Dans le chapitre 5 "**Validation de la Modélisation Multi-Agent**", nous avons décrit le réseau de transport urbain de Valenciennes sur lequel nous appliquons ces travaux de recherche. D'ailleurs, un ensemble de scénarii est étudié pour l'évaluation de la régulation des correspondances.

Nous avons montré l'importance des correspondances dans les réseaux de transport urbain. Une régulation automatisée des correspondances peut améliorer considérablement la qualité du service offert sur tout le réseau. Or, la charge de travail du régulateur ne lui permet pas de porter une attention particulière à la régulation des correspondances. Pour un réseau de transport urbain, l'objectif d'un système d'aide à la décision consiste à élaborer, à évaluer et à proposer des solutions de régulation au régulateur. Ainsi, sa tâche sera allégée, ce qui améliorera la qualité de la régulation. Bien sûr, un système d'aide ne prétend pas remplacer le régulateur, mais il doit apporter une aide dans la prise de décision, décision dont le régulateur sera toujours le maître. C'est dans cette optique que nous avons réalisé nos travaux de recherche.

Nous avons, aussi, montré que dans la littérature, il n'existe pas encore de consensus pour les méthodologies de conception existantes des systèmes multi-agents et sur les plates-formes de développement existantes de ces systèmes. Actuellement, il existe des tentatives d'unification des méthodologies existantes, et une réflexion sur la standardisation des plates-formes est en cours.

## 2 PERSPECTIVES

Les perspectives de nos travaux de recherche sont multiples. Lors de nos recherches, nous avons été confrontés à plusieurs autres problèmes liés à notre domaine. Nous en indiquons ici quelques-uns qui recevront toute notre attention dans la suite de nos travaux. Parmi ceux-ci, nous citons deux types de perspectives :

Le premier type de perspectives exploite directement le travail effectué sur l'application :

1. Poursuivre et terminer l'implémentation du système d'aide SARC sous eM-Plant afin de le valider à partir de situations de perturbations réelles tirées du réseau de transport de Valenciennes.
2. Intégrer le système d'aide SARC dans le SAE de la SEMURVAL.

Le second type de perspectives s'attache à l'amélioration des travaux théoriques :

1. Améliorer le module de décision situé dans les agents CORRESPONDANCE. L'implémentation d'une méthode multicritère est prévue pour la détermination des décisions selon des critères de régulation et des actions de régulation [Laïchour & *al.*, 02a]. La méthode envisagée doit proposer un ensemble d'actions de régulation ordonnées de la meilleure à la moins bonne en cas de perturbations. Ce qui donnera la possibilité au régulateur de choisir la décision qui lui convient.
2. Améliorer la coopération entre les agents CORRESPONDANCE en utilisant des techniques de négociation. Ainsi, il faut prendre en compte les priorités données par le régulateur aux nœuds de correspondances selon l'importance du trafic dans ces nœuds.
3. Adapter un système d'apprentissage pour les agents CORRESPONDANCE. Les agents seront capables de réagir face à des situations imprévues et s'adaptent en ajoutant des stratégies de résolution.

Ces travaux de recherche ont permis de présenter et d'appliquer les systèmes multi-agents dans le domaine du transport urbain, et plus précisément pour la régulation des correspondances des bus. Plus généralement, ce travail peut s'intégrer dans les travaux sur la multimodalité (i.e. les différents moyens de transport).

## **TERMINOLOGIE LIÉE AU TRANSPORT URBAIN**

**Amplitude** : durée s'écoulant entre le début de service de la première vacation et la fin de service de la dernière vacation d'un même service.

**Antenne** : partie terminale de l'itinéraire d'une ligne comportant plus de deux terminus extrêmes.

**Assureur** : conducteur commandé pour être disponible et remplacer au pied levé un agent dont l'absence n'était pas prévisible.

**Attente à un point d'arrêt** : action consistant à différer le départ d'un bus à un point d'arrêt.

**Avance** : écart négatif entre l'horaire réel et l'horaire commandé (avance subie) ou bien entre l'horaire commandé et l'horaire de base (avance commandée).

**Avant-balai** : course assurant l'avant dernier départ d'un terminus en fin de journée.

**Balai** : course assurant le dernier départ d'un terminus en fin de journée.

**Borne de départ** : dispositif sur voie publique situé au terminus départ des lignes pour donner les ordres de départ à partir des CCD.

**Carte des temps (ou radar)** : document d'exploitation associé à une police où sont indiqués pour une journée-type les heures de départ des terminus, les heures de passage aux points de régulation, le numéro de service de l'agent associé à chaque départ, les heures de sortie et de rentrée au dépôt, les heures de garage et de dégarage, l'indication des décalages éventuels.

**Changement de mission** : action consistant à affecter une voiture à une autre mission que celle prévue initialement. Le changement de mission peut s'effectuer par raccourcissement (demi-tour), par rallongement ou par transformation.

**Charge** : nombre de voyageurs en voiture.

**Commande Centralisée des Départs (CCD)** : dispositif qui permet de commander à distance les départs des autobus aux terminus à partir d'un poste de commandement local, par l'intermédiaire de bornes de départ.

**Coupure** : pour un service, laps de temps qui sépare la fin d'une vacation du début de la suivante.

**Course Haut-Le-Pied (HLP)** : trajet effectué par une voiture entre deux points sans desserte des arrêts intermédiaires ; le HLP peut s'effectuer avec ou sans voyageurs à bord et emprunter un itinéraire de déviation.

**Course Partielle (ou Partiel)** : trajet effectué par une voiture entre un terminus extrême et un point intermédiaire de la ligne.

**Course pleine** : trajet effectué par une voiture entre deux terminus extrêmes.

**Course spéciale (ou spécial)** : course prévue au TM effectuée par une police de la ligne en dehors de l'itinéraire commercial.

**Creux** : période de la journée située entre deux pointes.

**Décalage** : procédé d'habillage qui consiste à faire travailler un conducteur avec une période d'interruption de conduite comprise dans le temps de travail au cours de la même vacation.

**Dégarage** : action de remise en ligne d'une voiture garée provisoirement à un terminus.

**Demi-tour** : changement de mission où la voiture effectue une course plus courte que celle prévue initialement.

**Départ différé** : action qui consiste à effectuer un départ à une heure retardée par rapport à l'horaire de base.

**Dépassement sur ligne** : action qui consiste à faire doubler une voiture par celle qui la suit.

**Déplacement principal** : trajet-type effectué par la majorité des voyageurs pour une tranche horaire donnée.

**Déplacement secondaire** : trajet-type effectué par un nombre important de voyageurs pour une tranche horaire donnée.

**Dépôt de remisage** : dépôt assurant le commandement des conducteurs, le remisage et l'entretien des voitures sur la ligne concernée.

**Dépôt d'exploitation** : dépôt assurant la préparation et le contrôle du service sur la ligne concernée.

**Dérive** : prise d'avance (dérive négative) ou prise de retard (dérive positive).

**Distancement** : action qui consiste à modifier l'affectation des triplets service-police-mission aux heures de départ prévues par permutation simple ou circulaire.

**Doublage** : commande de deux courses d'une même mission avec la même heure de départ.

**Fréquence** : nombre de départs ou de passages à un arrêt ou sur un tronçon de ligne par unité de temps.

**Garage** : action de rangement provisoire d'une voiture à un terminus,

**Graphicage** : opération d'élaboration de l'horaire théorique.

**Graphique** : représentation visualisant le mouvement des voitures d'une ligne.

**Graphique réduit** : document utilisé par les contrôleurs reprenant dans l'ordre chronologique tous les éléments du transparent pour chaque terminus de la ligne.

**Groupage** : état caractérisant deux ou plusieurs voitures circulant de conserve dans la même direction

**Habillage** : opération de répartition du temps de travail total découlant de l'offre définie par le graphicage entre des services conducteurs satisfaisant aux conditions de travail statutaires.

**Horaire commandé** : horaire défini par les actions du contrôleur de terminus.

**Horaire de base** : horaire du TM intégrant des modifications éventuelles (suppression ou ajout d'une voiture, changement de mission, retombes afférentes, ... ) effectuées en temps anticipé.

**Horaire réel** : horaire effectivement réalisé.

**Horaire théorique** : horaire du TM tel qu'il découle du graphicage.

**Insertion d'un départ** : action consistant à rajouter un départ à l'horaire commandé.

**Inter-arrêt** : segment de ligne borné par deux arrêts successifs.

**Intervalle** : laps de temps séparant les heures de départ ou de passage de deux courses consécutives à un point d'arrêt.

**Itinéraire commercial** : itinéraire comprenant la desserte des points d'arrêt de la ligne.

**Lacune** : différence en un point de la ligne et à un instant donné entre l'intervalle de l'horaire réel et l'intervalle de l'horaire commandé.

**Ligne à horaire** : ligne où l'offre de service commercial est définie par les heures de passage en certains points caractéristiques affichés aux points d'arrêt.

**Ligne à intervalle** : ligne où l'offre de service commercial est définie par l'intervalle pratiqué aux différentes périodes de la journée ainsi que par les premiers et les derniers départs qui sont affichés aux points d'arrêt.

**Ligne semi-directe** : ligne où le TM comporte des courses haut-le-pied avec voyageurs.

**Marche lente** : réduction d'allure du bus par les conducteurs.

**Mission** : type de course.

**Navette** : course partielle sur une courte distance.

**Permutation des conducteurs sur ligne** : action consistant à intervertir à leur point de croisement les conducteurs de deux voitures circulant en sens opposés.

**Perte d'une course** : action qui consiste à supprimer une course prévue au TM.

**Perte d'une révolution** : action qui consiste à supprimer une course aller et une course retour consécutives prévues au TM.

**Point critique (ou point de charge maxi)** : point d'arrêt au départ duquel, pour une direction et une période horaire donné, la charge à bord des voitures est maximale.

**Point de régulation**: point d'arrêt pour lequel on définit des heures de passage à effectuer dans l'horaire de base ou bien dans l'horaire commandé.

**Point de relève** : point de la ligne où s'effectuent les relèves conducteurs.

**Point de retournement** : point de la ligne où peut s'effectuer un demi-tour.

**Pointe** : période de la journée où la demande de transport est maximale.

**Police** : partie de l'offre de service journalière effectuée par une voiture et repérée par un numéro de police.

**Poste de Commandement Local (PCL)** : bureau à partir duquel le contrôleur commande la ligne.

**Post-pointe** : période de la journée qui suit immédiatement une pointe.

**Pré-pointe** : période de la journée qui précède immédiatement une pointe.

**Prise d'avance (ou dérive négative)** : mise en œuvre d'un horaire anticipé par rapport à l'horaire commandé antérieurement.

**Prise de retard (ou dérive positive)** : mise en œuvre d'un horaire différé par rapport à l'horaire commandé antérieurement.

**Pupitre ICS** : pupitre situé sur le tableau de bord du conducteur et servant à communiquer des informations et des consignes à celui-ci dans les SAE évolués.

**Radiotéléphonie** : système permettant au contrôleur et au conducteur de communiquer oralement.

**Régulation** : processus d'adéquation en temps réel du TM aux conditions objectives d'exploitation.

**Relève** : remplacement d'un conducteur sur une voiture.

**Remise à 1'heure** : retour à l'horaire de base.

**Remise en place** : rétablissement de l'ordre des polices tel qu'il est prévu dans le TM.

**Retard** : écart positif entre l'horaire réel et l'horaire commandé (retard subi) ou bien entre l'horaire commandé et l'horaire de base (retard commandé).

**Retombe** : action consistant à rééquilibrer les intervalles lors de la modification du nombre de départs.

**Révolution** : trajet, effectué par une voiture, composé d'une course aller et d'une course retour consécutives.

**Rupture de charge** : état de l'offre contraignant certains voyageurs à changer de voiture au cours de leur déplacement.

**Sautage** : action consistant à modifier l'affectation des polices aux services par permutation simple ou circulaire.

**Sens de plus grande charge** : direction sur laquelle la demande est la plus forte pour une période horaire donnée.

**Service** : travail à accomplir par un conducteur un jour donné.

**Service direct** : service en une seule vacation.

**Service en deux parties** : service en deux vacations.

**Service semi-direct** : service en deux vacations avec coupure réduite.

**Suppression d'un départ** : action qui consiste à supprimer un départ à l'horaire commandé.

**Suppression de service** : opération qui consiste à supprimer un ou plusieurs services prévus au TM.

**Système d'aide à l'exploitation** : outil de gestion d'une ligne.

**Tableau de marche (TM)** : document regroupant les données relatives à l'exploitation d'une ligne pour un type de journée et une période donnée. Il indique pour chaque voiture l'heure de sortie du dépôt, les heures de départ de chaque terminus, les heures de passage au point de relève si celui-ci est situé en milieu de ligne, les heures éventuelles de garage et de dégarage, l'heure de sortie de ligne vers le dépôt et l'heure de rentrée au dépôt. Pour chaque course figure le numéro du service affecté. Le TM comprend par ailleurs le tableau des services et le tableau des temps de parcours et des kilométrages pour les différentes missions.

**Taux de charge** : taux de remplissage d'une voiture mesuré par le rapport entre le nombre de voyageurs à bord et sa capacité.

**Temps de battement (ou battement)** : pour une police donnée, temps compris entre l'heure d'arrivée au terminus de la course amont et l'heure de départ de la course aval.

**Temps de course** : temps égal au temps de parcours d'une course donnée augmenté du battement au terminus arrivée.

**Temps de parcours** : temps compris entre l'heure de départ et l'heure d'arrivée d'une course donnée.

**Temps de retombe** : dans une retombe, délai séparant le dernier départ non touché du premier départ non touché ; on distingue le temps de retombe avant (entre le dernier départ non touché et le départ supprimé ou inséré) et le temps de retombe après (entre le départ supprimé ou inséré et le premier départ non touché).

**Temps de révolution** : durée séparant deux départs consécutifs du même terminus pour une police donnée.

**Temps de transition** : dans une dérive, délai choisi par le contrôleur pour atteindre la valeur du retard (ou de l'avance).

**Terminus** : point caractéristique d'une ligne correspondant au début ou à la fin d'une mission.

**Terminus commandant** : terminus à partir duquel sont commandées les actions de régulation.

**Terminus de renvoi** : terminus autre que le terminus commandant.

**Terminus extrême** : terminus situé à une extrémité de la ligne.

**Terminus intermédiaire** : terminus qui n'est pas un terminus extrême.

**Transbordement** : transfert de voyageurs d'une voiture dans une autre.

**Transparent** : outil de gestion en temps réel d'une ligne se référant à l'horaire de base et où le contrôleur reporte les modifications apportées à celui-ci.

**Tronc commun** : Partie d'une ligne à antennes empruntée par toutes les courses qui ne sont pas Haut-Le-Pied ou itinéraire commun à plusieurs lignes.

**Vacation** : partie de service conducteur.

**Vitesse de transition** : dans une dérive, rapport entre le retard (ou l'avance) et le temps de transition.

**Voiture libre** : voiture non spécialisée sur une mission particulière.

**Voiture rentrante** : voiture ayant terminé son service et rentrant au dépôt.

**Voiture sortante** : voiture sortant du dépôt pour commencer son service.

**Voiture spécialisée** : voiture affectée à une mission donnée.

**Voiture-tampon** : voiture disponible à un point de relève utilisée lors d'un sautage.

## **DESCRIPTION DU LOGICIEL eM-Plant**

eM-Plant est un logiciel destiné à la modélisation et à la simulation de mouvements de flux industriels (produits dans une chaîne d'assemblage, gestion de stock, chaîne de production etc.) ; nous l'avons adapté pour notre étude, à savoir la simulation d'un réseau de transport urbain.

Ce logiciel est basé sur le principe d'une programmation orientée objets à travers le langage SimTalk. Diverses classes, objets et méthodes sont ainsi disponibles, quelques objets de bases sont détaillés plus bas pour avoir une idée du logiciel.

## A.1 STRUCTURE D'UN MODÈLE

Un modèle est la structure la plus générale qui permet de gérer une simulation ou plusieurs sur un même plan.

Un modèle de simulation est composé d'une librairie de classes, de plusieurs frames et d'une ou plusieurs palettes d'objets. Ces trois composants apparaissent sur la figure A.1 : la librairie de classes sur la partie gauche, le frame sur la partie inférieure droite et la palette d'objets sur la partie supérieure droite.

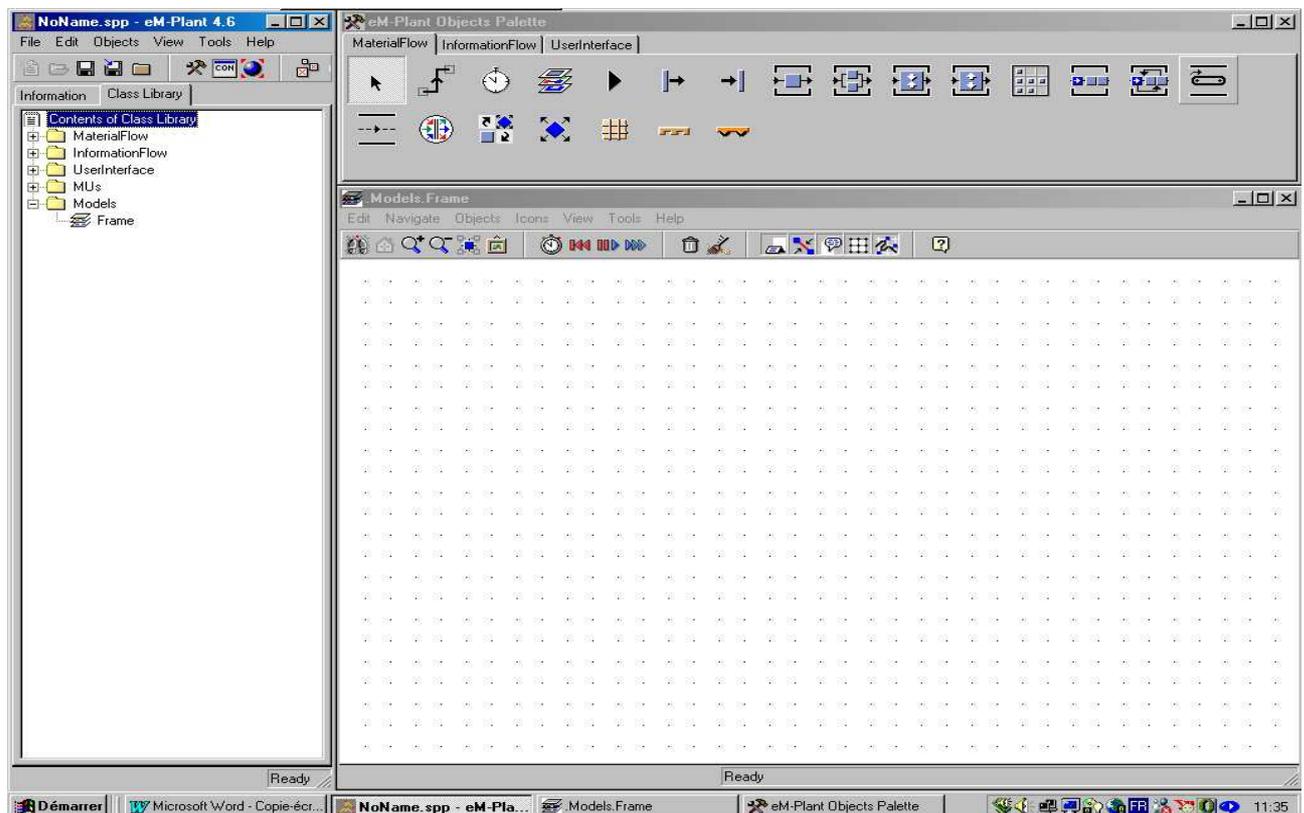


Figure A.1 : La structure d'un modèle

## A.2 LIBRAIRIE DE CLASSES

La librairie de classes est composée de plusieurs dossiers. Certains dossiers sont prédéfinis et contiennent les objets de bases, ces dossiers sont les suivants : MaterialFlow, InformationFlow, UserInterface et MUs (Moving Units). Le dossier Models permet de stocker tous les Frames de notre modèle de simulation, ce dossier peut être renommé. Il est tout à fait possible de créer plusieurs dossiers pour gérer au mieux nos Frames pour ainsi mieux gérer notre modèle de simulation.

## A.3 FRAMES

Un Frame est une fenêtre (graphique) dans laquelle on peut représenter un système quelconque pour le simuler. Un Frame peut être utilisé dans un autre Frame comme un sous système, ce qui évite de refaire pour un système complet des sous systèmes qui existent déjà.

## A.4 PALETTE D'OBJETS

La palette d'objets contient les objets de bases qui nous permettent de créer un système complet pour pouvoir simuler son comportement. Ces objets sont classés par catégorie : MaterialFlow, InformationFlow et UserInterface (figure A.2). On retrouve le même classement que dans la librairie de classes sachant que dans ce cas la catégorie MUs est comprises dans la catégorie MaterialFlow.

Dans notre étude nous n'avons utilisé que quelques-uns de ces objets de bases. Les objets que nous avons utilisés sont détaillés par catégorie par la figure A.2. Les MUs sont représentés séparément par la figure A.3.

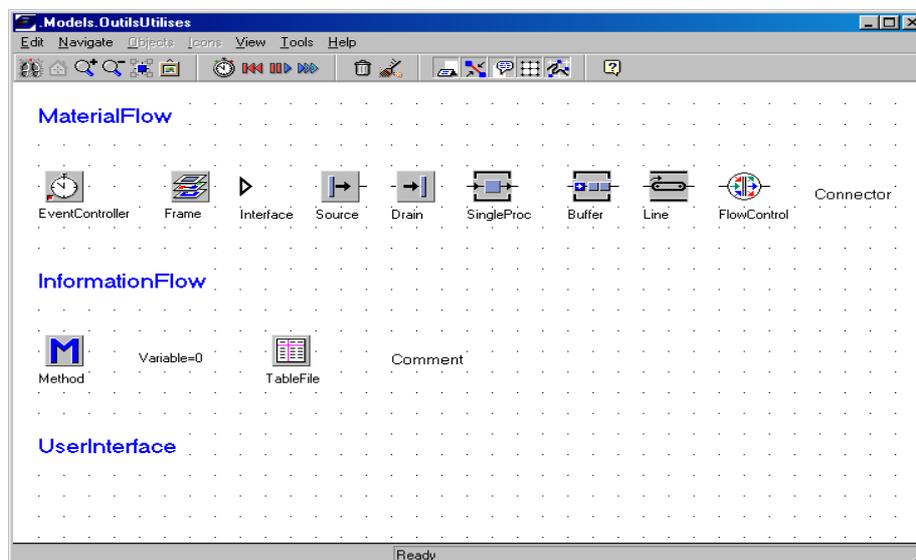


Figure A.2 : Les objets classés par catégorie

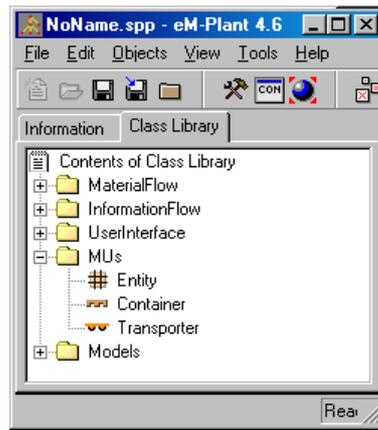


Figure A.3 : Les objets de la catégorie MovingUnits

### 1. Material Flow Objects : (objets d'écoulement de matériaux)

- **Frame** : c'est une fenêtre graphique. Elle contient les objets du modèle à développer.
- **Connector : (connecteur)** : C'est un connecteur qui permet de connecter 2 ou plusieurs entités entre elles.
- **Interface** : C'est l'interface qui permet de relier 2 ou plusieurs frames entre eux.
- **EventController : (contrôleur d'évènements)** : C'est le contrôleur d'évènements qui permet de lancer et d'arrêter la simulation, il permet de gérer la vitesse d'exécution de la simulation, on peut aussi choisir de faire la simulation en temps réel. Cette entité ne doit être reliée à aucune autre. A travers cet objet, on peut obtenir une liste des événements effectués ou à effectuer, cette liste pouvant être sauvegarder dans un fichier texte.
- **Source : (entrée)** : C'est le début du système, c'est par cet objet que la simulation commence (création et entrée des Unités Mobiles (Moving Units)). Cet objet possède une option de sélection d'Unité Mobile, pour cela il faut créer trois tables qui permettent de définir le type et la fréquence des différentes Unités Mobiles utilisées dans les différents types de sélection : à savoir de façon aléatoire (Random), de façon séquentielle (Sequence) et de façon cyclique (Sequence Cyclical). Pour faire son choix, il suffit de choisir le type de sélection dans l'objet Source puis de remplir la table correspondant à ce choix. Dans cet objet on peut introduire la notion d'horaire : pour cela il faut créer une table qui contienne les horaires ainsi que les informations concernant les Unités Mobiles.

- **Drain : (sortie) :** C'est la fin du système, c'est par cet objet que la simulation se termine (sortie et destruction des Unités Mobiles)
  - **SingleProc : (processus simple) :** Cet objet peut contenir une Unité Mobile sur un seul niveau (une seule Unité à la fois).
  - **Buffer : (amortisseur) :** Cet objet permet de stocker sur une rangée plusieurs Unités Mobiles (le nombre peut être fixé par l'utilisateur) dans le cas d'un encombrement et ceci pour éviter des saturations ou des accumulations de retard.
  - **Line : (ligne de circulation) :** Cet objet permet de transporter tout au long de sa longueur des Unités Mobiles avec une vitesse variable selon la demande de l'utilisateur, ces Unités Mobiles ne pouvant pas se dépasser les uns les autres. Nous pouvons rajouter dans cet objet des sensors (capteurs) qui nous permettent d'effectuer différentes tâches à différents niveaux de la Line (ces tâches étant définies par des Methods).
  - **FlowControl : (contrôleur de flux) :** Cet objet permet de gérer plusieurs entrées et plusieurs sorties. Il peut être aussi utilisé telle une bifurcation ou un raccordement. Il permet donc de distribuer les différentes Unités Mobiles qu'il reçoit suivant une stratégie définie par l'utilisateur (différentes stratégies sont disponibles parmi les fonctions de cet objet, ces stratégies étant utilisables indépendamment pour les entrées et les sorties).
1. **Moving Units : (unités mobiles) :** Ce sont des unités qui se déplacent à travers les différents objets définis ci-dessus via les connecteurs et suivant les règles et stratégies définis par ces objets. Ces unités permettent de gérer et de stocker différentes statistiques.
- **Entity : (entité) :** Unité simple qui ne possède pas la capacité de transporter une autre entité. Unité pouvant être transportée et pouvant représenter une production. Elle ne peut que passer d'un objet à un autre sans réelles propriétés propres.
  - **Container : (palette) :** Unité qui permet de transporter d'autres unités. Cette unité ne fait que passer à travers les objets statiques avec ou sans charge. La capacité de charge peut être choisie par l'utilisateur.
  - **Transporter : (transporteur) :** Unité qui permet de transporter n'importe quelle autre unité. Cette unité possède des propriétés les plus complètes pour une unité mobile. Cette unité peut assurer différents types de transport.

- **Information Flow Objects : (objet d'écoulement d'informations) :** Ces objets permettent de gérer les différentes informations concernant les différents objets utilisés.
  - **Method :** C'est un éditeur de texte qui permet d'écrire un programme en langage SimTalk. Cet objet permet aussi d'exécuter des commandes pour le fonctionnement des simulations.
  - **Variable :** Cet objet permet de déclarer le nom d'un objet ou d'une entité quelconque comme une variable du système.
  - **Comment : (commentaire) :** Cet objet permet d'insérer toute sorte de commentaire à l'intérieur d'un frame (simple titre, texte entier ...)
  - **TableFile : (fichier de tables) :** Cet objet est polyvalent, il permet de gérer différentes informations ou données. Il peut être utilisé comme une interface entre le logiciel et l'utilisateur. Il peut servir en début de simulation pour entrer des données et des informations nécessaires à l'initialisation de la simulation, il peut être utilisé en fin de simulation pour recueillir toute sorte de résultats. Il peut aussi être utilisé tout au long de la simulation et à n'importe quel endroit pour répondre au besoin de l'utilisateur.
2. **User Interface Objects : (objets d'interface utilisateur) :** Ces objets permettent d'illustrer et de représenter les informations en entrée et en sortie du système, ils permettent aussi de gérer la transmission des informations entre les différents systèmes.

**BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE**

## BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES<sup>1</sup>

[**Adam & al., 99**] Adam E., Kolski C., “Etude comparative de méthodes de génie logiciel utiles au développement de systèmes interactifs dans les processus administratifs complexes”. Revue Génie logiciel, Numéro 9, Juin 1999.

[**Adam, 00**] Adam E., “Modèle d’organisation multi-agent pour l’aide au travail coopératif dans les processus d’entreprise : Application aux systèmes administratifs complexes”. Thèse de doctorat en Informatique, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2000.

[**Agimont, 96**] Agimont G., “Modélisation et simulation des organisations Multi-Agents”. Thèse de doctorat en sciences appliquées, Faculté polytechnique de Mons (Belgique), 1996.

[**Aknine, 00**] Aknine S. “Modèles et méthodes de coordination dans les systèmes multi-agents”. Thèse de doctorat en informatique, Université de Paris IX Dauphine, 2000.

[**Allen & al., 80**] Allen J.F., Perrault C.R., “Analyzing intention in dialogues”. Artificial Intelligence, 15(3), 1980.

[**Appelt, 85**] Appelt D.E., “Planning English Sentences”. Cambridge University Press : Cambridge, England, 1985.

[**Austin, 62**] Austin J.L., “How to do thing with words”, Oxford University Press, 1962.

[**Babin, 97**] Babin G., Maamar Z., Chaib-draa B., “Metadatabase meets distributed AI”. In First Int. Workshop on Cooperative Information Agents (CIA-97), 1997.

[**Balbo, 00**] Balbo F., “ESAC : un modèle d’interactions multi-agent utilisant l’Environnement comme Support Actif de Communication : application à la gestion des transports urbains”. Thèse de doctorat en informatique, Université de Paris IX Dauphine, 2000.

---

<sup>1</sup> Citées dans le texte du mémoire.

[**Bauer & al., 00**] Bauer B., Muller J-P., Odelle J., "An extension of UML by protocols for multiagent interaction". International Conference on MultiAgent systems (ICMAS'00). Boston, Massachusetts, pp. 207-214, July 2000.

[**Bauer, 01**] Bauer. B., "UML Class Diagrams Revisited in the Context of Agent-Based Systems". Wooldridge M., Ciancarini P., Weiss G., (eds.), Proceedings of Agent-Oriented Software Engineering (AOSE'01). Montreal, Canada. Springer-Verlag, pp.1-8, May 2001.

[**Bensaïd & al., 95**] Bensaïd N., Mathieu P., "Un modèle d'architecture multi-agents entièrement écrit en Prolog", In IV Journées Francophones de Programmation Logique (JFPL'95), pp. 381–385, France, 1995.

[**Bensaïd, 99**] Bensaïd N., "Contribution à la réalisation d'un modèle d'architecture multi-agent hiérarchique". Thèse de doctorat en informatique, Université de Lille1, 1999.

[**Bomarius, 92**] Bomarius F.A., "Multiagent approach towards modeling urban traffic scenarios". Tech. Rep. RR-92-47, DFKI-GmbH, Germany, 1992.

[**Booch, 92**] Booch G., "Conception orientée objets et applications", Addison-Wesley, 1992.

[**Bourron, 01**] Bourron T., "Application des systèmes multi-agents dans les télécommunications : états de l'art, enjeux et perspectives". Agents et systèmes multi-agents, Editions Hermes, Paris, 2001.

[**Cammarata & al., 88**] Cammarata S., McArthur D., Steeb R., "Strategies of cooperation in distributed problem solving". Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 767-770, 1983. (Also published in Readings in Distributed Artificial Intelligence, Bond A.H., Gasser L., (eds), pp. 102-105, Morgan Kaufmann, 1988), 1988.

[**Casteran & al., 00**] Casteran J.C., Gleizes M.P., Glize P., "Des méthodologies orientées multi-agents". Actes des Journées Francophones pour l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA'00), 2000.

[**Chaib-Draa & al., 90**] Chaib-draa B., Millot P., "A framework for cooperative work: an approach based on the intentionality". Int. Jour. of AI in Engineering, Vol. 5, pp. 199-205, 1990.

[**Chaib-Draa, 94**] Chaib-draa B., "Coordination between agents in routine, familiar and unfamiliar Situations". Rapport de recherche DUIL-RR-9401 du département d'informatique, Université de Laval, Canada, 1994.

[**Chaib-Draa, 95**] Chaib-draa B., "Industrial Applications of Distributed AI". *Communication of ACM*, 38(11), 49-53, 1995.

[**Chaib-Draa, 96**] Chaib-draa B., "Interaction Between Agents in Routine, Familiar and Unfamiliar Situations". *International Journal of Intelligent & Cooperative Information Systems*, Vol. 5(1), pp. 1-25, 1996.

[**Chaib-Draa & al., 01**] Chaib-draa B. Jarres I., Moulin B., "Systèmes multi-agents : principes généraux et applications". Chapitre 1 "Agents et systèmes multi-agents", Editions Hermes, Paris, 2001.

[**Champion & al., 01**] Champion A., Mandiau R., Espié S., Kolski, C., "Multi-Agent Road Traffic Simulation: Towards Coordination by Game Theory Based Mechanisms". Paper presented at Proceedings of the Agents in Traffic and Transportation, Workshop in Conjunction with the ITS World Congress 2001, Sydney, Australia, October 2001.

[**Cohen & al., 79**] Cohen P.R., Perrault C.R., "Elements of a plan based theory of speech acts". *Cognitive Science*, 3 :177-212, 1979.

[**Cohen & al., 90**] Cohen P.R., Levesque H.J., "Intention is choice with commitment". *Artificial Intelligence*, 42 :213-261, 1990.

[**Collinot, 96**] Collinot A., Ploix L., Drogoul A., "Application de la méthode Cassiopée à l'organisation d'une équipes de robots". Actes des Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA'96), Editions Hermes, 1996.

[**Corkill & al., 83**] Corkill D.D., Lesser V. R., "The use of meta-level control for coordination in a distributed problem solving network". In Proceedings of the Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence, pages 748-756, Karlsruhe, Federal Republic of Germany, August 1983.

[**Cure & al., 84**] Cure C., Foraste B., "Systèmes d'aide à l'exploitation et les algorithmes de régulation : Evaluation par simulation". Recherche Transport Sécurité, Juillet 1984.

[**DeLoach & al., 00**] DeLoach S., Wood M., Sparkman C., "Multiagent Systems Engineering". *International Journal of software Engineering and Knowledge Engineering*, November 2000.

[**Demazeau & al., 91**] Demazeau Y., Muller J-P., "From reactive to Intentional Agents". In *Decentralized Artificial Intelligence* Editors, Vol. 2, Elsevier North Holland, 1991.

[**Demazeau, 95**] Demazeau Y., "From interactions to collective behavior in agent-based systems ". In Pre-proceedings of the invited lectures of the 1st European Conference on Cognitive Science, St-Malo, France, March 1995.

[Demazeau, 00] Demazeau Y., "Multi-Agent Systems: MAS". Journée Industrie-Recherche. Les Systèmes multi-agents (SMA) et leurs applications, Paris, 9 novembre 2000.

[Durrande-Moreau, 94] Durrande-Moreau A., "Qualité de service et perception du temps : l'attente, propositions théoriques et études empiriques". Thèse de doctorat en sciences de gestion, Université Grenoble III, 1994.

[Duvallet, 01] Duvallet C., "Des systèmes d'aide à la décision temps réel et distribués : Modélisation par agents". Thèse de doctorat en Informatique, Université du Havre, 2001.

[El Fallah-Seghrouchni, 00] El Fallah-Seghrouchni A., "Coordination : Modèles, Algorithmes et Protocoles". Habilitation à Diriger des Recherches, LIPN, Paris, 25 Janvier 2000.

[El-Hadouaj & al., 00] El-Hadouaj S., Drogoul A., Espié A., "How to Combine Reactivity and Anticipation: the Case of Conflicts Resolution in a Simulated Road Traffic". MABS'2000 workshop, Springer Verlag LNAI series, Boston, USA, 2000.

[El-Hammouchi, 02] El-Hammouchi M., "Modélisation, simulation d'un réseau de transport urbain en vue de l'aide à la régulation des correspondances". Rapport de stage de DESS CCI, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2002.

[eM-Plant, 00] eM-Plant. "Objets Manual". Produit de Tecnomatix, 2000.

[Erceau & al., 91] Erceau J., Ferber J., " L'intelligence artificielle distribuée". La recherche, 22(233). pp. 750-758, Juin 1991.

[Espié, 02]. Espié S., "Approche multi-acteur dans la simulation de trafic automobile". Livre "Organisation et applications des SMA" sous la direction de Mandiau R., Grislin-Le Strugeon E., Péninou A. (eds.), pp. 259-278, Editions Hermes, Paris, 2002.

[Fagin & al., 95] Fagin R., Halpern I.Y., Moses Y., Vardi M. Y., "Reasoning about Knowledge". The MIT Press : Cambridge, MA, 1995.

[Ferber & al., 88] Ferber J., Ghallab M., "Problématiques des univers multi-agents intelligents". Actes des Journées Nationales du PRC-IA, Toulouse, Mars 1988.

[Ferber, 89] Ferber J., "Objets et agents : une étude des structures de représentation et de communication en Intelligence Artificielle". Thèse d'Etat en Informatique. Université de Paris VI, 1989.

[Ferber, 95] Ferber J., "Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective", IIA Informatique Intelligence Artificielle, Edition Inter Editions, 1995.

[Fisher & al., 99] Fisher K., Chaib-Draa B., Müller J.P., Pischel M., Gebe C., “A simulation approach based on negotiation and cooperation between agents : a case study”. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews, Vol. 29, N°. 4, pp. 531-545, November 1999.

[Foisel, 98] Foisel R. “Modèle de réorganisation des systèmes multi-agents : Une approche descriptive et opérationnelle”. Thèse de doctorat en informatique, Université de Nancy1, 1998.

[Fougères, 00] Fougères A-J., “Un système tutoriel intelligent pour la formation des régulateurs de trafic d’une compagnie de transport en commun”. Colloque sur la multimodalité, IMAG, Grenoble, Mai 2000.

[Galland, 01] Galland S., “Approche multi-agents pour la conception et la construction d’un environnement de simulation en vue de l’évaluation des performances des ateliers multi-sites”. Thèse de doctorat en Informatique, Université Jean Monnet et Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 2001.

[Galliers, 88] Galliers J.R., “Cooperative interaction as strategic belief revision”. In Deen S.M., editor, CKBS-90-Proceedings of the International Working Conference on Cooperating Knowledge Based Systems, pp. 148-163. Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, 1991.

[Gival, 02] Gival., (GIVAL : Groupement d’Ingénierie des VALenciennois). “SAE : Cahier des charges techniques particulières”. Dossier N°61, Pièce n° A3, Rédaction Bouchet S., SEMURVAL de Valenciennes, 2002.

[Gruer & al., 01] Gruer P., Hilaire V., Koukam A., “Multi-Agent approach to modeling and simulation of urban transportation systems”. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE SMC’2001), Tucson-Arizona, 7-10 October 2001.

[Guessoum, 96] Guessoum Z., “Un environnement opérationnel de conception et de réalisation de systèmes multi-agents”. Thèse de doctorat en informatique, Université Pierre et Marie Curie, 1996.

[Gutknecht & al., 98] Gutknecht O., Ferber J., “Vers une méthodologie organisationnelle de conception de systèmes multi-agents”. Rapport de Recherche du Laboratoire d’Informatique de Robotique et de Microélectronique de Montpellier N° 99073, 1998.

[Gutknecht & al., 00] Gutknecht O., Ferber J., Fabien M., “Madkit : une architecture de plate-forme multi-agent générique”. Rapport de Recherche du Laboratoire d’Informatique de Robotique et de Microélectronique de Montpellier N° 00061, 1998.

[Guyon, 00] Guyon G., "Transport collectif urbain de voyageurs : Evolution, techniques et organisation". CELSE, Paris, 2000.

[Halpern, 95] Halpern J. Y., "Reasoning about knowledge : A survey". In Gabbay D.M., Hogger C. J., Robinson J. A., (eds.), Handbook of Logic in Artificial Intelligence and Logic Programming, pages 1-34. Oxford University Press : Oxford, England, 1995.

[Hernandez & al. 01] Hernandez J.Z., Ossowski S., Garcia-Serrano, A., "On Multiagent coordination architectures: A traffic management case study". Proceedings of the 34<sup>th</sup> Hawaii International Conference on System Sciences (IEEEICSS'01), 2001.

[Jagueneau, 00] Jagueneau A., "Modélisation et simulation du trafic urbain". Mémoire d'Ingénieur, Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM), 2000.

[Jennings & al., 98] Jennings N.R., Wooldridge M., Sycara K., "A roadmap of autonomous agent and multi-agent systems". Kluwer Academy publishers, Vol.1, n°1. pp. 7-38, Boston, 1998.

[Jennings, 99] Jennings N. R., "Agent-Oriented Software Engineering". Proc. 12<sup>th</sup> Int Conf on Industrial and Engineering Applications of AI, Cairo, Egypt, 4-10. (Invited paper) [Also appearing in Proc. 9th European Workshop on Modeling Autonomous Agents in a Multi-Agent World (MAAMAW-99), Valencia, Spain 1-7, 1999.

[Jennings & al., 00] Jennings N. R., Wooldridge M., "Agent-Oriented Software". In Handbook of Technology (ed. J.Bradshaw) AAAI/MIT Press, 2000.

[Jennings & al., 01] Jennings N. R., Wooldridge M., "Agent Methodology for software engineering communication of ACM", 2001.

[Kabachi, 99] Kabachi N., "Modélisation et apprentissage de la prise de décision dans les organisations productives : Approche multi-agents". Thèse de doctorat en Informatique, Université Jean Monnet et Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 1999.

[Kaplan, 98] Kaplan F., "A new approach to class formation in multi-agent simulation of language evolution". In Proceedings of the Second International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-2), pp. 158-165, Paris, 1998.

[Khadim, 96] Khadim S., "Méthodologie de conception de systèmes tutoriels multi-agent". Thèse en Sciences et Techniques de l'Informatique, Université d'Aix Marseille III, 1996.

[Khorovitch & al., 91] Khorovitch B.G., Catalano G., Höflinger P., Leprince M., "Aspects techniques et économiques de systèmes d'aide à l'exploitation". Transport Public'91, Union Internationale des transports publics, 49<sup>e</sup> Congrès International, Stockholm, 1991.

[Kobsa, 89] Kobsa A., “User Models in Dialog Systems”. Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, 1989.

[Kouiss & al., 95] Kouiss K., Pierreval H., “Systèmes multi-agents : Direction actuelles pour les systèmes de production”. Proc. Congrès International de Génie Industriel de Montréal : La productivité dans un monde sans frontière, Vol. 2, pp. 2029-2039. Montréal, Canada, 18-20 Octobre 1995.

[Ktari, 98] Ktari B., “Programmation orientée objets”. Pour l’obtention du grade de Maître ès Sciences en Informatique, Université de Laval (Québec-Canada), 1998.

[Labbé & al., 97] Labbé M., Toint PH., “Recherche opérationnelle et transport”. Groupe de recherche en transport, Département de mathématique, Rapport 9717, Faculté de Namur, Belgique, 20 novembre 1997.

[Labidi & al., 93] Labidi S., Lejouad W., “De l’Intelligence Artificielle Distribuée aux Systèmes Multi-Agents”. Rapport de recherche INRIA N°2004, Août 1993.

[Lahlouhi, 01] Lahlouhi A., “Méthodologie de développement d’environnements de développement de SMA”. Techniques et sciences informatiques, Vol. 1 n°1, 2001.

[Litman & al., 87] Litman D.J., Allen P.R., “A plan recognition model for subdialogues in conversations”. Cognitive Science, 11:163-200, 1987.

[Laïchour & al., 00] Laïchour H., Maouche S., “Régulation du trafic dans les nœuds de correspondances”. Rapport mi-parcours du projet coopératif : “Amélioration la qualité des correspondances dans les réseaux de transport urbain”, GRRT, INRETS-ESTAS, Juillet 2000.

[Laïchour & al., 01a] Laïchour H., Maouche S., “Régulation du trafic dans les nœuds de correspondances”. Rapport Final du projet coopératif : “Amélioration de la qualité des correspondances dans les réseaux de transport urbain”, GRRT, INRETS-ESTAS, Avril 2001.

[Laïchour & al., 01b] Laïchour H., Maouche S., Mandiau R., “Traffic control assistance in connection nodes: Multi-Agent Applications in Urban Transport Systems”. International conference on Data Acquisition and Advanced Computing Science (IDAACS’01), Foros-Crimea-Ukraine, 1-4 July 2001.

[Laïchour & al., 01c] Laïchour H., Maouche S., Mandiau R., “Traffic control assistance in connection nodes”. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE SMC’01), Tucson-Arizona, 7-10 October 2001.

[Laïchour & al., 01d] Laïchour H., Maouche S., “ Aide à la regulation du trafic au niveau des nœuds de correspondances par une approche Multi-Agent”. Rapport Final du projet

coopératif : “Amélioration de la qualité des correspondances dans les réseaux de transport urbain”, FEDER, Novembre 2001.

[**Laïchour & al., 02a**] Laïchour H., Maouche S., Mandiau R., “Distributed decision-making: Application to an urban transport network”. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE SMC’02), Hammamet-Tunisia, 6-9 October 2002.

[**Laïchour & al., 02b**] Laïchour H., Maouche S., Mandiau R., “Une approche multi-agent pour la régulation des correspondances”. Journées Francophones d’Intelligence Artificielle et Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA’02), Lille-France, 28-30 Octobre 2002.

[**Laïchour & al., 03**] Laïchour H., Maouche S., Mandiau R., “Traffic control assistance in connection nodes: Multi-Agent Applications in Urban Transport Systems”. Computing Journal. (à paraître en 2003).

[**Lakemeyer & al., 99**] Lakemeyer G., Levesque H., “Query evaluation and progression in AOL knowledge bases”. In Proceedings of the Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-99), pp. 124-131, Stockholm, Sweden, 1999.

[**Larousse, 78**] Larousse., “Petit dictionnaire français LAROUSSE”. Librairie Larousse.. Paris. 1978.

[**Le Strugeon, 95**] Le Strugeon E., “Une méthodologie d’auto-adaptation d’un système multi-agents cognitifs”. Thèse de doctorat en Automatique Industrielle et Humaine, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 1995.

[**Lespérance, 91**] Lespérance Y., “A Formal Theory of Indexical Knowledge and Action”. PhD thesis, Toronto, 1991.

[**Lespérance & al., 94**] Lespérance Y., Levesque H.J., Lin F., Marcu D., Reiter R., Scherl R.B., “A logical approach to high-level programming - A progress report”. In Benjamin Kuipers, editor, In Control of the Physical World by Intelligent Systems, Papers from the 1994 AAAI fall Symposium, pp. 78-85, New Orleans, LA, 1994.

[**Lesort, 95**] Lesort J.B., “Modélisation des réseaux de trafic : De la planification à l’exploitation”. Annales des Ponts et Chaussées n°74, 1995.

[**Maes, 94**] Maes P., “Artificial Life meets entertainment : lifelike autonomous agents”. In Special Issue on New Horizons of Commercial and Industrial AI, Vol. 38 n°11 of Communications of the ACM, pp. 108–114. ACM Press, 1994.

[Malville & al., 98] Malville E., Bourdon F., “Task allocation : A group selfdesign approach”. In Proceedings of the Second International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS- 2), pp. 166-167, Kyoto, Japan, 1998.

[Mandiau, 00] Mandiau R., “Modélisation et évaluation d’organisations multi-agents”. Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Valenciennes, 2000.

[Minsky, 94] Minsky M., “A conversation with Marvin Minsky”. Communication of the ACM. Vol. 37, n°7. pp.2329, July 1994.

[Muller & al., 98] Muller J-P., Parunak H.V.D., “Vers une méthodologie de conception de systèmes multi-agents de résolution de problèmes par émergence”. JFIADSMA'98. Pont-à-Mousson, Editions Hermès, 1998.

[Muller & al., 00] Muller P.A., Gaertner N., “Modélisation objet avec UML”. Deuxième édition, Editions Eyrolles, Paris, 2000.

[Negroponte, 95] Negroponte A., “Being Digital”. Hodder and Stoughton, 1995.

[Nwana & al., 98] Nwana H.S., Ndumu D.T., Lee L.C., "ZEUS: An advanced Toolkit for Engineering Distributed Multi-Agent Systems", in Proceedings of PAAM'98, London, 1998.

[Nwana & al., 99] Nwana H.S., Ndumu D.T., “Agents of change in future communication systems”. Applied AI Journal, 13(1), 1999.

[Parunak, 96] Parunak H.V.D., “Applications of Distributed Artificial Intelligence in Industry”. In Foundation of Distributed Artificial Intelligence, Chap. 4, G.M.P.O’Hare et N.R.JENNINGS (eds.), J.WILEY and SONS INC, pp.139-164, 1996.

[Pascot & al., 93] Pascot D., Bernadas C., “L’essence des méthodes : Étude comparative de six méthodes de conception de systèmes d’information informatisés”. INFORSID’93, Systèmes d’information et Systèmes à base de connaissances, Lille, 11-14 Mai 1993.

[Pesty & al., 97] Pesty S., Brassac C., Ferrent P., “Ancrer les agents cognitifs dans l’environnement”. Journées Francophones d’Intelligence Artificielle et Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA’97), Nice, France, Avril 1997.

[Petit-Rozé & al., 02] Petit-rozé C., Grislin-Le Strugeon E., “système d’information à base d’agents”. Livre “Organisation et applications des SMA” Mandiau R., Grislin-Le Strugeon E., Péninou. A. (eds.), Editions Hermes, pp. 307-319, Paris. 2002.

[Reticular, 99] Reticular., “AgentBuilder User’s Guide”. RECTICULAR SYSTEMS, 1999.

[Ricordel, 01] Ricordel P.M., "Programmation orientée multi-agent : Développement et déploiement de systèmes multi-agents Voyelles". Thèse de doctorat en informatique, Institut National Polytechniques de Grenoble, 2001.

[Rizzi & al., 89] Rizzi M., Saporito A., "Bases et pratique de la régulation". Documentation interne de la RATP, Editions FROLOFF, 1989.

[Rizzi & al., 97] Rizzi M., Guichoux B., "Système d'information objet pour l'exploitation des réseaux de surface". Documentation interne de la RATP, Département bus, méthodes et systèmes d'exploitation, 1997.

[Roozemon, 96] Roozemon D.A., "Intelligent traffic management and urban traffic control based on autonomous objects". In Proceedings of the sixth Artificial intelligence, simulation, and planning in high autonomy systems, International Conference IEEE, 1996.

[Roozemon, 99a] Roozemon D.A., "Using Intelligent agents for Urban traffic control systems". In Proceedings of the 11<sup>th</sup> Mini-EURO conference on artificial intelligence in transportation systems and science, and the 7<sup>th</sup> EURO working group meeting on transportation. Helsinki University of Technology, Helsinki, August 2-6, 1999.

[Routier & al., 01] Routier J.C., Mathieu P., "Une contribution du multi-agent aux applications de travail-coopératif". In TSI, Réseaux et Systèmes Répartis, Calculateurs parallèles numéro spécial "Télé-Applications". Octobre 2001.

[Sabas, 01] Sabas A., "Systèmes multi-agents : Une analyse comparative des méthodologies de développement (vers une convergence des méthodologies de développement et la standardisation des plates-formes SMA". Maîtrise en Mathématiques et Informatique Appliquées. Université du Québec à Trois-Rivières, 2000.

[Sabas & al., 01] Sabas A., Delisle S., Badri M., "Vers une unification des méthodologies de développement des systèmes multiagents". Actes des Journées Francophones pour l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA'01), Montréal (Québec, Canada), pp.327-330, 12-14 novembre 2001.

[Sabas & al., 02] Sabas A., Delisle S., Badri M., "A Comparative Analysis of Multiagent System Development Methodologies: Towards a Unified Approach", Third International Symposium "From Agent Theory to Agent Implementation" (AT2AI-3), Sixteenth European Meeting on Cybernetics and Systems Research, Vienna (Autriche), 2-5 April 2002.

[Sassi & al., 97] Sassi M., Chaib-draa B., "Stratégies de négociation entre agents dans le domaine du transport". Journées Francophones en Intelligence Artificielle Distribuée - Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA'97), Editions Hermès, 1997.

[Shoham, 93] Shoham Y., “Agent Oriented Programming”. Journal of Artificial Intelligence. Vol.60, n°1, pp. 51-92. 1993.

[Soulhi, 00] Soulhi A., “Contribution de l’intelligence artificielle à l’aide à la décision dans la gestion des systèmes de transport urbain collectif”. Thèse de doctorat en automatique, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2000.

[Soussaul, 98] Soussaul B., “Amélioration de la qualité des correspondances des transports urbains”. Rapport intermédiaire, Référence 98.33, INRETS-I3D-LAIL, 1998.

[Thomas, 93] Thomas S.R., “PLACA, an Agent Oriented Programming Language”. PhD thesis, Computer Science Department, Stanford University, Stanford, CA 94305, August 1993.

[Trouvez, 01] Trouvez E., “IAD et ordonnancement: Une approche coopérative de réordonnancement par systèmes multi-agents”. Thèse de doctorat en Productique et informatique, Université de Droit, d’Economie et des Sciences d’Aix-Marseille III, 2001.

[Vercouter, 01] Vercouter L., “Conception et mise en œuvre de systèmes multi-agents ouverts et distribués”. Thèse de doctorat en Informatique. Université Jean Monnet et Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 2001.

[Wooldridge & al., 00] Wooldridge M., Jennings N.R., “The GAIA methodology for Agent-Oriented analysis and design”. Journal of Autonomous Agents and Multi-Agents Systems, Vol. 3, n°13. pp. 285-312, 2000.

## BIBLIOGRAPHIE<sup>2</sup>

[Allouche, 98] Allouche M., “Une société d’agents temporels pour la supervision de systèmes industriels”. Thèse de doctorat en informatique, Université Jean Monnet et Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 1998.

[Beaufils, 00] Beaufils B., “Modèles et simulations informatiques des problèmes entre agents”. Thèse de doctorat en informatique, Université de Lille1, 2000.

[Certu, 96] Certu. “Les arrêts de bus dans leur contexte urbain : aménagement, équipement, image ; analyse et recommandations”. Centre d’Etudes sur les Réseaux, les Transports, l’Urbanisme (CERTU) et les constructions publiques, Agence de l’environnement et de la maîtrise de l’énergie, Groupement des autorités responsables du transport, Lyon, 1996.

---

<sup>2</sup> Non citée dans le texte du mémoire.

[**Chatonnay, 98**] Chatonnay P., “Gestion de l’allocation des ressources aux objets dans les systèmes répartis : une approche multicritère intégrant les communications”. Thèse de doctorat en automatique et informatique, Université de FRANCHE-COMTE, 1998.

[**DeLoach, 01**] DeLoach S., “Analysis and design using MaSE and agentTool”. At 12<sup>th</sup> Midwest Artificial Intelligence and cognitive science conference (MAICS 2001), Miami University, March 31 – April 1 2001.

[**de Palma & al., 96**] de Palma A., Marchel F., “METROPOLIS : un outil de simulation du trafic urbain”. Revue Transports, No 378, pp. 204-215, Juillet-Août 1996.

[**Hammadi, 99**] Hammadi S., “Application des techniques avancées par l’optimisation des systèmes complexes et incertains”. HDR en automatique et informatique industrielle, Université de Lille1, 1999.

[**Ikni, 98**] Ikni R., “Des agents, des objets, et de leur utilisation en modélisation et en simulation de systèmes de contrôle-commande”. Habilitation à Diriger des Recherches en productique, Université de Lille1, 1998.

[**Khoualdi, 94**] Khoualdi K., “Filtrage d’alarmes pour un système automatisé par une approche multi-agent”. Thèse de doctorat en informatique, Université de Paris6, Décembre 1994.

[**Lasgouttes, 95**] Lasgouttes J.M., “Contribution à l’analyse de réseaux stochastiques et application aux systèmes de transport”. Thèse de doctorat en mathématiques, Ecole polytechnique, Palaiseau, 1995.

[**Leclercq & al., 95**] Leclercq F., Wauthers V., “Magique - Les systèmes multi-agents hiérarchiques”. Manuel utilisateur, LIFL, Université de Lille 1, 1995.

[**Marcenac, 97**] Marcenac P., “Modélisation, et simulation par agents : Application aux systèmes complexes”. Habilitation à Diriger des Recherches en informatique, Université de la Réunion, 1997.

[**Masson, 00**] Masson S., “Les interactions entre système de transport et système de localisation en milieu urbain et leur modélisation”. Thèse de doctorat en Sciences Economiques, mention Economie des transports, Université lumière Lyon 2, 2000.

[**Merlin, 92**] Merlin P., “Les transports urbains”. Presses Universitaires de France, 1992.

[**Mourmouris, 87**] Mourmouris J., “Transport et choix résidentiel : HESTA-HERMES, un système multicritère interactif”. Thèse de doctorat d’état en sciences de gestion, Université de Paris IX Dauphine, 1987.

[Parunak, 98a] Parunak H.V.D., “What can Agents do in Industry, and Why? An Overview of Industrial-Oriented R&D at CEC”, CIA’98, 1998.

[Parunak, 98b] Parunak H.V.D., “Practical and Industrial Applications of Agents-Based Systems”. Rapport Interne de l’Industrial Technology Institute, 1998.

[Ribiéro, 00] Ribiéro A.M., “Un modèle d’interaction dynamique pour les systèmes multi-agents”. Thèse de doctorat en informatique, Université Joseph Fourier – Grenoble1, 2000.

[Rizzi, 88] Rizzi M., “La régulation des autobus en ligne : Approche théorique et algorithmes”. RATP, Direction du réseau routier, TEC N°89, Juillet-Août 1988.

[Roozmond, 99b] Roozmond D.A., “Using intelligent agents for dynamic urban traffic control systems”. In European Transport Conference, Proceedings of seminar D Traffic management, safety & intelligent transport systems, Vol. P 432, PTRC, London, 1999.

[Roozmond, 99c] Roozmond D.A., “Using autonomous intelligent agents for urban traffic control systems”. Published on CD-ROM, 6<sup>th</sup> world congress on Intelligent Transport Systems, Toronto, 8-12 November, 1999.

[Sarramia, 01] Sarramia D. "Méthodologie orientée objets basée sur UML pour les Systèmes de Trafic Urbain", FORUM NTIC & TRANSPORTS UML, Paris, 25 octobre 2001.

[Siames, 00] Siames., "Synthèse d’Images, Animation, Modélisation et Simulation". SIAMES, Projet IRISA, pp 416-452, Rennes, 2000.

[Thiriet, 93] Thiriet J.M., “Contribution à la détection et l’analyse d’anomalies de trafic en milieu urbain : Regards sur l’existant en régulation du trafic urbain”. Thèse de doctorat en automatique, Université de Nancy1, 1993.

[Vojak, 96] Vojak R., “Analyse et modélisation multifractales de signaux complexes : application au trafic routier”. Thèse de doctorat en mathématiques, Université de Paris IX Dauphine, 1996.

## SIGNETS

[Agentbulider] Agentbuilder., <http://agentbuilder.com>.

[Asa] Asa., “Plates-formes de développement de systèmes multi-agents”, ASA : Architectures de Systèmes d’Agents, <http://www-poleia.lip6.fr/~guessoum/asa.html>.

[Hastus] Hastus., HASTUS est une compagnie canadienne spécialisée dans les logiciels de planification des réseaux de transport urbain, le site officiel : <http://www.giro.ca>.

**[Magique]** Magique., <http://www.lifl.fr/SMAC/projects/magique/>.

**[Madkit]** Madkit., <http://www.madkit.org>.

**[Zeus]** Zeus., <http://www.labs.bt.com/projects/agents.htm>.

---

## RÉSUMÉ en français

Pour assurer la régulation des réseaux de transport urbain et améliorer la qualité de service, les exploitants utilisent les Systèmes d'Aide à l'Exploitation (SAE). Un SAE permet le suivi en temps réel du fonctionnement d'un réseau. Il manipule une quantité importante d'informations que le régulateur n'arrive pas toujours à prendre en compte pour élaborer ses décisions. Les correspondances non assurées, conséquence directe des perturbations, augmentent alors le mécontentement des voyageurs.

Pour résoudre le problème de l'amélioration de la qualité des déplacements dans les réseaux de transport urbain, nous nous intéressons à la régulation de trafic aux nœuds des correspondances, régulation non encore prise en compte par les SAE. Nous proposons un Système d'Aide à la Décision (SAD) chargé d'élaborer des actions de régulation pertinentes en fonction de l'état du réseau. Son rôle principal est de surveiller un réseau de transport et de prévenir les perturbations en proposant des actions de régulation.

Un modèle multi-agent d'un réseau vu des correspondances est proposé. Ce système est basé sur trois types d'agents :

- Un agent SUPERVISEUR chargé du dialogue avec le régulateur : Il présente les actions et reçoit les demandes.
- Des agents CORRESPONDANCE, un par nœud de correspondances : Ils prennent en charge le suivi du fonctionnement du réseau de transport, la détection au plus tôt des perturbations et la proposition d'actions de régulation pour y remédier. Le système permet ainsi le maintien de la stabilité du trafic au niveau des nœuds de correspondances.
- Des agents ACQUISITION, un par arrêt de régulation : Ils sont chargés de la perception. Ils enregistrent les dates des passages des bus ainsi que des informations les concernant : Nombres de voyageurs descendant du bus et montant dans le bus.

---

**Mots-Clés :** Transport urbain, Transport en commun, Réseau de transport, Régulation des correspondances, Modélisation, Système multi-agent, Aide décision.

---

## TITRE en anglais (TITLE)

Multi-Agent Modeling and Decision-Support: application to the regulation of the connections in urban transportation networks.

---

## RÉSUMÉ en anglais (ABSTRACT)

To ensure the regulation of the urban transport networks and to improve the service quality, the regulators are assisted by an Automatic Vehicle Monitoring system (AVM) which allows a real-time follow-up of the network. It handles an important quantity of data which the regulator is usually unable to treat at real time in order to elaborate its decisions. The uninsured connections, direct consequence of the disturbances, increase then the dissatisfaction of the travelers.

To solve the problem of the improvement of the displacements' quality in urban transport networks, we are interested in the traffic regulation at the level of the connection nodes, where no regulation is taken into account by the AVM. We propose a Decision-Support System (DSS) responsible for the elaboration of relevant regulation actions according to the network state. Its principal role is to supervise a transport network and to prevent the disturbances by proposing regulation actions.

A multi-agent model of a network based on the connections' view is proposed. This system is based on three types of agents:

- A SUPERVISEUR agent charged of the dialogue with the regulator: It presents the actions and receives the requests.
- CORRESPONDENCE agents, one by connection node: They ensure the follow-up of the traffic within the transport network, the detection as soon as possible of the disturbances and the proposal of regulation actions to cure it. Thus, the system allows the maintenance of the traffic stability at the level of the connection nodes.
- ACQUISITION agents, one by regulation station: They are charged of the perception. They record the dates of the buses passages as well as the different information concerning them: Numbers of travelers alighting from the buses and boarding them.

---

**Keywords :** Urban transport, Public transport, Transport network, Connection regulation, Modeling, Multi-agent system, Decision-Support.

---

**DICIPLINE :** AUTOMATIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

---

## INTITULÉ ET ADRESSE DU LABORATOIRE DE RECHERCHE :

Laboratoire d'Automatique I<sup>3</sup>D (Interaction, Image et Ingénierie de la Décision)

Bâtiment P2 Université des Sciences et Technologies de Lille F-59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.