

30396
2003
323

N° d'ordre : 3349

Université des Sciences et Technologies de Lille
Ecole Centrale de Lille

THESE



Présentée en vue d'obtenir le grade de

DOCTEUR

en Automatique et Informatique Industrielle

par

Besma FAYECH CHAAR

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

**REGULATION DES RESEAUX DE TRANSPORT MULTIMODAL :
SYSTEMES MULTI-AGENTS ET ALGORITHMES
EVOLUTIONNISTES**

Soutenue le 14 octobre 2003 devant le jury d'examen :

| | | |
|----------------------|--------------------------|---|
| Président : | Christian VASSEUR | Professeur, Université de Lille 1 |
| Rapporteurs : | Alain QUILLIOT | Professeur, Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand |
| | Marc RICHTIN | Professeur, Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand |
| Examineurs : | Arnaud FREVILLE | Professeur, Université de Valenciennes |
| | Mekki KSOURI | Professeur, INSAT Tunis |
| | Khaled GHEDIRA | Professeur, ENSI Tunis |
| Directeurs : | Slim HAMMADI | Professeur, Ecole Centrale de Lille |
| | Salah MAOUCHE | Professeur, Université de Lille 1 |
| | Pierre BORNE | Professeur, Ecole Centrale de Lille |

Thèse préparée dans le Laboratoire I3D à L'université des sciences et technologies de Lille et le laboratoire LAIL à l'Ecole Centrale de Lille.

Remerciements

Cette thèse est l'aboutissement des travaux réalisés dans le cadre d'une coopération et d'une future fusion entre le laboratoire d'Interaction, Image et Ingénierie de la Décision (I3D) à l'université de Lille 1 (USTL) et le laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille (LAIL) à l'Ecole Centrale de Lille. Elle a été effectuée sous la co-direction de Pr Salah MAOUCHE de l'I3D, de Pr Slim HAMMADI du LAIL et de Pr Pierre BORNE du LAIL.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude au Professeur Slim HAMMADI, Professeur à l'Ecole Centrale de Lille et co-directeur de cette thèse, pour l'énorme soutien scientifique et moral qu'il a su m'adresser pendant ces quatre années au sein du LAIL. Je le remercie aussi pour ses qualités humaines et scientifiques et de m'avoir toujours encouragée à aller de l'avant.

Je tiens également à remercier chaleureusement Professeur Salah MAOUCHE, Professeur et directeur de l'UFR IEEA à l'université des sciences et technologies de Lille et co-directeur de ma thèse, pour sa perspicacité et ses précieux conseils qui ont énormément contribué à la réalisation de ce travail.

Je ne saurais oublier de remercier Professeur Pierre BORNE, Professeur et directeur scientifique à l'Ecole Centrale de Lille, Président du GDR MACS et co-directeur de cette thèse, pour sa rigueur scientifique et son aide précieuse et pour m'avoir accueillie au sein de l'équipe COMPIL du LAIL.

Que Professeur Christian VASSEUR, Professeur à l'université de Lille 1 et Directeur du laboratoire I3D, reçoive mes plus sincères remerciements pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant ce jury.

Un témoignage de ma profonde reconnaissance s'adresse à Professeur Marc RICHETIN, Professeur à l'université Blaise Pascal Clermont-Ferrand et directeur du RTP Logistique, et Professeur Alain QUILLIOT, Professeur à l'université Blaise Pascal Clermont-Ferrand et Directeur du laboratoire LIMOS et de l'ISIMA, pour avoir accepté d'examiner ma thèse et d'en être les rapporteurs et également pour leurs remarques et critiques constructives.

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être examinateurs de cette thèse et de participer à ce jury, un grand merci s'adresse à :

- Professeur Arnaud FREVILLE, Professeur à l'université de Valenciennes, Directeur de la Direction du Transport dans la Région du Nord,
- Professeur Mekki KSOURI, Professeur et directeur de l'Institut National des Sciences Appliquées et de la Technologie à Tunis, INSAT,
- Professeur Khaled GHEDIRA, Professeur et directeur de l'Ecole Nationale des Sciences de l'Informatique à Tunis, ENSI.

Dans la crainte d'oublier quelqu'un, je remercie toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse, en particulier, tout le personnel du LAIL et de l'Ecole Centrale de Lille pour leur bonne humeur et leur disponibilité. Je remercie également Pierre-Manuel Denaison pour son aide précieuse dans la conception de la plateforme multi-agent.

Je n'oublie pas d'adresser mes vifs remerciements à mes amis : Emna et Slim Affes, Inaam Ben Khaled, Imen Chaïeb, etc.

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

*A mes chers parents et grands-parents,
à mes sœurs chéries et nièce adorée,
et à mon époux bien-aimé.*

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Glossaire..... | 5 |
| Index des Tableaux et Figures..... | 8 |
| Introduction Générale | 11 |
| Chapitre I : Gestion des réseaux de transport public | 15 |
| I.1. Introduction | 16 |
| I.2. La multimodalité dans le domaine du transport urbain..... | 16 |
| I.2.1. Configuration d'un réseau multimodal..... | 16 |
| I.2.2. Domaine du transport multimodal | 18 |
| I.3. Processus de Planification..... | 20 |
| I.3.1. Problématique de la planification..... | 20 |
| I.3.2. Approches de planification | 22 |
| I.4. Processus de régulation | 24 |
| I.4.1. Problématique de la régulation | 24 |
| I.4.2. Phase de diagnostic..... | 25 |
| I.4.3. Phase de décision | 28 |
| I.5. Système d'aide à la décision | 34 |
| I.5.1. Nécessité d'un outil d'aide à la décision pour la régulation..... | 34 |
| I.5.2. Les systèmes d'aide à la décision | 34 |
| I.5.3. Rôle d'un SAD pour la régulation du trafic d'un réseau de transport urbain | 36 |
| I.5.4. Outils existants pour la régulation..... | 37 |
| I.6. Conclusion..... | 40 |
| Chapitre II : Nouvelle approche pour la modélisation et la caractérisation des réseaux de transport..... | 43 |
| II.1. Introduction..... | 44 |
| II.2. Représentation des réseaux de transport..... | 45 |
| II.2.1. Modélisation des courses | 45 |
| II.2.2. Modélisation par les Réseaux de Pétri | 47 |
| II.2.3. Modélisation des débits..... | 49 |
| II.2.4. Modélisation des itinéraires | 50 |
| II.2.5. Modélisation Multi-Agent..... | 51 |

| | |
|--|------------|
| II.2.6. Comparaison entre les modèles | 52 |
| II.3. Nouvelle Approche pour la modélisation..... | 54 |
| II.3.1. Présentation du modèle..... | 54 |
| II.3.2. Représentation de la multimodalité..... | 55 |
| II.3.3. Représentation des itinéraires..... | 57 |
| II.4. Formulation mathématique..... | 58 |
| II.4.1. Horizon spatio-temporel..... | 58 |
| II.4.2. Variables de décision | 59 |
| II.4.3. Les critères..... | 62 |
| II.4.4. Les contraintes..... | 70 |
| II.4.5. Caractéristiques du modèle mathématique..... | 72 |
| II.5. Conclusion..... | 74 |
| Chapitre III : Système Multi-Agent d'Aide à la Décision proposé | 77 |
| III.1. Introduction..... | 78 |
| III.2. Les Systèmes Multi-Agents..... | 79 |
| III.2.1. Les Systèmes Multi-Agents et l'Intelligence Artificielle..... | 79 |
| III.2.2. Caractéristiques des agents..... | 80 |
| III.2.3. Caractéristiques des systèmes multi-agents | 83 |
| III.3. Conception et applications des SMA | 87 |
| III.3.1. Conception des SMA..... | 87 |
| III.3.2. Applications des SMA | 88 |
| III.3.3. Discussion..... | 91 |
| III.4. Le Système Multi-Agent d'Aide à la Décision proposé..... | 93 |
| III.4.1. Description du SMAAD..... | 93 |
| III.4.2. Comportement des différents agents | 98 |
| III.4.3. Comportement global du SMAAD | 113 |
| III.5. Conclusion | 114 |
| Chapitre IV : Approche Evolutionniste de la Régulation | 117 |
| IV.1. Introduction..... | 118 |
| IV.2. Les Algorithmes Evolutionnistes..... | 119 |
| IV.2.1. Principe général..... | 119 |
| IV.2.2. Architecture des algorithmes évolutionnistes | 120 |
| IV.2.3. Mise en œuvre des algorithmes évolutionnistes..... | 121 |
| IV.2.4. Caractéristiques des algorithmes évolutionnistes..... | 124 |
| IV.2.5. Les algorithmes évolutionnistes et le domaine du transport | 125 |

| | |
|---|------------|
| IV.3. Approche Evolutionniste de la Régulation Sans Reconfiguration, AERSR..... | 127 |
| IV.3.1. Objectif..... | 127 |
| IV.3.2. Codage..... | 127 |
| IV.3.3. Fonction d'évaluation | 130 |
| IV.3.4. Algorithme..... | 132 |
| IV.3.5. Opérateur de sélection..... | 133 |
| IV.3.6. Opérateurs de croisement et de mutation | 134 |
| IV.4. Approche Evolutionniste de la Régulation Avec Reconfiguration, AERAR..... | 136 |
| IV.4.1. Objectif..... | 136 |
| IV.4.2. Flexibilité du réseau..... | 138 |
| IV.4.3. Codage..... | 142 |
| IV.4.4. Algorithme proposé | 144 |
| IV.4.5. Opérateurs de croisement | 146 |
| IV.4.6. Algorithme de Recherche d'Itinéraires, ARI..... | 152 |
| IV.4.7. Opérateurs de mutation..... | 160 |
| IV.5. Conclusion..... | 162 |
| Chapitre V : Applications et Résultats | 165 |
| V.1. Introduction..... | 166 |
| V.2. Applications de l'approche évolutionniste de la régulation | 166 |
| V.2.1. Scénario 0 | 166 |
| V.2.2. Scénario 1 | 171 |
| V.2.3. Scénario 2 | 177 |
| V.2.4. Scénario 3 | 180 |
| V.2.5. Scénario 4 | 184 |
| V.2.6. Scénario 5 | 188 |
| V.2.7. Remarques récapitulatives..... | 193 |
| V.3. Fonctionnement global du SMAAD..... | 195 |
| V.3.1. Présentation de l'application..... | 195 |
| V.3.2. Module de surveillance | 197 |
| V.3.3. Module de régulation..... | 198 |
| V.4. Conclusion | 200 |
| Conclusion Générale | 203 |
| Bibliographie Générale..... | 207 |
| Récapitulatif des Publications..... | 219 |

| | |
|--|------------|
| Annexes | 223 |
| Annexe 1 : Les lignes de Transpole utilisées dans les scénarios..... | 224 |
| Annexe 2 : Description de la plateforme du SMAAD [Denaison, 03]..... | 232 |

Glossaire

| | |
|--|--|
| TM | : Tableau de Marche |
| TMT | : Tableau de Marche Théorique |
| TMP | : Tableau de Marche Perturbé |
| TMR | : Tableau de Marche Régulé |
| SMAAD | : Système Multi-Agent d'Aide à la Décision |
| \mathcal{R} | : Réseau de transport multimodal |
| \mathcal{S} | : Ensemble des stations dans le réseau |
| \mathcal{V} | : Ensemble des véhicules qui y circulent |
| $G^{\mathcal{R}}$ | : Graphe représentatif du réseau |
| $\mathcal{N}(G^{\mathcal{R}})$ | : Ensemble des nœuds de $G^{\mathcal{R}}$ |
| $\mathcal{A}(G^{\mathcal{R}})$ | : Ensemble des arcs de $G^{\mathcal{R}}$ |
| t_{pert} | : Horaire de détection de l'incident |
| \mathcal{H} | : Horizon de la régulation |
| $\mathcal{S}^{\mathcal{H}}$ | : Ensemble des stations considérées dans l'horizon \mathcal{H} |
| $\mathcal{V}^{\mathcal{H}}$ | : Ensemble des véhicules considérés dans l'horizon \mathcal{H} |
| $G^{\mathcal{R} \cdot \mathcal{H}}$ | : Graphe correspondant à la partie de \mathcal{R} qui appartient à l'horizon \mathcal{H} . |
| $\mathcal{N}(G^{\mathcal{R} \cdot \mathcal{H}})$ | : Ensemble des nœuds de $G^{\mathcal{R} \cdot \mathcal{H}}$ |
| $\mathcal{A}(G^{\mathcal{R} \cdot \mathcal{H}})$ | : Ensemble des arcs de $G^{\mathcal{R} \cdot \mathcal{H}}$ |
| S_k^r | : k -ème station de la ligne r |
| V_i^l | : i -ème véhicule de la ligne l |
| a_{ij}^{lm} | : Variable de passage associée au véhicule V_i^l et à l'arrêt S_j^m |
| x_{ijk}^{lmr} | : Variable de destination associée à V_i^l et l'arc entre S_j^m et S_k^r |
| ta_{ij}^{lm} | : Horaire d'arrivée du véhicule |

- td_{ij}^{lm} : Horaire de départ de V_i^l de l'arrêt S_j^m
- t_{ijk}^{lmr} : Durée du trajet direct de V_i^l de la station S_j^m à la station S_k^r
- δ_{ijk}^{lmr} : Modification du temps de parcours de V_i^l entre S_j^m et S_k^r
- ε_{ij}^{lm} : Temps supplémentaire de stationnement imposé sur le véhicule V_i^l à l'arrêt S_j^m
- ts_{ij}^{lm} : Temps d'arrêt de V_i^l à la station S_j^m
- t_{mont} : Temps moyen que prend une personne pour monter dans le véhicule
- t_{desc} : Temps moyen que prend une personne pour descendre d'un véhicule
- $N_{mont_{ij}}^{lm}$: Nombre de personnes qui montent à bord de V_i^l à la station S_j^m
- $N_{desc_{ij}}^{lm}$: Nombre de personnes qui descendent de V_i^l à la station S_j^m
- $Arrêt_Prec(V_i^l, S_j^m)$: Dernière station desservie par V_i^l avant S_j^m
- $Veh^+(V_i^l, S_j^m, S_k^r)$: Premier véhicule qui succède V_i^l à S_j^m et qui passe également par S_k^r après S_j^m
- $\mu(\Delta t_I, S_j^m, S_k^r)$: Taux constant d'arrivée pendant Δt_I à la station S_j^m et en destination de S_k^r
- $N_{i'j}^{l'mr}$: Nombre de personnes qui montent à bord de $V_{i'}^{l'}$ à S_j^m et qui ont S_k^r pour destination
- AT : Attente totale des passagers aux arrêts dans l'horizon de la régulation
- AT_0 : Attente totale des passagers aux arrêts dans l'horizon de la régulation selon l'état perturbé du réseau
- $\gamma_{i'i'j}^{l'm}$: Variable de correspondance de V_i^l à $V_{i'}^{l'}$ à la station S_j^m
- $\omega_{i'i'j}^{l'm}$: Nombre de personnes en transfert de V_i^l à $V_{i'}^{l'}$ à la station S_j^m
- $\rho_{i'i'j}^{l'm}$: Taux de correspondance de V_i^l à $V_{i'}^{l'}$ à l'arrêt S_j^m
- TT : Durée totale des transferts dans l'horizon de la régulation

| | |
|---------------|---|
| TT_0 | : Durée totale des transferts dans l'horizon de la régulation selon l'état perturbé du réseau |
| C_{ij}^{lm} | : Charge de V_i^l au départ de S_j^m |
| RT | : Durée totale des Routes dans l'horizon de la régulation |
| RT_0 | : Durée totale des Routes dans l'horizon de la régulation selon l'état perturbé du réseau |
| AE | : Algorithme Evolutionniste |
| AERSR | : Approche Evolutionniste de Régulation Sans Reconfiguration |
| AERAR | : Approche Evolutionniste de Régulation Avec Reconfiguration |
| ARI | : Algorithme de Recherche d'Itinéraires |

Index des Tableaux et Figures

Index des Tableaux

| | | |
|---------------|--|-----|
| Tableau II.1: | Tableau comparatif entre les modèles existants des réseaux de transport..... | 53 |
| Tableau II.2: | Estimation du nombre de variables de décision..... | 73 |
| Tableau IV.1: | Relation entre les paramètres et les variables de passage..... | 140 |
| Tableau IV.2: | Exemple de paramètres de passage et de flexibilité..... | 141 |
| Tableau IV.3: | Schéma d'affectation des arrêts au véhicule V_i^l | 141 |
| Tableau IV.4: | Plan des arêtes du graphe..... | 159 |
| Tableau V.1: | Les horaires de passage théoriques pour la ligne l | 167 |
| Tableau V.2: | Tableau récapitulatif des résultats..... | 194 |
| Tableau V.1: | Les horaires de passage théoriques pour la ligne l | 167 |
| Tableau V.2: | Tableau récapitulatif des résultats..... | 194 |

Index des figures

| | | |
|---------------|--|----|
| Figure I.1: | Exemple de réseau multimodal..... | 17 |
| Figure I.2: | Processus classique de planification..... | 20 |
| Figure I.3: | Graphique des horaires des véhicules..... | 21 |
| Figure I.4: | Exemple de problème d'ordonnancement de véhicules à deux dépôts..... | 23 |
| Figure I.5: | Nécessité de la régulation du trafic d'un réseau de transport..... | 25 |
| Figure I.6: | Fonctionnement du Système d'Aide à l'Exploitation..... | 26 |
| Figure I.7: | Classification des incidents..... | 28 |
| Figure I.8: | Exemple de régulation..... | 33 |
| Figure I.9: | Processus de décision..... | 35 |
| Figure I.10: | Processus de contrôle en temps réel du trafic d'un réseau de transport urbain..... | 37 |
| Figure II.1: | Exemple de problème d'ordonnancement dynamique de véhicules à deux dépôts..... | 46 |
| Figure II.2: | Exemple de modélisation par les RdP d'un arrêt de bus..... | 49 |
| Figure II.3: | Exemple de modélisation du trafic dans un réseau routier..... | 49 |
| Figure II.4: | Exemple de modélisation des itinéraires..... | 51 |
| Figure II.5: | Exemple d'un graphe représentant un réseau multimodal..... | 56 |
| Figure II.6: | Exemple de modélisation par un graphe orienté..... | 56 |
| Figure II.7: | Exemple de configuration des lignes du réseau..... | 57 |
| Figure II.8: | Distribution des arrivées de passagers à un arrêt..... | 64 |
| Figure III.1: | Représentation d'un système multi-agent..... | 84 |
| Figure III.2: | Intégration du SMAAD dans le processus global de contrôle du réseau..... | 94 |
| Figure III.3: | Représentation de la multimodalité..... | 94 |
| Figure III.4: | Rôle des agents du SMAAD..... | 95 |
| Figure III.5: | Organisation du SMAAD..... | 96 |

| | |
|---|-----|
| Figure III.6: Modèle d'un agent..... | 97 |
| Figure III.7: Comportement des agents VEHICULE..... | 99 |
| Figure III.8: Comportement des agents ARRET..... | 102 |
| Figure III.9: Comportement de l'agent INCIDENT..... | 104 |
| Figure III.10: Etat de l'organisation dynamique lors de l'évaluation des incidents..... | 105 |
| Figure III.11: Comportement d'un agent ZONEPERT..... | 106 |
| Figure III.12: Construction de l'horizon à partir de l'instant t _{pert} | 107 |
| Figure III.13: Evaluation des incidents..... | 109 |
| Figure III.14: Base de Règles de ZONEPERT..... | 110 |
| Figure III.15: Comportement d'un agent ZONEREG..... | 112 |
| Figure III.16: Interactions dans le module de régulation du SMAAD..... | 114 |
| Figure IV.1: Architecture générale d'un algorithme évolutionniste..... | 120 |
| Figure IV.2: Exemple de codage d'un chromosome..... | 121 |
| Figure IV.3: Exemple d'un croisement à un point..... | 123 |
| Figure IV.4: Exemple de croisement à deux points..... | 123 |
| Figure IV.5: Exemple de croisement uniforme..... | 123 |
| Figure IV.6: Exemple de mutation..... | 124 |
| Figure IV.7: Exemple de codage de l'ordonnancement des atterrissages..... | 125 |
| Figure IV.8: Exemple de codage pour un PVC..... | 126 |
| Figure IV.9: Codage générique des décisions pour l'horizon étudié..... | 128 |
| Figure IV.10: Codage CH d'une solution de régulation des horaires..... | 129 |
| Figure IV.11: Exemple de régulation d'une perturbation par l'approche évolutionniste..... | 129 |
| Figure IV.12: Algorithme évolutionniste de régulation sans reconfiguration..... | 133 |
| Figure IV.13: Exemple de croisement uniforme pour l'AERSR..... | 135 |
| Figure IV.14: Algorithme de croisement uniforme contrôlé pour l'AERSR..... | 136 |
| Figure IV.15: Exemple de graphe de déplacement de V_i^l dans l'horizon \mathcal{H} | 139 |
| Figure IV.16: Considération des stations fictives..... | 139 |
| Figure IV.17: Considération du schéma d'affectation des nœuds dans $G(V_i^l)$ | 142 |
| Figure IV.18: Codage des itinéraires et des horaires (CIH)..... | 143 |
| Figure IV.19: Codage des nœuds et des horaires (CNH)..... | 143 |
| Figure IV.20: Algorithme évolutionniste de régulation avec reconfiguration..... | 145 |
| Figure IV.21: Exemple de croisement uniforme sur les lignes pour le CNH..... | 146 |
| Figure IV.22: Exemple de croisement à deux-points sur les colonnes pour le CNH..... | 147 |
| Figure IV.23: Exemple de croisement uniforme sur les lignes pour le CIH..... | 148 |
| Figure IV.24: Exemple de croisement PMX avec insertion adapté pour le CIH..... | 151 |
| Figure IV.25: Algorithme d'insertion pour croisement PMX adapté au codage CIH..... | 152 |
| Figure IV.26: Exemple d'un chemin hamiltonien..... | 154 |
| Figure IV.27: Structure d'un algorithme heuristique de recherche d'un chemin hamiltonien..... | 155 |
| Figure IV.28: Exemple de transformation rotationnelle..... | 156 |
| Figure IV.29: Respect des extrémités dans la recherche d'un chemin hamiltonien..... | 157 |

| | |
|---|-----|
| Figure IV.30: Algorithme de recherche d'un itinéraire pour CIH et CNH. | 158 |
| Figure IV.31: Exemple d'un graphe pour la recherche d'itinéraire. | 159 |
| Figure IV.32: Algorithme de mutation pour CNH dans l'AERAR..... | 161 |
| Figure IV.33: Les opérateurs de mutation pour le CIH. | 162 |
| Figure V.1: Construction de l'horizon spatio-temporel..... | 167 |
| Figure V.2: Courbe des charges théoriques des véhicules de la ligne 0. | 168 |
| Figure V.3: Résultats de la régulation d'une ligne avec l'AERSR..... | 170 |
| Figure V.4: Schéma de régulation de l'exemple 4. | 171 |
| Figure V.5: construction de l'horizon spatio-temporel pour le scénario 1..... | 172 |
| Figure V.6: TMP construits par l'agent ZONEPERT pour le scénario 1..... | 173 |
| Figure V.7: Charges théoriques des véhicules aux arrêts de l'horizon. | 173 |
| Figure V.8: Exemples de régulation monocritère pour scénario 1. | 175 |
| Figure V.9: Exemple de régulation multicritère pour scénario 1. | 175 |
| Figure V.10: Schéma de régulation de l'exemple 7. | 176 |
| Figure V.11: Courbe de convergence pour l'exemple 7..... | 177 |
| Figure V.12: Exemples de régulation monocritère pour le scénario 2. | 178 |
| Figure V.13: Amélioration des solutions avec prise en compte du critère de ponctualité..... | 179 |
| Figure V.14: Exemple de régulation multicritère pour le scénario 2. | 180 |
| Figure V.15: TMP construits par l'agent ZONEPERT pour scénario 3..... | 181 |
| Figure V.16: Exemples de régulation monocritère pour scénario 3. | 182 |
| Figure V.17: Exemples de régulation multicritère pour le scénario 3. | 183 |
| Figure V.18: Courbe de convergence pour l'exemple 15..... | 184 |
| Figure V.19: Construction de l'horizon de régulation pour scénario 4..... | 185 |
| Figure V.20: Horaires d'arrivée et de départ des bus au nœud de correspondance..... | 186 |
| Figure V.21: Exemples de régulation monocritère pour le scénario 4. | 187 |
| Figure V.22: Exemples de régulation multicritère pour le scénario 4. | 188 |
| Figure V.23: Représentation des itinéraires théoriques des véhicules des lignes 5 et 7..... | 189 |
| Figure V.24: Exemple de graphe de déplacement pour le véhicule 8..... | 190 |
| Figure V.25: Exemple d'application de l'algorithme de recherche d'itinéraire. | 190 |
| Figure V.26: Exemple de graphe de déplacement pour le scénario 5..... | 191 |
| Figure V.27: Exemples de régulation monocritère pour le scénario 5..... | 192 |
| Figure V.28: Exemple de régulation multicritère pour le scénario 5..... | 193 |
| Figure V.29: Processus d'initialisation du système..... | 196 |
| Figure V.30: Comportement du module de surveillance..... | 197 |
| Figure V.31: Création d'un agent INCIDENT. | 198 |
| Figure V.32: Construction de l'horizon spatio-temporel par ZONEPERT..... | 199 |
| Figure V.33: Affichage des solutions de ZONEREG. | 200 |

Introduction Générale

Pour des raisons économiques et environnementales, l'intérêt mondial pour le domaine du transport ne fait que croître depuis les deux dernières décennies. En effet, la demande en transport public et en infrastructures routières s'est amplifiée à cause de l'augmentation de la densité de la population et de l'étalement urbain. Ainsi, la notion de répartition des déplacements entre les différents moyens de transport est apparue pour ensuite introduire les notions de multimodalité et d'intermodalité. Les déplacements ne peuvent alors qu'augmenter et être encore plus complexes à cause de la présence de plusieurs modes de transport. Les réseaux multimodaux suscitent de plus en plus l'intérêt des chercheurs.

Grâce à l'évolution des moyens technologiques, les exploitants des réseaux de transport public ont un besoin plus important d'outils informatiques avancés qui leur permettent d'améliorer la qualité du service offert aux usagers du transport en commun. Ces outils concernent, entre autres, l'établissement de l'offre prévisionnelle de transport en temps anticipé et le réajustement, en temps réel, de cette offre par rapport à la demande.

Le travail présenté dans ce mémoire traite le problème de l'adaptation de l'offre aux conditions réelles d'exploitation. Il est inclus dans le Volet 1, Sciences de base (Thème 7, Modélisation, Simulation, Optimisation) d'un grand projet de recherche dénommé Méthodologies pour l'Optimisation dans les Systèmes de Transport et de Télécommunication, MOST. Ce projet regroupe plusieurs laboratoires de recherche de la région du Nord Pas-de-Calais (LAIL, LAMIH, I3D, etc). Il vise trois axes de progrès pour une meilleure maîtrise des modèles d'optimisation rencontrés dans les systèmes de transport et de télécommunication :

- Opération 1 : Nouvelles méthodes heuristiques pour concilier la qualité, la rapidité et la robustesse dans la recherche de solutions.
- Opération 2 : Optimisation des scénarios pour l'optimisation de transports complexes.
- Opération 3 : Conception et implantations parallèles de méthodes d'optimisation pour la conception des réseaux de télécommunications mobiles (problème de couverture, d'allocation de fréquence, etc.).

Nos travaux contribuent à l'avancement du projet MOST à travers la thématique de la régulation du trafic au sein d'un réseau de transport multimodal. Ce problème préoccupe de plus

en plus les compagnies de transport, d'autant plus que les usagers deviennent de plus en plus exigeants, que la concurrence devient plus rude et que les exploitants ont peu de moyen de prévoir l'apparition de ces phénomènes aléatoires qui affectent le trafic.

Nous avons alors pour objectif de construire un outil qui assiste les régulateurs dans les différentes tâches qui leur sont attribuées afin de préserver au mieux le confort des usagers des réseaux de transport multimodal. Dans ce but, nous proposons un système d'aide à la décision qui effectue la surveillance du trafic, la détection des incidents, leur diagnostic et la régulation. Ce système s'appuie sur une coopération entre une approche agent et une approche évolutionniste afin de fournir des décisions de régulation. Les applications existantes de ce type de coopération consistent en général en une stratégie d'apprentissage, ce qui constitue une des originalités de notre système.

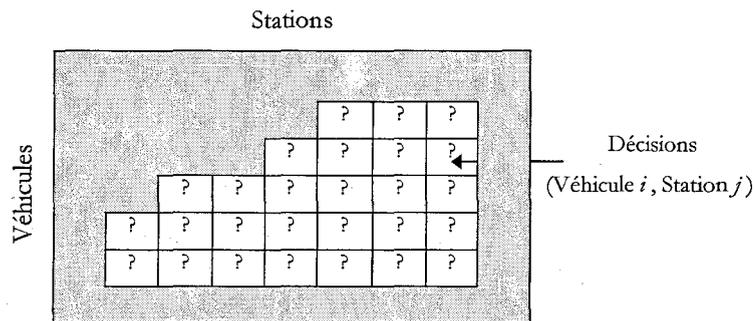
Le choix du système multi-agent d'aide à la décision (SMAAD) est justifié par le caractère distribué et ouvert des réseaux de transport urbain. Aussi, la complexité des tâches à exécuter nécessite une décomposition modulaire du problème considéré. Par ailleurs, vu l'échec des méthodes exactes dans le traitement de la régulation, nous avons choisi une méthode approchée basée sur les algorithmes évolutionnistes. En effet, nous ne cherchons pas de solution parfaite pour résorber une perturbation, mais nous essayons d'améliorer au maximum l'existant.

Ce mémoire, organisé en 5 chapitres, débute par un état de l'art sur la gestion des réseaux de transport multimodal. Dans ce premier chapitre, nous nous intéressons au processus de planification de l'offre prévisionnelle afin de mieux cerner celui de la régulation. Nous exposons alors les différents critères sur lesquels la recherche de solutions s'appuie. Nous expliquons aussi la nécessité d'un système d'aide à la décision pour un tel processus.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons un état de l'art des différents modèles attribués aux réseaux de transport multimodal, ainsi qu'une étude comparative à l'issue de laquelle nous choisissons une modélisation agent pour la localisation des incidents, la collecte des informations et aussi la résolution, et une modélisation graphique pour la régulation spatiale ou la représentation des itinéraires. Toutefois, nous n'exposons à ce niveau que le modèle graphique et la caractérisation mathématique de la problématique considérée. Nous détaillons ainsi les différentes variables de décisions liées au réordonnancement des courses des véhicules par la réaffectation des horaires et des itinéraires. La formulation mathématique des critères de régularité, ponctualité et correspondance est également décrite.

Le troisième chapitre traite du modèle agent du réseau et du système d'aide à la décision. Nous y intégrons d'abord des généralités sur les systèmes multi-agents pour saisir leurs avantages. Nous proposons ensuite un système multi-agent d'aide à la décision pour la régulation. Nous exposons les deux modules de surveillance et de régulation de ce système et les comportements des différents agents qui le composent, notamment les agents ZONPERT et ZONEREG. ZONPERT a un rôle important dans le diagnostic des perturbations et surtout dans la construction de l'horizon spatio-temporel de la régulation. Cet horizon est en effet très important puisque les perturbations évoluent suivant deux dimensions : spatiale et temporelle. De même, la régulation concerne ces mêmes dimensions. L'agent ZONEREG s'appuie sur une approche évolutionniste de régulation pour proposer des décisions liées à l'horizon fixé.

Dans le quatrième chapitre, nous expliquons le fonctionnement de ce dernier agent après une brève description des algorithmes évolutionnistes. En fait, deux versions de l'approche évolutionniste y sont présentées. La figure suivante illustre le codage générique, sous forme de matrice, sur lequel s'appuient les deux versions. Les gènes correspondent aux décisions qui concernent chaque véhicule à chaque station. Les décisions peuvent être : retarder, avancer, changer d'itinéraire, sauter, transborder, injecter, etc.



Codage générique des décisions pour l'horizon étudié.

La première approche proposée concerne une régulation temporelle qui n'agit que sur les horaires de passage des véhicules. Elle se base ainsi sur un codage des horaires. La deuxième décrit une régulation spatio-temporelle qui agit sur les horaires et les itinéraires. Ainsi, les solutions proposées peuvent suggérer une reconfiguration partielle du réseau afin de réduire l'impact des incidents, ce qui constitue une des originalités du travail présent. Cette reconfiguration nécessite la considération du modèle graphique du réseau en vue de trouver des itinéraires possibles à l'aide d'un algorithme de recherche de chemins hamiltoniens.

Le dernier chapitre de ce mémoire concerne les résultats de simulation de l'approche évolutionniste de la régulation. Afin de mettre en valeur l'apport et l'efficacité de cette approche, nous présentons plusieurs applications à différents scénarios de perturbation. Aussi, une première application en langage Java du SMAAD y est illustrée afin de valider le comportement des différents agents qui le composent.

Enfin, nous présentons quelques conclusions qui découlent de nos travaux et également des perspectives.

Chapitre I : Gestion des réseaux de transport public

I.1. Introduction

La notion de multimodalité dans les réseaux de transport collectif fait l'objet de différentes thématiques de recherche liées à l'aménagement des réseaux, à la gestion conjointe des différents modes de transport, à l'information multimodale et à la planification et régulation du trafic. La première partie de ce chapitre est consacrée ainsi à cette notion.

Nous avons choisi de présenter dans la deuxième partie de ce chapitre la problématique de planification du trafic d'un réseau de transport public, afin de saisir l'importance et la complexité de ce processus. En effet, il s'agit de construire les différents horaires de passage et les listes de service du personnel à travers des tâches d'ordonnancement en tenant compte des ressources de l'entreprise.

Par ailleurs, puisque ce dernier processus ne s'appuie que sur des prévisions des durées de parcours et des conditions de circulation et qu'en temps réel, divers aléas peuvent affecter le trafic, il est nécessaire d'exécuter des mesures de régulation pour pallier aux perturbations. La troisième partie de ce chapitre concerne alors la problématique, les manœuvres et les critères de régulation.

Dans la dernière partie, nous présentons la nécessité d'un système d'aide à la décision pour assister les régulateurs dans leurs tâches. Les différents outils existants d'aide à la décision y sont exposés.

I.2. La multimodalité dans le domaine du transport urbain

I.2.1. Configuration d'un réseau multimodal

Un réseau de transport multimodal est caractérisé par la présence simultanée de différents modes de transport tels que les bus, les métros et les tramways, pour le cas des systèmes de transport des personnes et non des marchandises. La liaison entre ces modes est traduite par la présence de pôles d'échange ou de nœuds de correspondance, au niveau desquels il y a des échanges de voyageurs entre deux ou plusieurs véhicules à différents horaires de la journée (figure I.1). Ce genre de réseau devient indispensable dans les zones à haute densité de population qui nécessitent alors un plus grand nombre de déplacements.

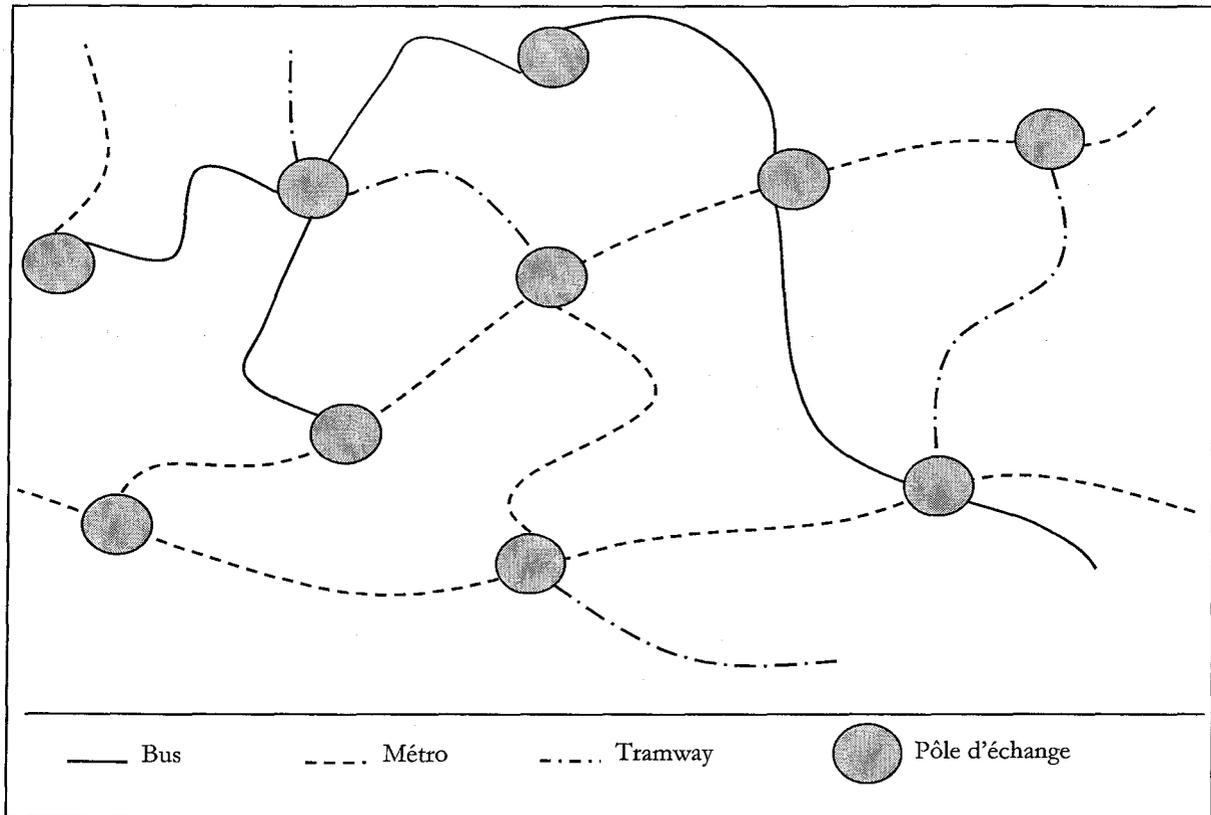


Figure I.1: Exemple de réseau multimodal.

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

Dans un cadre plus global, on parle aussi d'intermodalité lorsqu'on traite les réseaux multimodaux de transport terrestre, dits aussi de surface. En effet, ces derniers comportent également les modes de transport individuel tels que les voitures particulières (VP). Ainsi, pour des raisons économiques et environnementales, les Plans de Déplacement Urbain affichent des

objectifs ambitieux quant à l'amélioration de l'usage des transports en commun et à la diminution de l'usage des voitures particulières. La réussite de ces plans repose sur une politique d'exploitation coordonnée des différents modes de transport aboutissant à une amélioration significative des conditions de circulation et de la qualité de service des transports publics de surface.

I.2.2. Domaine du transport multimodal

Plusieurs études liées à la multimodalité et l'intermodalité ont été réalisées dans les dernières décennies. Ces études traitent de diverses problématiques allant de l'aménagement des réseaux jusqu'à leur exploitation en passant par la planification du trafic.

I.2.2.1. Aménagement des réseaux

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

I.2.2.2. Gestion conjointe

Dans un réseau multimodal, la qualité de l'offre est principalement perçue par les voyageurs lors des correspondances entre les différentes lignes d'un même mode de transport ou entre les différents modes. Ainsi, pour une qualité de service optimale et pour éviter les conflits qui peuvent surgir d'une gestion décentralisée, il est souhaitable d'avoir une vue globale sur l'ensemble du réseau multimodal lors de la planification et surtout lors de l'exploitation. Afin d'avoir une gestion conjointe, une liaison à travers un support intermodal entre les Systèmes d'Aide à l'Exploitation de chaque mode de transport est nécessaire surtout en conditions perturbées ou de crise (congestion, panne, grève), ce qui constitue un autre axe de recherche dans le domaine du transport multimodal.

I.2.2.3. Système d'information multimodale

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

I.2.2.4. Planification du trafic

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

I.2.2.5. Régulation du trafic

Néanmoins, le processus de planification est effectué en général une fois par an et ne s'appuie que sur des estimations de la demande et des durées des trajets entre les différents arrêts du réseau. Par conséquent, la moindre variation, en temps réel, de ces paramètres, est susceptible de contraindre les véhicules à des retards et par conséquent, les passagers à une attente encore plus longue. Ainsi, la gestion du trafic dans un réseau de transport ne s'arrête pas à l'étape de la planification qui se fait en temps anticipé. Un processus de régulation est réalisé en temps réel afin de gérer les écarts entre les horaires planifiés ou théoriques et les horaires réels de passage, ce qui constitue un autre axe de recherche dans le domaine du transport.

I.3. Processus de Planification

I.3.1. Problématique de la planification

L'objectif de ce processus est d'établir une offre prévisionnelle de transport qui s'ajusterait à la demande. Le processus traditionnel est illustré par la figure I.2 [Huissman, 01]. La configuration initiale des lignes du réseau ainsi que leurs fréquences sont fixées comme données d'entrée. Les durées des trajets entre les différents points du réseau sont aussi considérées connues. Des tableaux horaires sont alors établis et résultent en des « courses » qui correspondent aux temps et lieux d'arrivée et de départ.

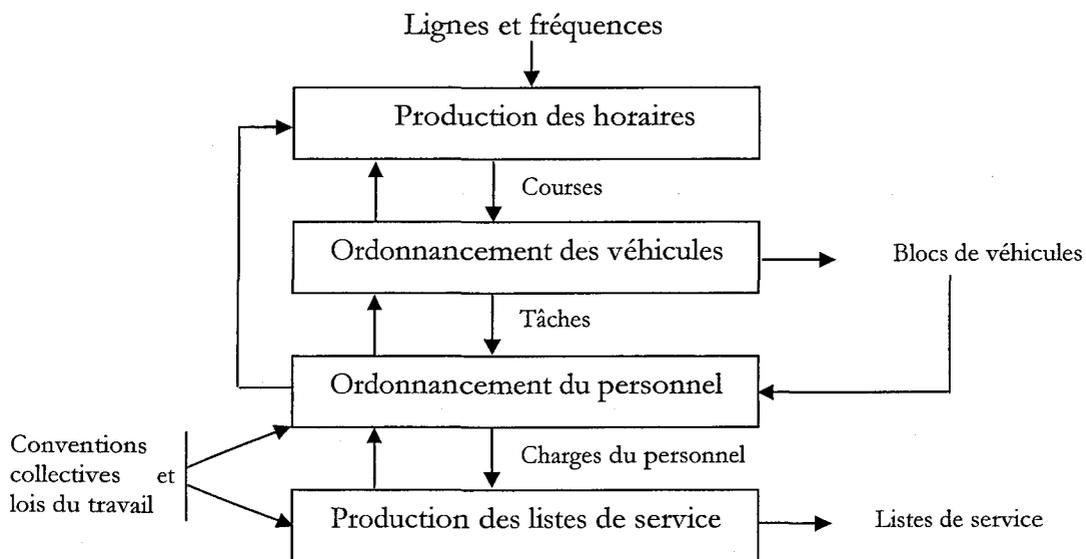


Figure I.2: Processus classique de planification.

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

Le résultat de la planification se présente alors sous la forme de listes de service pour les différents intervenants dans l'exploitation et aussi de Tableaux de Marche Théoriques (TMT). Ces TMT représentent les différents horaires de passage des véhicules aux arrêts du réseau et sont établis en tenant compte de la période de la journée (heures de pointe ou creuse), du type de journée (jour férié, dimanche, etc.), de la période de l'année (vacances scolaires, saisons), des

conditions météorologiques et surtout selon les contraintes d'exploitation (nombre de véhicules,...).

La création des TMT est effectuée par les graphiqueurs qui les illustrent par des graphiques horaires pour les véhicules, selon le temps et la distance (figure I.3). Chaque véhicule a son évolution présentée par une droite discontinue entre son origine et sa destination et dont la pente traduit la vitesse moyenne entre des arrêts consécutifs. La longueur des segments des lignes horizontales représente les durées des arrêts aux stations.

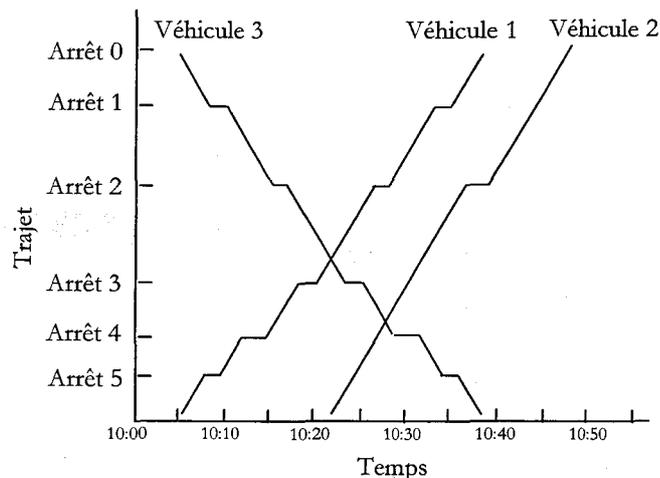


Figure I.3: Graphique des horaires des véhicules.

Cette problématique étant complexe, et dans le but d'avoir des TMT optimaux qui maximisent la qualité de service et réduisent les coûts d'exploitation, plusieurs chercheurs ont consacré ainsi leurs travaux à la planification du trafic au sein d'un réseau de transport collectif, en utilisant, dans la plupart des cas, des heuristiques inspirées de la Recherche Opérationnelle [Wren, 98]. La planification est en fait souvent considérée comme un axe particulier des problèmes d'ordonnancement et de tournées de véhicules, « Vehicle Routing and Scheduling Problems », qui englobe les problèmes de la livraison de marchandises, de la collecte du courrier ou des déchets ménagers urbains, de l'ordonnancement du transport spécifique aux écoliers ou handicapés, etc. Un modèle général pour les problèmes d'ordonnancement des véhicules a été développé dans [Desrochers & al, 99].

Quelques outils informatiques traitant ce type de problèmes sont utilisés par les compagnies de transport par les bus, notamment HASTUS qui a été développé dans les années 80 [Rousseau, 85].

I.3.2. Approches de planification

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

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

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

La figure I.4 présente un exemple illustrant les problèmes d'ordonnancement à deux dépôts. Les courses sont caractérisées par leurs horaires de début et de fin. Un arc est susceptible de relier deux courses quand leurs horaires sont compatibles. Autrement dit, il faut que l'horaire de début de la deuxième course soit après l'horaire de fin de la première additionné à la durée du trajet séparant les lieux correspondant aux courses [Huissman & al, 01].

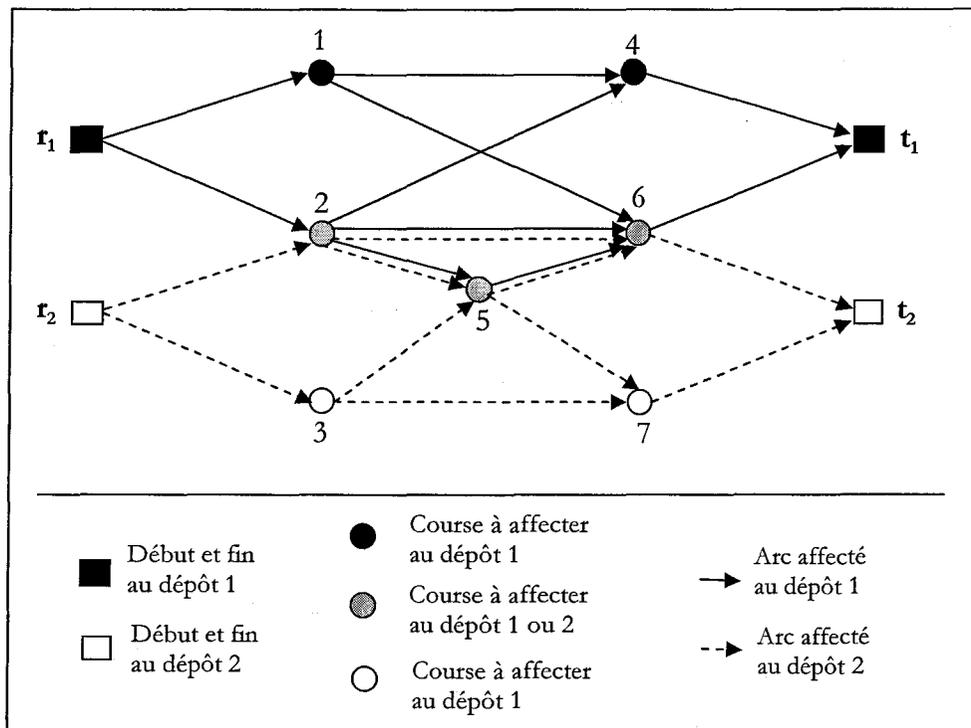


Figure I.4: Exemple de problème d'ordonnancement de véhicules à deux dépôts.

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

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

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

I.4. Processus de régulation

I.4.1. Problématique de la régulation

La planification, réalisée en temps anticipé, se base sur des prévisions des conditions de circulation, des durées des trajets et de la demande de transport. Ainsi, il est bien difficile en temps réel de suivre les Tableaux de Marche Théoriques (TMT) issus de ce processus à cause de l'apparition de phénomènes complexes et aléatoires affectant le trafic du réseau. Afin d'éviter la détérioration de la qualité de service, les perturbations provoquées par ces phénomènes doivent être gérées dans les plus brefs délais à travers un processus de régulation (Figure I.5).

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

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

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

Le processus de régulation contient ainsi différentes tâches allant de la détection des perturbations à la prise de décision. Nous regroupons ces tâches en deux phases : phase de diagnostic et phase de décision.

La phase de diagnostic consiste à détecter et analyser les perturbations afin d'évaluer leur gravité. Cette phase se base sur les données fournies par le Système d'Aide à l'Exploitation (SAE) qui représente un support de surveillance du réseau.

Le régulateur peut ainsi entamer une phase de décision dans laquelle il doit choisir les mesures appropriées de régulation en tenant compte des contraintes d'exploitation et selon les critères qui conviennent aux objectifs d'exploitation et à la nature des perturbations.

Ces deux phases s'appuient sur une projection dans le futur de l'impact et l'évolution des incidents, ainsi que de l'impact des décisions éventuelles sur le trafic du réseau.

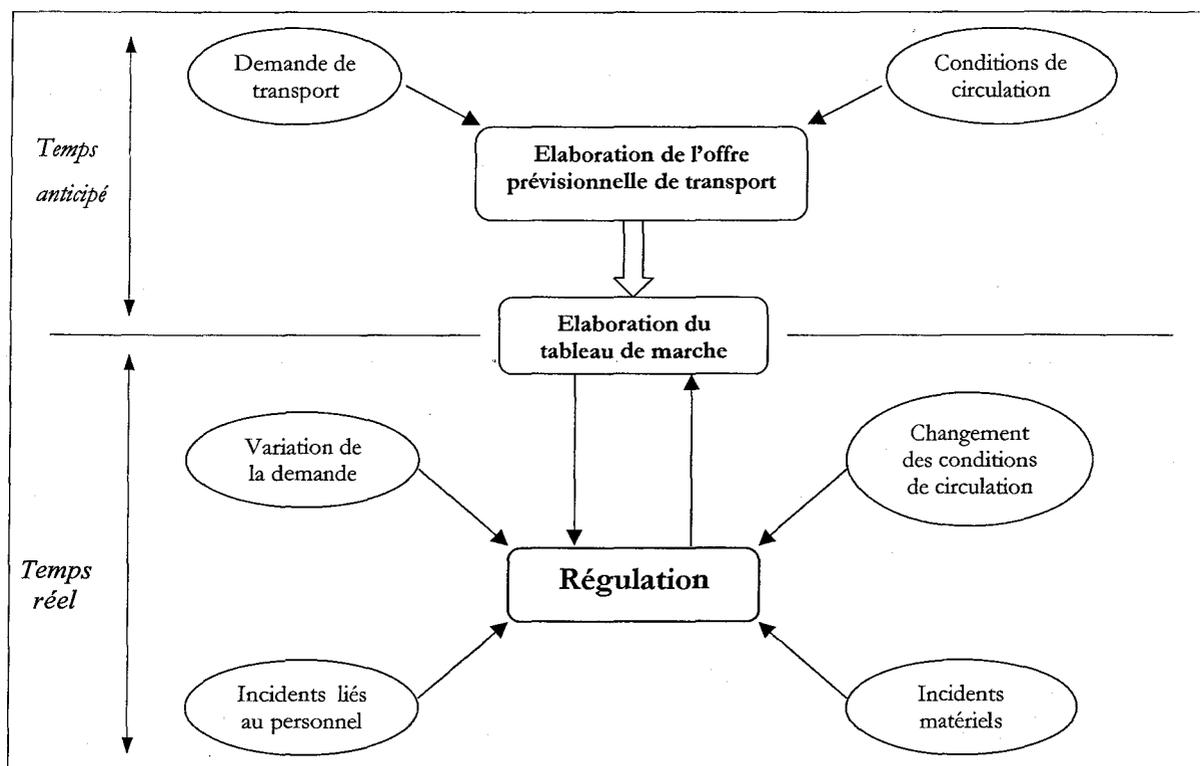


Figure I.5: Nécessité de la régulation du trafic d'un réseau de transport.

I.4.2. Phase de diagnostic

I.4.2.1. Système d'Aide à l'Exploitation

Dans le but de l'amélioration de la gestion des moyens de circulation, le Système d'Aide à l'Exploitation (SAE) a été conçu pour garantir au mieux le déroulement planifié de l'exploitation. Il doit permettre au régulateur d'avoir une vision plus détaillée et globale du réseau afin d'intervenir sur celui-ci pour rétablir, en cas de perturbation, la situation correspondant au tableau de marche théorique.

Le SAE traite deux types d'informations :

- des informations théoriques qui sont fournies par les graphiqueurs à travers le processus de planification
- des informations temps réel concernant l'état du réseau (la localisation des véhicules, leurs niveaux d'occupation, leurs itinéraires, leurs horaires de passage réels, la communication avec le chauffeur, etc.).

Ce système est alors nécessaire au processus de régulation puisqu'il permet la comparaison entre les informations théoriques et réelles. En effet, les régulateurs et les graphiqueurs peuvent effectuer, par le biais de l'interface du SAE, la mise à jour du TMT en différé, selon les différentes variations dans la circulation et dans la demande ainsi que la modification du TM en temps réel, en cas de perturbation, suivant les besoins du régulateur.

Ainsi, les fonctionnalités d'un SAE sont :

- saisie de la localisation permanente des véhicules (système GPS),
- saisie de l'occupation des véhicules,
- échange d'informations entre le poste central et les véhicules,
- garantie des correspondances,
- information des passagers sur l'exploitation en cours,
- influence sur les feux de signalisation routière,
- évaluations statistiques.

Ce système agit comme un médiateur entre les régulateurs, les conducteurs, les véhicules et les passagers. La figure I.6 illustre le fonctionnement du SAE de la Compagnie de Transport du Pays de Montbéliard (CTPM).

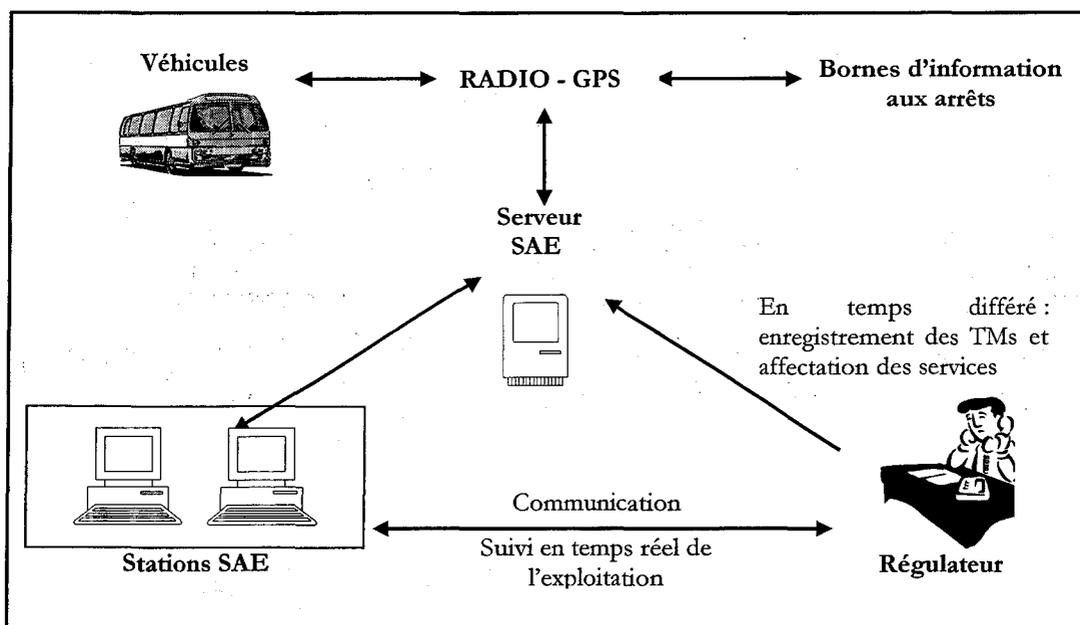


Figure I.6: Fonctionnement du Système d'Aide à l'Exploitation.

Suivant les spécifications des intervenants dans la régulation et selon l'écart qui existe entre le TM initial et les conditions réelles du réseau, le SAE peut déclencher plusieurs alarmes :

- alarme d'avance/retard,
- alarme de non respect des correspondances,
- alarme d'avance/retard en centre ville (lieux critiques, risque d'aggravation),
- alarme de train de véhicules,
- alarme de prochain départ non assuré.

Ainsi, l'objectif des premiers SAE est de proposer un traitement « primaire » des informations. Ils organisent le recueil des informations, génèrent quelques alarmes et donnent une meilleure connaissance du réseau pour une meilleure définition de l'offre de transport.

Les nouveaux SAE proposent une amélioration de la tâche des régulateurs en développant la notion d'interface intuitive. Les informations proposées sont présentées dans leur contexte (représentation du réseau, plan de la ville, ...) et apparaissent sur un écran. Le régulateur accède alors à toutes les informations concernant le réseau ou un des véhicules par un simple clic, ce qui lui facilite la tâche de résolution.

I.4.2.2. Perturbations

La détection des perturbations se fait alors à l'aide de l'interface du SAE. En fait, il y a plusieurs incidents qui peuvent perturber l'exploitation du transport collectif. Ils peuvent affecter les véhicules du réseau qui sont en circulation, le personnel du réseau, les passagers, le trafic routier global, etc. Les perturbations peuvent alors être classées selon leur origine. Le dysfonctionnement peut être dû à un problème externe ou interne. Le régulateur a certes plus d'impact sur les incidents d'origine externe et dont il ne maîtrise pas les causes que sur ceux d'origine interne. Les incidents d'origine externe sont généralement des incidents typiques.

Tout incident résulte en un ralentissement ou à un arrêt complet du véhicule. Ces incidents peuvent éventuellement servir à l'analyse afin d'améliorer l'organisation.

DES ORGANISATIONS
ARIS IX DAUPHINE
SPORT
utre
on

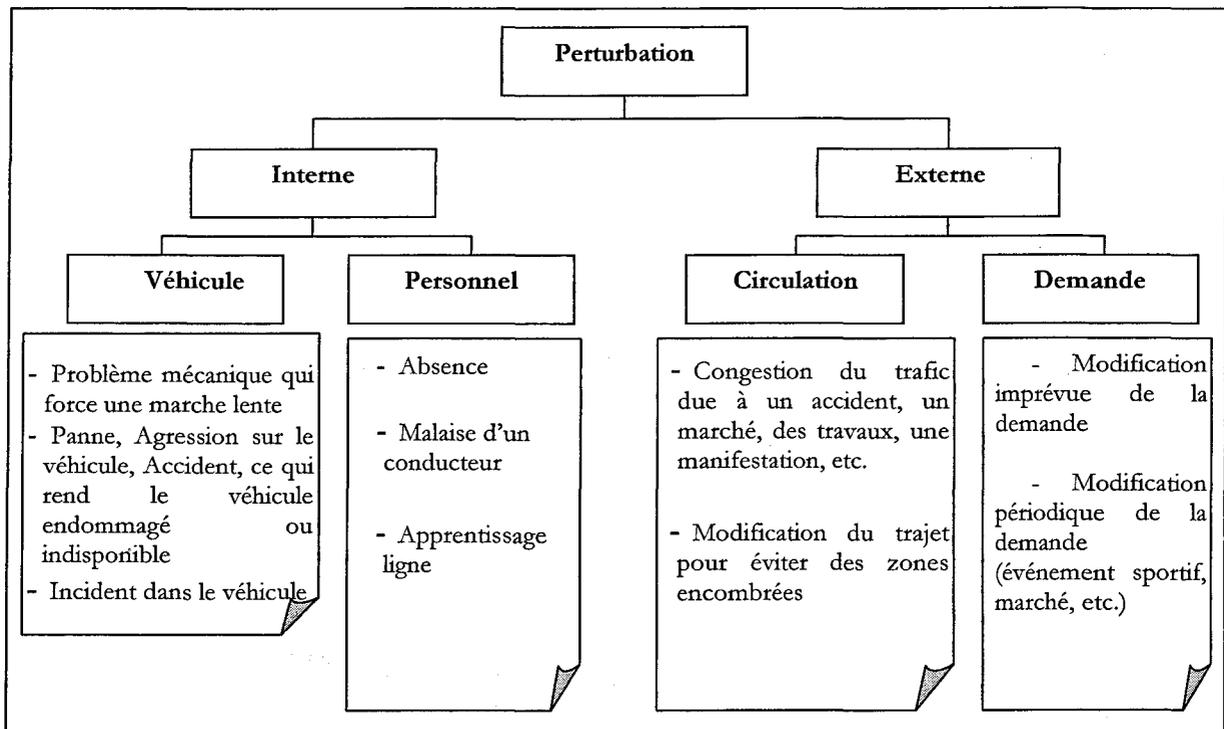


Figure I.7: Classification des incidents.

Ainsi, ces différentes perturbations engendrent des irrégularités qui se traduisent par, d'une part, le non-respect des horaires prévus ou des défauts de ponctualité et par, d'autre part, l'irrégularité des intervalles entre les véhicules ce qui conduit à l'apparition de trains de véhicules et aussi de lacunes. Par conséquent, la qualité de service offerte subit une détérioration à cause de l'accroissement des temps de déplacement en ligne, de l'inconfort issu d'une mauvaise répartition des charges entre les véhicules et surtout à cause du temps d'attente aux arrêts, d'où la nécessité d'une rapide prise en charge des incidents par le régulateur.

Le régulateur doit alors évaluer l'évolution de chaque perturbation selon le temps, l'espace et la nature de l'incident. Il doit aussi diagnostiquer la cause de chaque incident afin d'estimer sa liberté de manœuvre et son importance et d'anticiper ses conséquences.

I.4.3. Phase de décision

La régulation étant définie comme l'ensemble des mesures permettant de respecter non seulement le TMT en tant que table horaire, mais aussi les règles de gestion qui ont amené à la définition de celui-ci, nous présentons les différentes décisions possibles de régulation ainsi que les règles de gestion ou les critères considérés lors de ce processus.

I.4.3.1. Manœuvres de régulation

Il s'agit dans cette phase de proposer une solution en fonction de la nature de la perturbation. Les différentes manœuvres élémentaires peuvent être classées en trois groupes [Froloff, 89]:

- les manœuvres de régulation en terminus telles que la suppression ou l'insertion d'un départ,
- les manœuvres de régulation en ligne comme la modification du temps de parcours alloué ou l'attente à un point d'arrêt,
- et les manœuvres de régulation en terminus ou en ligne telles que le demi-tour.

La solution finale consiste alors en une procédure de régulation ou en une combinaison de différentes procédures. Ces dernières concernent [Caruso, 97] :

- Les voyageurs :
 - Parcours en descente : le véhicule ne prend plus les voyageurs en montée mais permet la descente.
 - Transbordement : l'ensemble des voyageurs d'un véhicule est transféré à bord d'un autre véhicule.
- Les véhicules :
 - Permutation de véhicules : les conducteurs échangent leurs véhicules..
 - Injection d'un véhicule en réserve : une nouvelle course est insérée dans le TMT et elle est effectuée par un véhicule qui est utilisé uniquement en cas de perturbation.
 - Parcours haut-le-pied : un véhicule réalise à vide une partie de la ligne afin de rejoindre un arrêt choisi par le régulateur.
- Les destinations :
 - Réaliser un demi-tour : le régulateur fait faire un demi-tour à un véhicule avant la fin de sa course.
 - Film blanc : il combine le parcours haut-le-pied et le parcours en descente. Le véhicule n'affiche pas sa destination afin de ne faire que des descentes puis à vide réalise un haut-le-pied.
 - Mise en place d'une déviation : afin d'éviter un problème, les véhicules sont détournés suivant un nouvel itinéraire.
 - Délestage : il consiste à mettre en déviation une partie des véhicules de la ligne.

- Les conducteurs :

- permutation de chauffeurs : il consiste à faire changer le conducteur d'un véhicule.

- L'horaire :

- Modifier les départs : le régulateur peut choisir d'avancer ou de reculer un départ.
- Modifier les temps de parcours : il s'agit d'accélérer ou de ralentir la progression d'un véhicule.

Il est évident que les manœuvres citées ne peuvent pas s'appliquer à tous les types de véhicules (métro, bus et tramway). Leur exécution dépend aussi des conditions réelles du trafic. Par exemple, un bus articulé ne peut pas effectuer de demi-tour en centre ville sans avoir un espace suffisant.

1.4.3.2. Critères d'amélioration de la qualité de service du point de vue de l'utilisateur

Il est nécessaire de noter d'abord la vision qu'a l'utilisateur du réseau de transport lors de son parcours face aux perturbations. Son jugement s'applique en fait au déplacement dans son entier. La qualité du déplacement est évaluée à partir de l'ensemble des caractéristiques de ce déplacement.

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

D'autre part, dans un réseau fortement maillé, le client se doit de rechercher le parcours optimal qui convient à ses objectifs de déplacement. Autrement dit, il doit identifier les lignes, trouver leurs intersections, évaluer le temps, chercher les bons horaires de correspondance et suivre en permanence la progression du déplacement. Ce raisonnement qui implique un accroissement de l'exigence de réflexion est perçu comme une contrainte supplémentaire pour l'utilisateur.

De plus, une survenue de stress chez le client est souvent provoquée à cause de la diminution du temps de repos dans le véhicule (situation assise) ou d'une correspondance manquée [Hayat & al, 97].

Ainsi, les usagers peuvent être sensibles à différents facteurs liés à la durée des déplacements, à la sécurité perçue, au confort psychologique (demande de considération, de prise en charge, de repérage et de quiétude), à la valorisation du temps, aux conditions matérielles de déplacement, à l'existence du service (accessibilité spatiale du système, disponibilité temporelle, conditions d'accès), à la prédictibilité des conditions de déplacement, à la maîtrise de la complexité du déplacement et finalement, aux coûts et tarifications [Kühn & al, 99].

I.4.3.3. Logiques de régulation

Afin de maximiser la satisfaction des clients, le régulateur doit envisager des mesures de régulation pour pallier aux perturbations sans pour autant négliger les objectifs et les intérêts de la compagnie de transport.

Il y a cependant une pluralité d'objectifs dans la régulation dont dépendent les décisions. Ces objectifs sont appelés logiques :

- *Logique d'enlèvement de la charge* : Elle est appliquée pendant les heures de pointe et aussi dans d'autres cas (sortie des écoles,...). Son objectif est d'enlever les voyageurs sans en laisser aux arrêts, en concentrant les moyens sur les points de montée les plus importants. La procédure de régulation qui est mise en œuvre dans le cadre de cette logique dépend ainsi de la configuration de la charge.
- *Logique de régularité* : Elle est envisagée lorsque l'arrivée des voyageurs est indépendante des passages des véhicules. Cette logique prévaut notamment dans les périodes de creux, ainsi qu'aux pointes pour les lignes où la charge est répartie sur plusieurs points d'arrêt. Du point de vue qualité de service, elle permet de minimiser l'attente des voyageurs aux arrêts et d'équilibrer les charges entre les véhicules pour maximiser ainsi le confort à bord de ceux-ci.
- *Logique de ponctualité* : Elle s'applique en premier lieu sur les lignes à horaires. Ainsi, l'arrivée des voyageurs aux points d'arrêt dépend des horaires programmés et annoncés au public. On trouve également cette logique sur l'ensemble du réseau dans le cas de départs à respecter impérativement, tels que les premiers et derniers départs.
- *Logique de correspondance* : Dans le cas d'existence d'échanges entre deux lignes du même réseau ou entre deux modes de transport différents, on envisage la logique de correspondance pour

assurer au mieux les correspondances en minimisant le temps de transfert des voyageurs en transit.

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

Ces logiques sont utilisées dans la création des TMT. Par exemple, on dit qu'une ligne est gérée en fréquence quand les intervalles de temps qui séparent deux passages successifs de véhicules à un même arrêt sont réguliers. Quand ces passages se font à des horaires précis, la ligne est gérée selon la logique de ponctualité.

Néanmoins, ces divers objectifs n'étant pas nécessairement contradictoires, ils peuvent être combinés afin d'avoir une régulation plus efficace. En effet, on pourrait, par exemple, envisager une régulation mixte d'intervalles et d'horaires qui s'exécute en terminus ou en ligne. La régulation peut être aussi [Cure, 84] :

- curative quand elle permet d'intervenir en amont du lieu où la perturbation est détectée (par exemple, pour éviter un train de bus, on agit sur les bus suivants le bus perturbé)
- préventive quand on intervient en amont et en aval (pour éviter les lacunes, on agit aussi sur les bus précédents).

Les paramètres qui pourraient donc être pris en compte dans ce processus concernent :

- les flux des passagers : nombre de passagers en station, nombre de passagers dans les véhicules ;
- les horaires : respect des horaires, régularité des intervalles, périodes de la journée ;
- les correspondances : respect des correspondances, durées des transferts aux nœuds, dernières correspondances ;
- le confort des passagers : sécurité des passagers aux stations et à bord des véhicules, confort des passagers, capacité des véhicules, équilibrage des charges, saison ;
- les ressources : véhicules en réserve, conducteurs disponibles.

Le régulateur doit ainsi prendre des mesures de régulation selon les différents critères correspondant à la situation perturbée et aussi selon les contraintes imposées (cf. II.4.3 et II.4.4). Par exemple, il doit minimiser les parcours à vide, le risque d'échec lié à une solution, les

répercussions sur les TMT et les heures supplémentaires, et respecter les conventions collectives (gestion du repos des chauffeurs).

Ayant choisi la solution adaptée à la perturbation, il doit assurer aussi le suivi de la procédure. En fait, les interventions de régulation consistent en la modification du TMT, en l'avertissement des chauffeurs concernés ainsi qu'en l'information de la clientèle.

I.4.3.4. Exemple de régulation

Selon une logique de régulation qui a pour but de minimiser l'attente des voyageurs au niveau des stations, nous présentons un exemple simple, dans figure I.8, qui illustre une régulation appliquée au réseau de transport parisien (RATP) [Rizzi, 88].

Dans le cas d'une ligne de bus gérée en fréquence, les intervalles de temps entre les différents véhicules doivent être réguliers. Dans ce but, les Bus 2 et 3 ont été retardés respectivement de 1 et 2 minutes afin de retrouver des intervalles égaux de 5 minutes.

Ces décisions de régulation correspondent à une modification des horaires de départ ou des temps de parcours pour équilibrer les charges des véhicules et garder une fréquence régulière de passage.

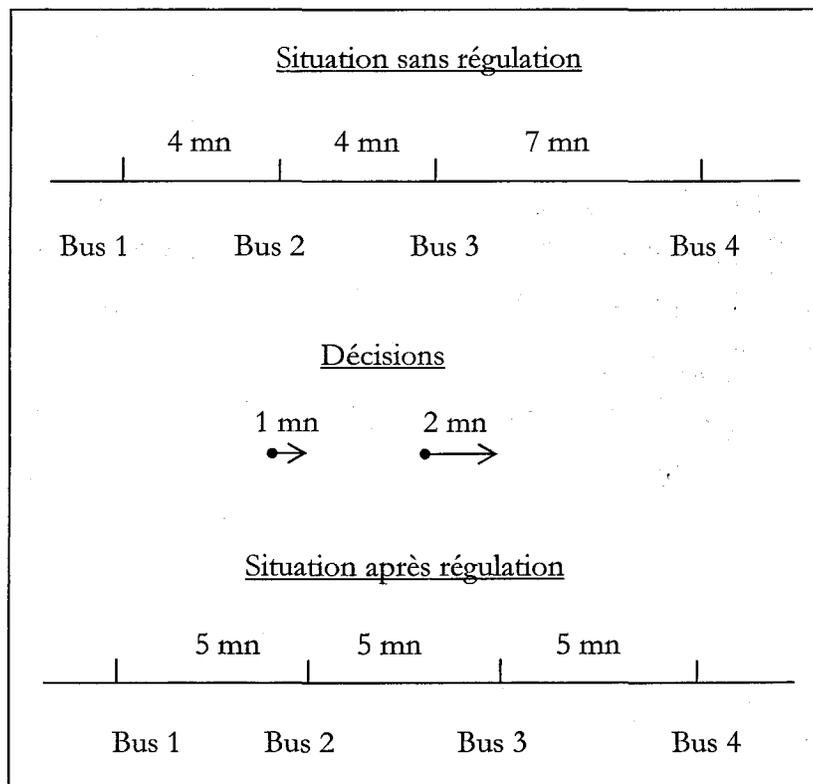


Figure I.8: Exemple de régulation.

I.5. Système d'aide à la décision

I.5.1. Nécessité d'un outil d'aide à la décision pour la régulation

Plusieurs questions liées à la nature des perturbations et aux manœuvres de régulation peuvent se poser lors de la gestion en temps réel du trafic d'un réseau de transport urbain : Comment et quand détecter une perturbation? Quel est son impact sur le réseau? Comment mesurer l'importance de l'incident? Nécessite-t-il une régulation? Si, oui, existe-t-il des mesures qui lui sont adaptées? Quelle mesure choisir? Selon quel(s) critère(s) faut-il faire ce choix? Et enfin, comment l'évaluer pour pouvoir décider?

Le régulateur doit constamment faire face à toutes ces questions en temps réel. Tout en étant submergé d'informations provenant du SAE, il doit prendre, en un temps limité, des décisions immédiates pour traiter les incidents qui peuvent aussi apparaître simultanément [Fayech & al, 02a].

De plus, malgré l'existence et l'aide du SAE, le régulateur passe plus de 50% de son temps à communiquer avec les chauffeurs des véhicules. Afin d'avoir une régulation efficace, il est tenu :

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

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

I.5.2. Les systèmes d'aide à la décision

Depuis les années 70, les technologies et les applications des systèmes d'aide à la décision ont évolué considérablement, grâce au développement technologique et organisationnel. Les SAD sont en fait des solutions informatiques qui sont utilisées pour aider à la prise de décision et à la

résolution de problèmes complexes [Shim & al, 02]. L'aide à la décision est l'étude de la manière dont les décisions sont actuellement prises, et de celle de les améliorer pour qu'elles puissent être prises avec plus de rigueur et d'efficacité.

Dans le processus de prise de décision qui est illustré par la figure I.9, le problème doit être d'abord détecté et identifié afin de permettre de le modéliser. L'étape de modélisation comprend :

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

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

[Carlsson & al, 02] montrent que la recherche liée aux SAD modernes se focalise sur la théorie et l'application des systèmes intelligents et du « soft computing » dans la gestion, la planification, l'ordonnancement et la résolution de problèmes diversifiés. Le contexte de cette recherche varie de la gestion financière, la gestion de la production et le marketing jusqu'au commerce électronique, les interfaces Homme-Machine et la gestion stratégique. Un dénominateur commun de divers domaines d'étude réside dans la conception et l'utilisation de systèmes intelligents (systèmes experts, multi-agent, etc.) et/ou de systèmes basés sur le « soft computing » (algorithmes évolutionnistes, logique floue, etc.).

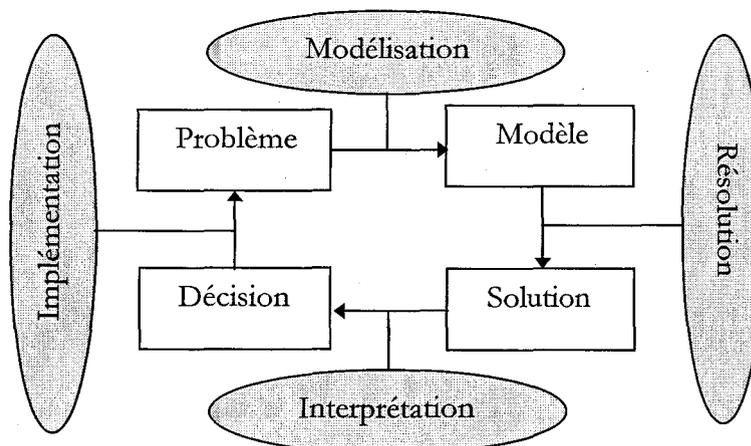


Figure I.9: Processus de décision.

Par ailleurs, dans le domaine de l'aide à la décision, les approches hybrides ont bien prouvé leur efficacité. A titre d'exemple, une approche hybride basée sur la logique floue et les algorithmes évolutionnistes exploite à la fois la capacité représentatives des connaissances de la logique floue et les capacités adaptatives des algorithmes évolutionnistes [Kacem & al, 02].

La qualité d'un SAD peut être mesurée suivant sa capacité à réduire la complexité et à avoir des techniques multi-modèles, plusieurs niveaux de coopération, un degré d'intelligence et aussi un degré d'autonomie. Par exemple, la coopération entre plusieurs méthodes de résolution permettent une meilleure flexibilité et une adaptation à des problèmes réels et variés [Borne & al, 02].

I.5.3. Rôle d'un SAD pour la régulation du trafic d'un réseau de transport urbain

Le processus de décision lié à la gestion en temps réel du trafic d'un réseau de transport urbain est présenté par la figure I.10 [Demmou, 98]. Un SAD pour la régulation doit alors être capable d'exécuter les différentes étapes de ce processus.

A partir de l'état réel du réseau, le SAD doit être capable non seulement de détecter les perturbations mais aussi d'anticiper, si possible, leur apparition afin de pouvoir intervenir avec des procédures préventives de régulation. La prédiction des perturbations permet de réagir à temps et de réduire leurs impacts sur le trafic. Aussi, le SAD peut diriger le régulateur vers les perturbations considérées les plus importantes dans le cas de l'apparition de plusieurs incidents simultanés [Fayech & al, 02a].

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

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

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

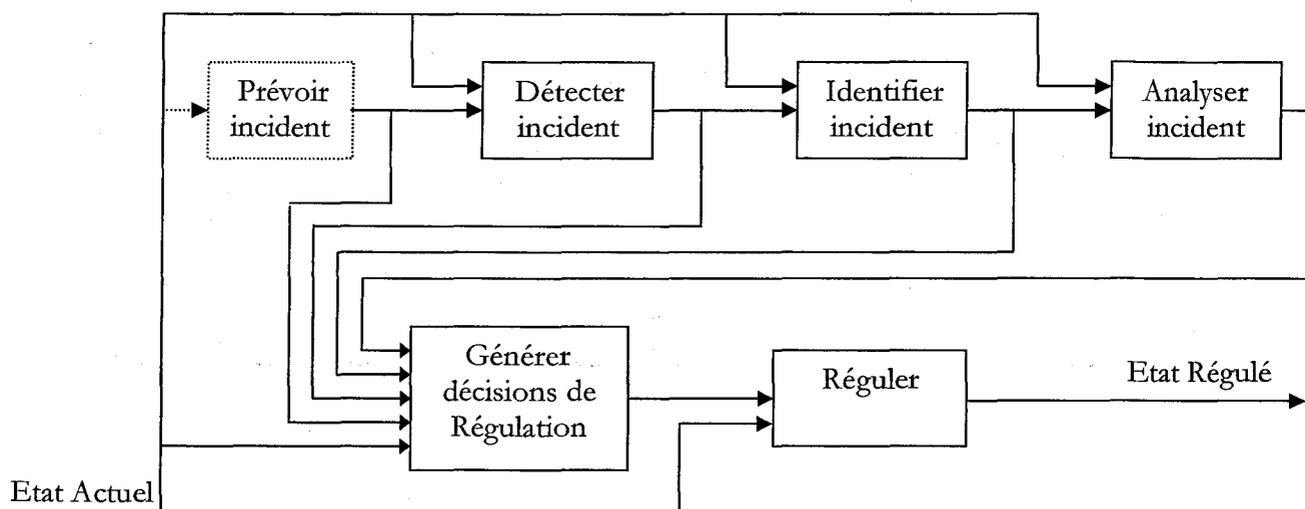


Figure I.10: Processus de contrôle en temps réel du trafic d'un réseau de transport urbain.

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

I.5.4. Outils existants pour la régulation

Différents outils d'aide à la décision pour la régulation des réseaux de transport urbain ont été élaborés pendant les deux dernières décennies. Ils se basent sur diverses approches de régulation. Quelques unes de ces dernières sont exposées ci-dessous.

I.5.4.1. Approche cinématique

Le principe de cette approche, conçue pour la régulation des rames de métro, consiste à évaluer l'état d'évolution du système de transport à tout instant, au moyen de données cinématiques telles que la position, la vitesse, l'accélération et le jerk de chaque véhicule. Ces différentes données sont liées par des équations différentielles. L'objectif est donc de maintenir par des actions appropriées, l'ensemble des valeurs réelles des paramètres cinématiques proches

des valeurs de référence établies pour un modèle de fonctionnement non perturbé. Autrement dit, il s'agit de minimiser :

- l'écart entre la position réelle et la position théorique des véhicules,
- l'écart entre leurs vitesses réelles et leurs vitesses théoriques,
- les irrégularités des intervalles entre les passages successifs des véhicules.

L'inconvénient de cette approche réside dans le coût élevé du système qui permet l'identification en temps réel pour chaque rame, en procédant à l'acquisition, au traitement et à la transmission des diverses informations [Chihai, 02].

I.5.4.2. Approche de séquentialisation temporelle

Cette approche s'appuie sur des modèles mathématiques linéaires ou non, caractérisant le transfert d'un véhicule ou d'une rame entre deux points d'arrêts successifs d'une ligne de transport en commun à haute densité. Deux types d'équations sont alors établis. Le premier concerne les écarts entre les instants de départ réels et théoriques de chaque véhicule à chaque arrêt. Le second est lié aux intervalles de temps séparant les départs de deux véhicules successifs à chaque arrêt. Les algorithmes de régulation relatifs aux modèles établis par cette approche sont ainsi fondés sur les différentes logiques évoquées précédemment.

La validité des résultats obtenus est extrêmement dépendante des différents paramètres estimés et la difficulté réside donc sur l'obtention d'estimateurs fiables. De plus, les perturbations ne peuvent être traitées qu'au niveau des arrêts, alors qu'une réaction au moment de leur détection serait plus efficace [Chihai, 02].

I.5.4.3. Autres approches

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

Les approches issues des concepts généraux du contrôle et de la commande en automatique sont théoriquement bien fondées et rigoureusement établies. Néanmoins, elles se basent sur des hypothèses de modélisation qui sont souvent simplificatrices et réductrices. De plus, elles concernent des régulations par simulation détaillée en station sans se soucier de l'état d'une rame ou d'un véhicule entre deux stations.

Dû à l'imperfection des données sur lesquelles la plupart des modèles mathématiques se basent, la logique floue [Bouchon, 95] a été introduite dans diverses approches de régulation [Chihaiïb, 02][Soulhi, 00][Bailly, 96]. [Chihaiïb, 02] s'appuie aussi sur un algorithme de propagation des contraintes pour la régulation du trafic d'un réseau multimodal.

Par ailleurs, la régulation est souvent considérée comme une planification en temps réel. Il s'agit alors d'un réordonnement des véhicules suivant les conditions réelles d'exploitation.

[Li & al, 91] ont développé un modèle de programmation linéaire stochastique pour la régulation d'une ligne de bus. Leur approche est basée sur la modification des courses affectées aux véhicules grâce à l'amélioration de scénarios archivés au préalable et déjà vécus, en tenant compte des flux des passagers. Par contre, elle ne traite pas le problème de la correspondance.

[Yan, 97] propose une heuristique fondée sur la relaxation de Lagrange afin de gérer le trafic aérien en cas de perturbations. Il présente une modélisation selon le temps et l'espace de l'ordonnement des avions sous la forme d'un graphe. Ce graphe montre le séquençement des tâches effectuées par les avions (en vol, à terre, etc.).

[Huissman & al, 01] a développé une approche d'ordonnement dynamique issue de la programmation dynamique avec relaxation. Son but est d'affecter les différentes courses aux véhicules pour un horizon fixé. La création des horaires se fait alors presque en temps réel si l'horizon est assez réduit. [Huissman & al, 01] considère d'abord le problème d'un ordonnancement statique, comme présenté dans l'exemple de la section I.3.2, qu'il généralise en un problème dynamique en changeant les paramètres du temps et de l'horizon. Aussi, il généralise le problème d'ordonnement à un seul dépôt à un problème multi-dépôt en itérant l'application de l'approche à chaque dépôt jusqu'à l'obtention de la solution optimale. Par ailleurs, le flux des passagers et les problèmes de correspondance ne sont pas considérés.

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

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

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

D'autres systèmes interactifs d'aide à la décision ont été développés pour permettre des simulations et des tests des différents paramètres de décision. Ils ne procurent que des résultats synthétiques qui doivent être analysés par le régulateur pour obtenir un diagnostic final.

I.6. Conclusion

Pour saisir le contexte de nos travaux, nous avons commencé dans ce chapitre par présenter les différentes problématiques liées aux réseaux multimodaux, pour ensuite nous intéresser aux processus de planification et de régulation. Hormis le fait que l'un se fait en un temps anticipé et que l'autre est exécuté en temps réel, ces deux processus se ressemblent beaucoup. D'ailleurs, plusieurs chercheurs traitent la régulation comme une «replanification» ou un «réordonnement».

Mis à part les inconvénients cités précédemment, les approches existantes de régulation ne traitent pas le cas multimodal des réseaux de transport public. La plupart d'entre elles limitent le degré d'intervention du régulateur et ne concernent pas la régulation dans le cas de l'apparition de plusieurs incidents en même temps. De plus, les correspondances sont souvent traitées par des approches spécifiques qui ne considèrent pas les autres critères de ponctualité et de régularité.

Par conséquent, nous nous sommes intéressés à la recherche d'un outil d'aide à la décision qui sert de serveur de propositions de régulation, mais qui effectue surtout les différentes étapes du processus en question tout en s'adaptant aux natures des incidents et aux divers critères appropriés. La conception de cet outil s'est appuyée sur la nature de l'environnement du transport.

En fait, le domaine de gestion d'un réseau de transport est caractérisé par sa nature distribuée et ouverte à cause de la répartition des véhicules et des capteurs et aussi de sa forte sensibilité et dépendance à des phénomènes extérieurs. Aussi, l'environnement du transport est dynamique et

incertain. Nous proposons donc un SAD basé sur une approche Agent, le Système Multi-Agent d'Aide à la Décision (SMAAD). L'avantage des agents est qu'ils explicitent le rôle des différents acteurs dans le processus, l'utilisation de l'information et la répartition du contrôle. Ils ont de plus un module de connaissance et de contrôle qui leur permet de vérifier la cohérence des informations qui constitue un problème en soi dans le domaine du transport.

En considérant les propriétés des SAD exposées dans la section I.5.2, et grâce aux caractéristiques des agents, nous démontrerons dans le chapitre III que le SMAAD possède un bon degré d'autonomie et d'intelligence et aussi un niveau élevé de coopération. D'autre part, nous avons choisi de traiter les incidents les plus importants par une approche évolutionniste, exposée dans le chapitre IV, puisque le processus de régulation constitue une problématique trop complexe pour être traitée par des approches classiques. Les critères et les contraintes qui lui sont liés sont formulés dans le chapitre suivant pour mieux saisir sa difficulté [Fayech & al, 02c].

Chapitre II : Nouvelle approche pour la modélisation et la caractérisation des réseaux de transport

II.1. Introduction

Le processus décisionnel lié à la régulation peut être considéré comme la résolution d'un problème d'optimisation. En effet, son objectif est de trouver des solutions qui maximisent la satisfaction des clients en réduisant leur temps d'attente et de parcours. Cependant, avant d'entreprendre une démarche d'optimisation, plusieurs efforts doivent être fournis quant à la formulation d'un modèle approprié et la génération d'une structure de données pour le calcul [Desrochers & al, 99]. Une modélisation du système est alors nécessaire pour faciliter les tâches décisionnelles.

Cette modélisation peut être construite en trois étapes dans lesquelles nous définissons :

- Les entités et les paramètres du système
- Les variables
- Les objectifs et les contraintes.

Dans la première étape de la modélisation, nous considérons les données liées au problème en question, telles que les flux des passagers, les arrêts, les lignes du réseau, les véhicules, les distances inter-arrêts, etc. Afin d'illustrer les différents déplacements des véhicules dans le processus de régulation, les réseaux de transport sont souvent modélisés par des graphes. Les représentations graphiques diffèrent cependant d'un modèle à un autre. Elles s'avèrent indispensables dans l'appréhension du comportement des entités formant le réseau et donc dans la prise de décision en cas de perturbation. Nous présentons ainsi dans la première partie de ce chapitre différentes modélisations basées sur les graphes qui ont été attribuées aux réseaux de transport.

Dans la deuxième section de ce chapitre, nous choisissons de construire un modèle qui représente au mieux la problématique de la régulation en tenant compte des différents déplacements possibles des véhicules.

Nous consacrons la dernière partie de ce chapitre aux deux autres étapes de la modélisation. La représentation mathématique du problème consiste en la formulation des variables de décision, des critères et des contraintes de la régulation.

II.2. Représentation des réseaux de transport

II.2.1. Modélisation des courses

En considérant le problème de régulation ou de planification comme un Problème d'Ordonnancement Multi-Dépôt des Véhicules (POMDV), une multitude d'approches s'appuie sur la notion de course. En effet, nous avons noté dans la section I.3.2 que chaque course peut être représentée par un nœud. Aussi, de manière plus détaillée, chaque course peut être illustrée par un nœud de début et un nœud de fin liés par au moins un arc [Desrochers & al, 99] [Huissman & al, 01] [Isaai & al, 00]. Les arcs représentent les contraintes de précédence qui peuvent lier les courses.

Il est à noter que [Haghani & al, 02] :

- chaque course est affectée à un seul véhicule;
- chaque chemin liant les nœuds d'origine et de fin d'un même dépôt représente un véhicule;
- chaque véhicule doit retourner au dépôt duquel il est sorti;
- chaque dépôt admet un nombre limite de véhicules.

La figure II.1 présente un exemple de représentation graphique d'un POMDV avec deux dépôts. Etant donné un instant T , l'aspect dynamique de ce problème consiste en la considération d'un ordonnancement pour la période $[T, T+\lambda)$. Les courses débutant avant T ont été déjà affectées à des véhicules, ce qui explique les différences avec la figure I.4 puisque certains choix ont été réalisés. Pour la période considérée, les décisions qui doivent être prises concernent l'affectation des courses 4 et 5. La course 4 ne peut évidemment être affectée qu'à un véhicule du dépôt 1.

En fait, nous rappelons d'abord qu'un arc (i,j) peut exister quand l'horaire de début de la course j vient après l'horaire de fin de i additionné à la durée, notée t , du trajet séparant la destination de i et l'origine de j . Aussi, pour que cet arc puisse correspondre à la période $[T, T+\lambda)$, il faut que l'horaire de début de la course j moins le temps de parcours t se trouve dans la période $[T, T+\lambda)$.

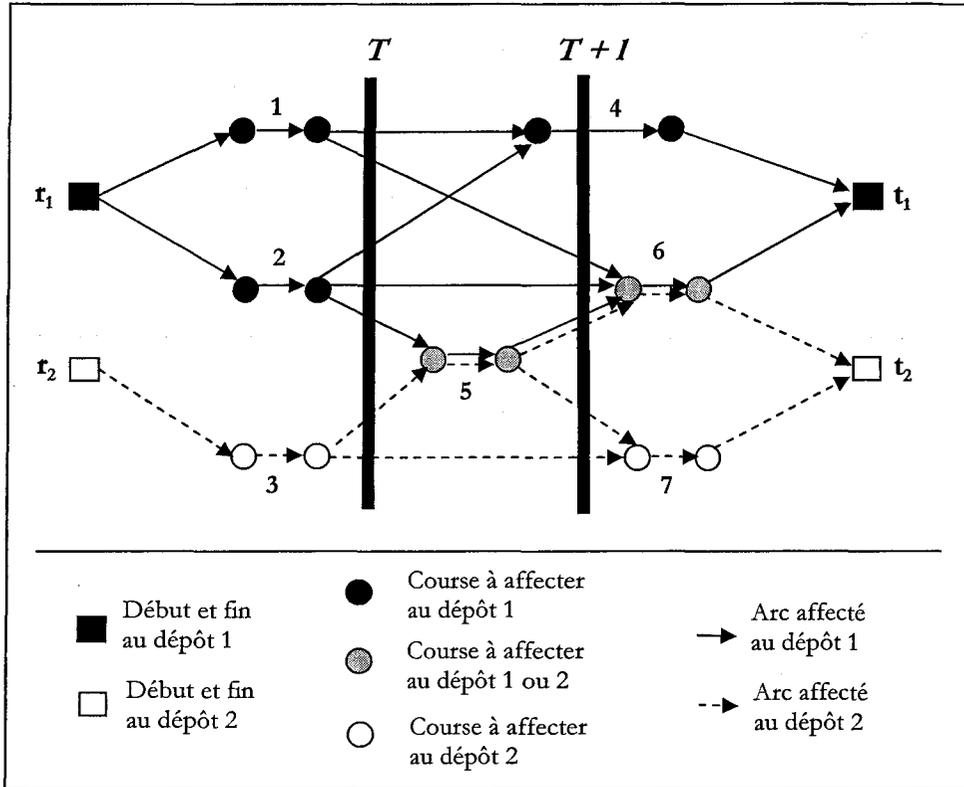


Figure II.1: Exemple de problème d'ordonnancement dynamique de véhicules à deux dépôts.

[Huissman & al, 01] présente une approche dynamique pour la résolution d'un POMDV.

Cette approche se base sur les deux hypothèses suivantes :

- Les temps de parcours sont connus pendant la période $[T, T+l)$.
- Il y a un ensemble S de scénarios qui définissent les temps de parcours pour la période après $T+l$. Chaque scénario s a une probabilité p^s d'occurrence.

Les variables de décision représentent alors :

- Le nombre, B^s , de bus impliqués dans chaque scénario s .
- Le choix d'un arc (i,j) dans la période $[T, T+l)$ associé à la variable binaire z_{ij} qui est égale à 0 ou 1.
- Le choix d'un arc (i,j) dans la période qui succède $T+l$ selon le scénario s associé à la variable binaire y_{ij}^s qui est égale à 0 ou 1.

La fonction objectif à optimiser, pour le cas d'un seul dépôt, tient compte des coûts c'_{ij} et c^s_{ij} associés respectivement au choix d'affectation de l'arc (i,j) dans la période $[T, T+l)$ et après $T+l$ selon le scénario s . Il s'agit alors de minimiser le nombre de véhicules et les coûts des retards. Autrement, dit :

$$\min c \sum_{s \in S} p^s B^s + \sum_{(i,j) \in A_1} c'_{ij} z_{ij} + \sum_{s \in S} p^s \sum_{(i,j) \in A_2} c^s_{ij} y^s_{ij} \quad (\text{II.1})$$

avec :

- c le coût fixe associé à un véhicule,
- A_1 l'ensemble des arcs qui pourraient correspondre à la période $[T, T+l)$,
- A_2 l'ensemble des arcs qui peuvent être affectés après $T+l$.

La modélisation par les courses est surtout appliquée aux problèmes de planification du trafic des réseaux de transport public. Elle est adaptée aux problèmes d'ordonnancement dynamique des véhicules grâce à la considération d'une « fenêtre temporelle » qui peut être réduite pour pouvoir fonctionner presque en temps réel. Le principal avantage de ce modèle est la réduction considérable de la taille du graphe grâce au raisonnement en terme de courses.

D'autre part, cette modélisation du réseau ne considère que la configuration horaire du réseau et ne tient pas compte des flux des voyageurs dans le choix et la modification des courses de chaque véhicule. Elle est en fait plus appropriée à un ordonnancement qui est réalisé pour une période assez large à l'échelle d'une journée, où les courses représentent par exemple le parcours d'une ligne entière du réseau (entre deux terminus). Elle est alors plus utile pour une régulation en terminus et non en ligne. En fait, le raisonnement en terme de courses ne profite pas de l'avantage de la flexibilité des itinéraires surtout dans le cas perturbé d'un réseau de bus.

II.2.2. Modélisation par les Réseaux de Pétri

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

Une fonction de marquage est associée à chaque RdP. Le marquage à un certain instant définit l'état du RdP, ou plus précisément l'état du système décrit par le RdP. L'évolution de l'état correspond donc à une évolution du marquage, évolution qui se produit par le franchissement de transitions. Ce dernier permet de passer d'un marquage à un autre par une règle très simple : une transition est validée si toutes ses places en entrée ont au moins un jeton, et le marquage résultant

est obtenu en retirant un jeton de chacune des places d'entrée et en ajoutant un jeton à chacune des places de sortie [Alla & al, 89].

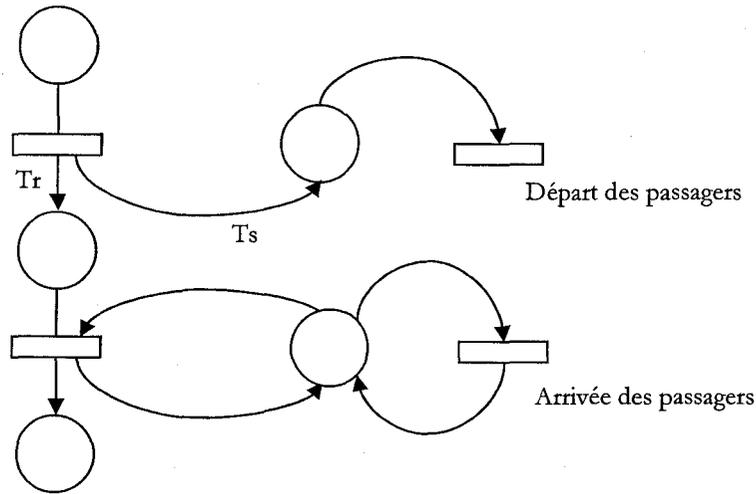
Bien que la notion de temps n'y intervienne pas explicitement, les RdP permettent d'appréhender et d'évaluer le comportement dynamique des systèmes. En fait, si on considère un réseau de Petri comme un modèle du comportement dynamique d'un système, les notions de séquentialité et de parallélisme par exemple induisent une dimension temporelle. Ils sont capables d'exprimer et de visualiser l'occurrence d'événements, la mise en parallèle et la synchronisation, le partage des ressources, le non déterminisme, etc. Plusieurs types de RdP ont été développés (stochastiques, synchronisés, colorés, etc.).

Dans le domaine du transport, les correspondances ont été également modélisées par les RdP stochastiques par [Abbas-Turki & al, 02]. [Nait-Sidi & al, 02] présente un modèle RdP pour la gestion des correspondances où les transitions représentent les arrêts de bus et les places représentent les déplacements inter-arrêts. Les temps d'attente sont calculés selon un modèle mathématique basé sur l'algèbre Max-Plus.

Les RdP ont été utilisés pour la modélisation du flux des voyageurs [Castelain & al, 02] [Ghaffari, 99]. Ils permettent d'avoir une simulation du comportement des systèmes de transport. [Castelain & al, 02] présente un modèle de RdP stochastique qui représente les lignes du réseau de transport par bus et aussi les passagers. La figure II.2 illustre l'interaction entre un bus et le flux de passagers à un arrêt.

La modélisation des réseaux de transport par les RdP stochastiques permet de représenter de façon intuitive et assez simple le mouvement des passagers dans les stations et l'interaction qui existe entre la variation du flux dans la station et le passage des rames. Il est possible aussi de voir sans difficulté parallèlement au véhicule, sa capacité courante mise à jour à chaque passage par une station. Mais, cette précision dans la modélisation se fait au dépend de la taille du modèle. On peut imaginer le nombre de places et de transitions qu'on va avoir à considérer rien que pour une seule ligne du réseau. S'agissant d'un réseau, le modèle serait tellement important en taille qu'il deviendrait ingérable.

Des modèles basés sur les RdP colorés ont été construits pour gagner plus de concision [Ghaffari, 99]. Cependant, l'étude analytique de ce type de modèle peut poser des problèmes puisqu'il se prête difficilement à l'analyse formelle. La mise en œuvre des RdP colorés est difficile malgré les outils spécifiques d'analyse qui ont été développés.



T_r : Taux de passagers qui restent dans le bus
 T_s : Taux de passagers qui descendent du bus

Figure II.2: Exemple de modélisation par les RdP d'un arrêt de bus.

II.2.3. Modélisation des débits

Pour le cas du transport multimodal incluant les voitures particulières, la modélisation du trafic nécessite la considération des flux sur les différents chemins. En effet, selon la demande décrite par les matrices Origine-Destination, l'approche présentée par [Wynter, 03] décrit les débits à affecter aux différents itinéraires du réseau routier suivant les critères représentant le coût des chemins (péage, billet pour transport en commun) ainsi que la durée des parcours.

La figure II.3 illustre un réseau routier qui comporte plusieurs itinéraires possibles. Chaque arc du graphe est décrit par son flot et son temps de parcours. L'épaisseur de l'arc représente l'importance du débit qui lui est affecté [Wynter, 03].

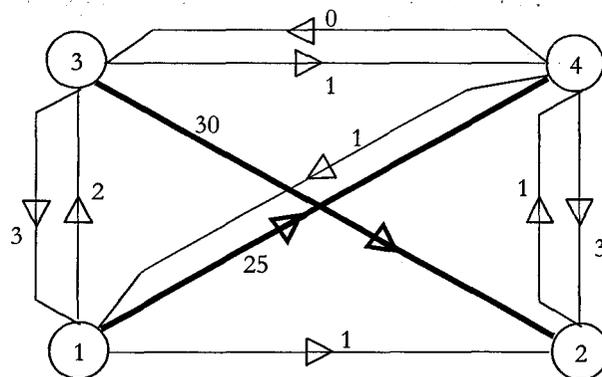


Figure II.3: Exemple de modélisation du trafic dans un réseau routier.

Les différents modes de transport (voitures, camions, bus, métro) peuvent être décrits par un modèle « multiclasse » où chaque arc représente une classe associée à un seul mode. Deux nœuds peuvent alors être liés par plusieurs arcs.

La difficulté réside dans la dépendance entre les temps de parcours et les flots sur les arcs. En effet, plus un itinéraire est emprunté par des véhicules, plus leur temps de parcours augmente jusqu'à la congestion. Le coût C_a^k associé à un arc a et à la classe k peut s'écrire de la manière suivante :

$$C_a^k(f_a) = p_a^k + v^k t_a^k(f_a) \quad (\text{II.2})$$

avec :

- f_a le flot sur l'arc a ,
- p_a^k le prix pour la classe k d'emprunter l'arc a ,
- v^k la valeur du temps de la classe k ,
- $t_a^k(f_a)$ le temps de parcours de la classe k sur l'arc a .

Cette modélisation est très répandue dans les problèmes de planification statique du trafic routier, notamment des réseaux multimodaux. Cependant, son adaptation à la régulation du trafic des réseaux de transport public n'a pas été développée.

II.2.4. Modélisation des itinéraires

La modélisation la plus répandue des réseaux de transport consiste en la représentation des différents itinéraires possibles que les véhicules peuvent emprunter. Les arrêts sont traduits par les nœuds et les déplacements par les arcs. Chaque arc est alors décrit par une distance. [Ngamchai & al, 00] présente, à travers la figure II.4, un exemple de réseau avec 13 nœuds et 13 arcs. Les nœuds grisés illustrent les nœuds de correspondance. Les itinéraires sont décrits par des séquences de nœuds. Ils sont aussi différenciés suivant le type de la ligne. En fait, chaque itinéraire, formulé par une séquence d'arrêts, est associé à un véhicule.

Le flux des passagers est également considéré à travers une matrice symétrique Origine-Destination illustrant la demande liée aux déplacements entre les différents points du réseau.

Le modèle présent est en fait conçu pour l'étude de trois composants importants dans la configuration des lignes de bus dans un réseau de transport public :

- la demande,

- la localisation des points de transfert ou de correspondance,
- le choix des itinéraires adéquats.

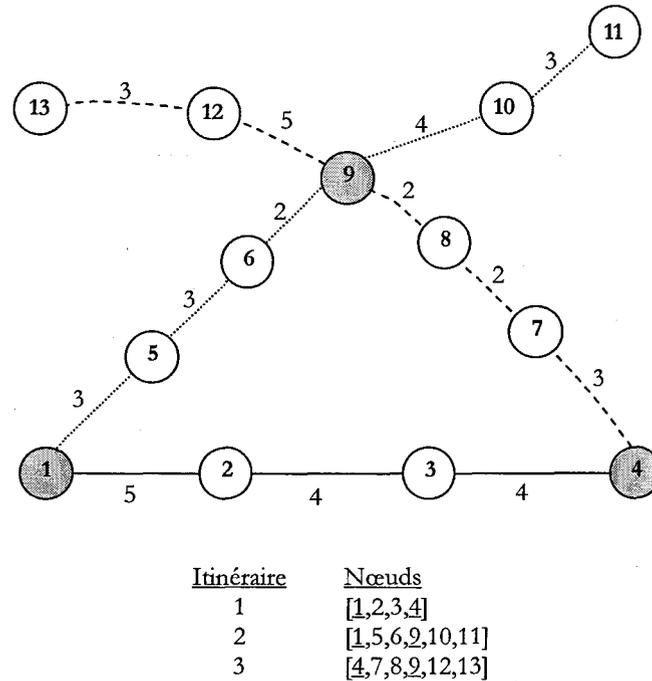


Figure II.4: Exemple de modélisation des itinéraires.

Le problème d'optimisation lié à ce modèle représente les coûts associés à :

- la gestion de la flotte des véhicules,
- l'occupation des véhicules par des passagers,
- l'attente des voyageurs aux arrêts.

Cette modélisation peut être adaptée au problème de la régulation puisqu'elle représente clairement la configuration spatiale du réseau et les déplacements des véhicules. Par ailleurs, la configuration horaire liée aux temps de départ et d'arrivées n'y est pas explicitée.

II.2.5. Modélisation Multi-Agent

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

des problèmes qui dépassent leurs capacités et connaissances individuelles. Dans ce but, ils communiquent entre eux et se partagent des connaissances [Jennings & al, 98].

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

Nous allons aborder ce type de modélisation dans le chapitre suivant avec de plus amples détails sur le fonctionnement des SMA et leur application à la problématique qui nous concerne.

II.2.6. Comparaison entre les modèles

Avant de s'intéresser aux apports des différents modèles exposés à la problématique de la régulation, il est nécessaire de souligner les paramètres nécessaires liés à un tel processus. En effet, la régulation peut se définir comme un processus qui fonctionne **en temps réel** afin de **contrôler** le trafic au sein d'un réseau de transport **multimodal** et satisfaire au mieux la **demande** en appliquant des décisions qui concernent principalement les **horaires** et les **itinéraires** des véhicules.

Nous décelons à partir de cette définition cinq principaux paramètres à considérer dans la construction d'un modèle pour la régulation des systèmes de transport multimodal :

- la multimodalité,
- la surveillance (détection des perturbations et diagnostic),
- la demande,
- les horaires,
- les itinéraires.

Nous notons que des aspects liés aux deux phases composant ce processus et rencontrés dans la section I.4 (diagnostic et décision) apparaissent parmi ces paramètres. Nous pouvons ajouter aussi l'aspect dynamique et adaptatif qui doit surgir d'une approche de régulation.

En s'appuyant sur ces différents paramètres, nous proposons dans le tableau II.1 une comparaison, basée sur les approches existantes, entre :

- les modèles représentant le Problème d'Ordonnancement Multi-Dépôts des Véhicules (POMDV) qui concerne l'affectation des courses aux véhicules et aux dépôts ;
- les modèles qui s'appuyant sur les réseaux de Pétri ;
- les modèles représentant le trafic routier par les débits ;
- les modèles représentant la configuration des itinéraires ;

- les modèles issus des Systèmes Multi-Agents.

Les travaux qui traitent le POMDV, bien que basés sur des approches dynamiques, ne considèrent pas les décisions qui peuvent être appliquées en ligne et non en terminus. Les RdP permettent de simuler le comportement dynamique des systèmes de transport, mais leur application à la régulation des réseaux multimodaux n'a pas encore été développée. De plus, la taille des modèles paraît assez importante dans la plupart des représentations et donc difficile à mettre en œuvre. D'autre part, la représentation du trafic routier est très intéressante quant à la présence des paramètres liés à la multimodalité, à la demande et aux itinéraires, mais la considération des horaires peut difficilement lui être adaptée. Les modèles consacrés à la configuration des déplacements représentent parfaitement les itinéraires du réseau, ainsi que la demande qui peut être associée aux arcs du graphe, mais les autres paramètres n'y figurent pas. Quant aux systèmes multi-agents (SMA), ils forment un outil de modélisation avancé pour le fonctionnement du réseau bien qu'ils n'aient pas été appliqués à la modélisation des paramètres liés à la demande et aux itinéraires.

Tableau II.1: Tableau comparatif entre les modèles existants des réseaux de transport.

| Paramètre | Multimodalité | Surveillance | Demande | Horaires | Itinéraires | Dynamique |
|-------------|---------------|--------------|---------|----------|-------------|-----------|
| POMDV | - | - | - | + | - | + |
| RdP | - | + | + | - | + | - |
| Trafic | + | - | + | - | + | - |
| Itinéraires | - | - | + | - | + | - |
| SMA | - | + | - | + | - | + |

Pour résumer, aucun modèle ne semble parfaitement adapté à la régulation des réseaux de transport multimodaux. Par conséquent, nous proposons une modélisation hybride afin de cerner les différents aspects de notre problématique. En effet, nous considérons que les décisions de régulation peuvent être réunies en la modification des trajets et horaires des véhicules, pour parler finalement d'une reconfiguration du réseau adaptée aux conditions réelles d'exploitation. C'est pourquoi nous estimons que les paramètres liés aux itinéraires et aux véhicules sont indispensables dans la construction d'un outil d'aide à la décision approprié. Par ailleurs, le

caractère distribué des réseaux de transport est aussi primordial et l'efficacité des SMA dans la modélisation de ce genre de système a déjà fait ses preuves. Nous suggérons donc d'hybrider une approche agent avec une modélisation des itinéraires par les graphes, tout en s'inspirant des atouts des autres modèles, afin d'appréhender au mieux le processus de régulation.

En effet, nous allons montrer dans le chapitre suivant l'importance des SMA dans la phase de diagnostic du processus de régulation et aussi dans la phase de décision. Le modèle représentatif des réseaux multimodaux qui s'appuie sur les graphes est représenté dans la section suivante.

II.3. Nouvelle Approche pour la modélisation

II.3.1. Présentation du modèle

Pour le processus de régulation, la phase de décision consiste en la recherche d'une solution qui résorbe les perturbations selon les objectifs d'exploitation. Les décisions concernent dans la plupart des cas les deux configurations principales représentant le réseau :

- configuration spatiale décrite par les arrêts,
- configuration horaire décrite par les véhicules.

Ainsi, un réseau de transport \mathcal{R} est en fait une union entre l'ensemble \mathcal{S} des stations qui le composent et l'ensemble \mathcal{V} des véhicules qui y circulent ; d'où, $\mathcal{R} = \{\mathcal{S} \cup \mathcal{V}\}$.

Nous pouvons alors représenter le réseau par un graphe $G^{\mathcal{R}}$ dont les sommets correspondent aux stations. Nous estimons que la représentation des itinéraires est indispensable dans la modélisation des réseaux de transport, car elle permet d'illustrer une majeure partie des différentes manœuvres de régulation. Aussi, si on considère les distances ou les temps de parcours, la configuration horaire du réseau peut être illustrée par les itinéraires en question. Les arêtes du graphe $G^{\mathcal{R}}$ correspondent alors aux déplacements possibles dans le réseau. Des distances leurs sont attribuées.

Par ailleurs, bien qu'il ne figure pas sur le graphe, le flux des voyageurs doit aussi être considéré afin d'optimiser l'attente des voyageurs et les durées de leurs parcours.

Notons l'ensemble des nœuds de $G^{\mathcal{R}}$ par $\mathcal{N}(G^{\mathcal{R}})$ et l'ensemble de ses arcs par $\mathcal{A}(G^{\mathcal{R}})$. On a donc $G^{\mathcal{R}} = (\mathcal{N}, \mathcal{A})$. On suppose que $|\mathcal{N}| = n$ et $|\mathcal{A}| = m$.

Définition II.1 : Les arêtes sont représentées par des couples de sommets. Par exemple, $(a, b) \in \mathcal{A}(G^{\mathcal{R}})$ si un arc existe entre le nœud a et le nœud b , donc si un chemin direct existe entre

les stations qui leur sont associées. On dit alors que les sommets a et b sont adjacents ou voisins.

II.3.2. Représentation de la multimodalité

En s'inspirant de la notion de « multiclasse » utilisée dans les problèmes d'affectation du trafic routier pour distinguer les modes de transport existants dans le réseau, nous illustrons les déplacements de ces derniers par des arrêtes de formes différentes. Cependant, la distinction entre les lignes et les sommets n'est pas nécessaire.

Nous pouvons alors séparer les arêtes selon le mode de transport. En supposant que \mathcal{R} comporte M modes, nous avons :

$$\mathcal{A}(G^{\mathcal{R}}) = \bigcup_{i=1..M} \mathcal{A}_i; \quad (\text{II.3})$$

où \mathcal{A}_i est l'ensemble des arcs associés aux déplacements des véhicules du mode i .

Propriété II.1 : Le graphe $G^{\mathcal{R}}$ représentant le réseau de transport multimodal \mathcal{R} est connexe.

En effet, dans un réseau de transport urbain, il existe toujours un chemin qui lie deux points du réseau. Cette propriété est en fait traduite par les correspondances.

La figure II.5 représente un exemple de graphe représentatif d'un réseau de transport comportant trois modes (métro, bus et tramway). Pour simplifier, les notations exactes des arrêts ainsi que les distances inter-station n'ont pas été illustrées.

Les différents liens entre les sommets peuvent aussi être représentés sous la forme d'une matrice d'adjacence. Une autre matrice indispensable pour ce type de représentation doit comporter les distances associées aux arcs. Cependant, en réalité, la distance entre deux arrêts peut être différente selon le sens du parcours. La matrice de distances peut être asymétrique. Nous pouvons alors représenter le modèle sous la forme d'un graphe orienté.

La figure II.6 présente une partie du graphe non orienté illustré par la figure précédente avec des arcs orientés pour d'une part montrer les possibilités de déplacement dans les différents sens et d'autre part distinguer les distances des parcours correspondants.

Le graphe orienté illustre aussi une forme de contraintes de précédence rencontrées dans les problèmes d'ordonnancement de la production. En effet, pour l'exemple présent, le métro doit passer par l'arrêt 4 avant de passer par 5 et il ne peut pas aller à la station 8 sans passer par 7.

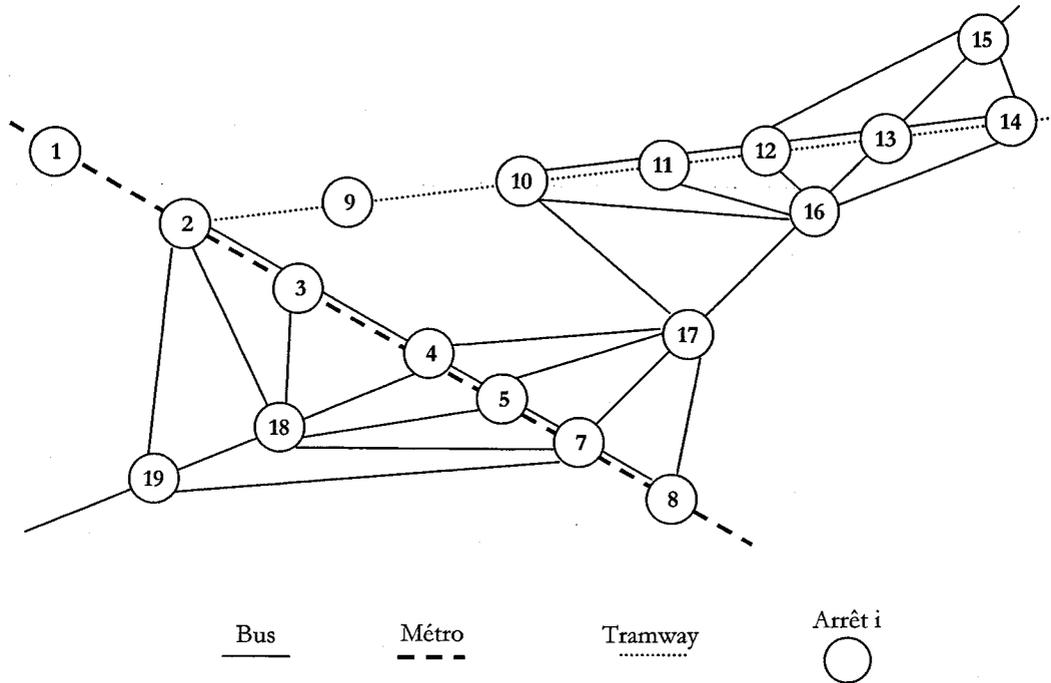


Figure II.5: Exemple d'un graphe représentant un réseau multimodal.

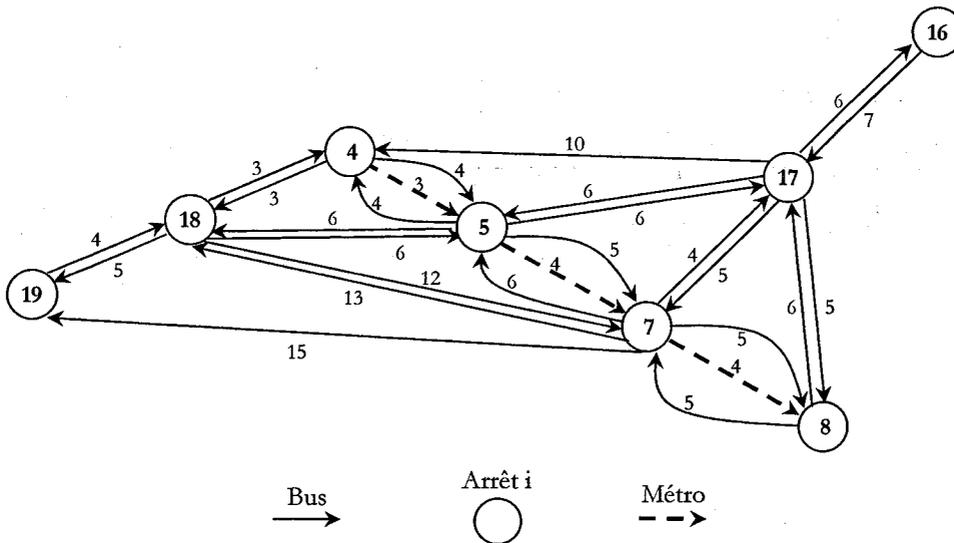


Figure II.6: Exemple de modélisation par un graphe orienté.

II.3.3. Représentation des itinéraires

L'itinéraire d'un véhicule correspond à une séquence de stations auxquelles il doit s'arrêter. La représentation des itinéraires s'appuie sur la notion de chemin pour les graphes orientés et de chaîne pour les graphes non orientés dans la théorie des graphes.

Définition II.2 : Un itinéraire entre deux sommets a et b de $\mathcal{N}(G^{\mathcal{R}})$ correspond à un chemin

$$C = (a, s_1, s_2, \dots, s_p, b)$$

- tel que :
- $s_i \in \mathcal{N}(G^{\mathcal{R}}), \forall i \in [1, p]$;
 - $(s_i, s_{i+1}) \in \mathcal{A}(G^{\mathcal{R}}), \forall i \in [1, p]$;
 - $(a, s_1) \in \mathcal{A}(G^{\mathcal{R}})$;
 - $(s_p, b) \in \mathcal{A}(G^{\mathcal{R}})$.

La longueur d'un chemin correspond à la somme des distances des arcs qui le composent. Cependant, dans le calcul du temps de parcours associé à un itinéraire, nous devons prendre en considération les temps d'arrêt des véhicules aux stations.

Les différentes lignes du réseau sont composées d'itinéraires. Une ligne peut par contre avoir différents itinéraires possibles qui sont suivis selon la demande associée. Par ailleurs, dans le processus de régulation, des décisions affectant l'itinéraire initial des véhicules peuvent être appliquée. La figure II.7 illustre un exemple de lignes correspondant à la configuration initiale du réseau.

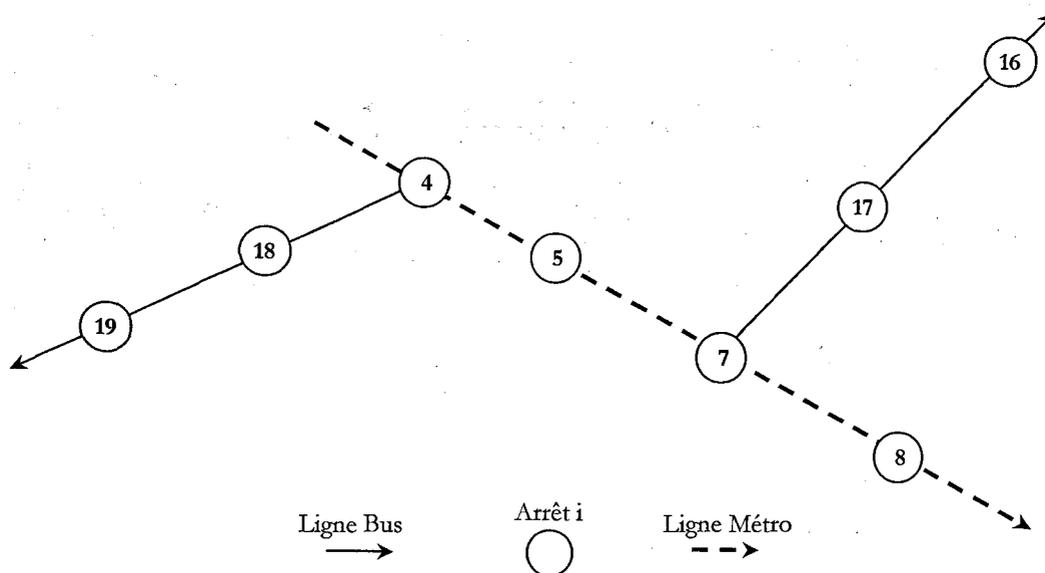


Figure II.7: Exemple de configuration des lignes du réseau.

II.4. Formulation mathématique

II.4.1. Horizon spatio-temporel

Puisque le processus de régulation n'opère qu'en mode perturbé, il est nécessaire de définir, à travers la phase de diagnostic, l'ensemble des entités du réseau qui sont liées à la ou aux perturbations considérées ou qui pourraient être impliquées dans la phase de décision. La définition d'un tel ensemble dépend de :

- l'instant de détection de l'incident t_{pert}
- la nature des perturbations,
- la position des différents véhicules dans le réseau à t_{pert}
- l'impact des incidents,
- la configuration du réseau,
- la nature des véhicules impliqués,
- la période de la journée, etc.

La recherche des entités du réseau qui sont impliquées dans la perturbation à traiter consiste à établir en fait l'horizon de la régulation correspondante selon :

- un axe spatial représenté par les arrêts intervenant dans la perturbation ou la régulation ;
- un axe temporel représenté par les véhicules intervenant dans la perturbation ou la régulation.

Nous illustrons l'ensemble des stations considérées par $S^{\mathcal{H}}$ et celui des véhicules par $\mathcal{V}^{\mathcal{H}}$. Nous représentons alors l'horizon de la régulation par :

$$\mathcal{H} = \{S^{\mathcal{H}} \cup \mathcal{V}^{\mathcal{H}}\}; \quad (\text{II.4})$$

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

Un arrêt est généralement identifié¹ par la ligne à laquelle il appartient. Nous notons donc la k -ème station de la ligne r par S_k^r . Il est à signaler que, même si en réalité un nom unique sert à désigner un arrêt dans deux sens différents, nous identifions un arrêt différent pour chaque sens.

De même, V_i^l représente le i -ème véhicule de la ligne l .

Posons alors $G^{\mathcal{R} \bullet \mathcal{H}}$ le graphe correspondant à la partie de \mathcal{R} qui appartient à l'horizon \mathcal{H} .

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

Définition II.3 : $G^{\mathcal{R} \bullet \mathcal{H}} = (\mathcal{N}^{\mathcal{H}}, \mathcal{A}^{\mathcal{H}})$ est le graphe de \mathcal{R} par rapport à l'horizon $\mathcal{H} = \{S^{\mathcal{H}} \cup \mathcal{V}^{\mathcal{H}}\}$ quand $\mathcal{N}(G^{\mathcal{R} \bullet \mathcal{H}})$ est associé à $S^{\mathcal{H}}$ et $\mathcal{A}(G^{\mathcal{R} \bullet \mathcal{H}})$ est associé aux déplacements des véhicules de $\mathcal{V}^{\mathcal{H}}$. Par conséquent, $\mathcal{N}^{\mathcal{H}} = \mathcal{N}(G^{\mathcal{R} \bullet \mathcal{H}}) \subset \mathcal{N}(G^{\mathcal{R}})$ et $\mathcal{A}^{\mathcal{H}} = \mathcal{A}(G^{\mathcal{R} \bullet \mathcal{H}}) \subset \mathcal{A}(G^{\mathcal{R}})$.

Notons $|\mathcal{N}^{\mathcal{H}}| = n^{\mathcal{H}}$ et $|\mathcal{A}^{\mathcal{H}}| = m^{\mathcal{H}}$.

Les décisions de régulation concernent alors tout véhicule $V_i^l \in \mathcal{V}^{\mathcal{H}}$ et toute station $S_k^r \in S^{\mathcal{H}}$. La construction de l'horizon sera abordée dans le chapitre III (cf. III.4.2.4). Nous y verrons aussi comment choisir des véhicules et des stations sur lesquels aucune décision n'est autorisée puisqu'ils ne servent que pour le calcul des critères.

II.4.2. Variables de décision

Il est important de redéfinir les trajets des différents véhicules impliqués dans la perturbation à résoudre. Il s'agit alors de répondre, pour chaque véhicule, aux questions suivantes :

- A quelles stations faut-il s'arrêter ?
- Quel est l'ordre de passage ?
- A quels horaires ?

II.4.2.1. Affectation des noeuds et des arcs

Il s'agit de décider de l'itinéraire à suivre pour chaque véhicule. Les premières variables de décision concernent donc :

- l'affectation des noeuds du graphe,
- l'affectation des arcs du graphe.

L'affectation des noeuds se traduit par le choix des stations par lesquelles les véhicules vont passer. Nous décrivons ce choix par la variable de passage, a_{ij}^{lm} , associée au véhicule V_i^l et à l'arrêt S_j^m . La variable a_{ij}^{lm} est égale à 1 si le véhicule V_i^l passe par S_j^m et à 0 sinon.

L'affectation des arcs concerne le choix de l'ordre de passage des véhicules aux arrêts. Nous définissons alors la variable de destination, x_{ijk}^{lmr} , pour V_i^l et l'arc entre S_j^m et S_k^r . On a donc x_{ijk}^{lmr} qui est égale à 1 quand V_i^l va directement de S_j^m à S_k^r et à 0 sinon.

II.4.2.2. Affectation des horaires

a- Les horaires de passage

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

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

b- Modification des durées de parcours

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

Cette variable de décision est exprimée en minutes ou en nombre d'intervalles d'un nombre fixé de secondes ; elle est :

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

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

$$-\delta_{min}^l \leq \delta_{ijk}^{lmr} \leq \delta_{max}^l \quad (\text{II.5})$$

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

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

c- Modification des temps d'arrêt

Il est nécessaire de considérer aussi les durées des arrêts des véhicules aux différentes stations. La modification de ces durées se traduit par la variable ε_{ij}^{lm} qui illustre le temps supplémentaire de stationnement, exprimé en minutes ou en nombre d'intervalles d'un nombre fixé de secondes, imposé au véhicule V_i^l à l'arrêt S_j^m .

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

$$0 \leq \varepsilon_{ij}^{lm} \leq \varepsilon_{max}. \quad (II.6)$$

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

[Li & al, 91] propose le calcul de la durée d'arrêt des bus à travers l'expression suivante :

$$ts_{ij}^{lm} = t_{mont} N_{mont_{ij}^{lm}} + t_{desc} N_{desc_{ij}^{lm}} \quad (II.7)$$

avec :

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

Cependant, étant donné que la plupart des bus des réseaux de transport collectif, possèdent au moins deux portes, une pour la montée et une autre pour la descente, l'expression II.7 est applicable seulement pour le cas des métros et tramways. Pour le cas des bus, la durée des arrêts est représentée alors par le maximum entre la durée de la montée et la celle de la descente tel que c'est formulé dans l'expression suivante.

$$ts_{ij}^{lm} = MAX(t_{mont} N_{mont_{ij}^{lm}}, t_{desc} N_{desc_{ij}^{lm}}) \quad (II.8)$$

Par ailleurs, les temps initiaux d'arrêt aux différentes stations sont, en général, fixés par les Tableaux de Marches Théoriques selon la nature du véhicule, de la course et de l'arrêt

(correspondance, relève, terminus, repos, etc.). Nous pouvons aussi autoriser des valeurs négatives aux ε_{ij}^{lm} afin de réduire les temps de repos ou d'attente dans les cas perturbés.

d- Relation entre les variables de décision

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

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

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

$$td_{ij}^{lm} = ta_{ij}^{lm} + a_{ij}^{lm} \times (ts_{ij}^{lm} + \varepsilon_{ij}^{lm}). \quad (\text{II.9})$$

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

L'horaire d'arrivée de V_i^l à la station S_j^m est explicité dans (II.10) par la somme de :

- l'horaire de départ de la dernière station desservie avant S_j^m , notée $Arrêt_Prec(V_i^l, S_j^m)$,
- la durée normale de parcours, t_{ikj}^{lrm} , correspondant aux conditions réelles d'exploitation, entre S_k^r et S_j^m (cette durée est associée à l'arc liant les deux stations dans le graphe $G^{\mathcal{R} \cdot \mathcal{H}}$),
- la modification apportée à cette durée.

$$ta_{ij}^{lm} = td_{ik}^{lr} + x_{ikj}^{lrm} \times (t_{ikj}^{lrm} + \delta_{ikj}^{lrm}), \quad (\text{II.10})$$

avec $S_k^r = Arrêt_Prec(V_i^l, S_j^m)$.

II.4.3. Les critères

Suivant les logiques de régulation rencontrées dans la partie I.4.3.3, nous avons choisi d'envisager les critères suivants dans la présente problématique :

- la régularité,
- la correspondance,
- la ponctualité.

Ces trois critères englobent en effet les plus importantes fonctions à optimiser dans la résolution des perturbations : l'attente des voyageurs, la durée des correspondances et la durée des trajets dans le réseau.

Pour simplifier la résolution du problème, le calcul de ces fonctions qui sont relatives à ces trois critères repose sur deux importantes hypothèses :

Hypothèse II.1 : Les clients qui entrent dans le réseau doivent attendre jusqu'à ce qu'ils prennent au moins un véhicule. Aucun voyageur ne quitte le réseau sans être monté à bord d'un véhicule.

Hypothèse II.2 : Le flux de passagers et leurs destinations sont supposés connus à travers une enquête sur les origines et les destinations des voyageurs et ils sont indépendants des décisions prises en temps réel.

II.4.3.1. Critère de régularité

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

Remarque II.1 : L'attente considérée dans ce critère ne concerne que les voyageurs qui sont venus « à pied » aux arrêts. Autrement dit, nous ne traitons pas dans ce critère l'attente des passagers qui sont descendus d'autres véhicules afin d'effectuer des correspondances. Il s'agit alors des voyageurs qui ne sont pas en transfert dans le réseau.

a- Calcul de l'attente à un arrêt

Le calcul de l'attente des voyageurs à une station $S_j^m \in \mathcal{S}^H$ dépend :

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

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

$$\Delta t = ta_{i'j}^{l'm} - td_{ij}^{lm}. \quad (\text{II.11})$$

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

Considérons la distribution des arrivées des voyageurs, $\mu_{S_j^m}(t)$, à l'arrêt S_j^m . Nous pouvons alors calculer, selon la figure II.8, l'attente des passagers pendant Δt [Aloulou, 99][Rizzi, 88] :

$$\text{attente}(\Delta t, S_j^m) = \int_0^{\Delta t} \mu_{S_j^m}(t) (\Delta t - t) dt. \quad (\text{II.12})$$

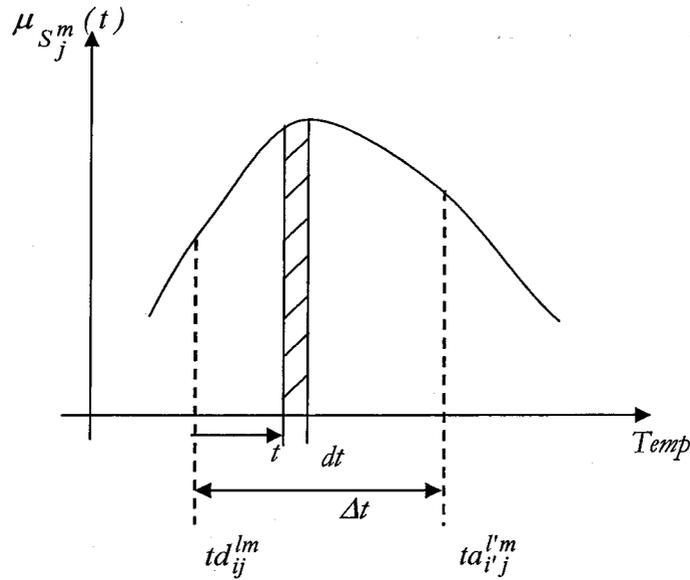


Figure II.8: Distribution des arrivées de passagers à un arrêt.

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

$\mu_{S_j^m} \times \Delta t$ et l'attente moyenne devient alors le flux multiplié par $\Delta t^2/2$:

$$\text{attente}(\Delta t, S_j^m) = \mu_{S_j^m} \times \frac{\Delta t^2}{2}. \quad (\text{II.13})$$

Toutefois, dans le cas d'un intervalle plus large n'appartenant pas à une période homogène, il peut être divisé en plusieurs intervalles réduits afin de pouvoir simplifier le calcul de l'attente des voyageurs. En effet, en supposant que Δt est échantillonné en IN intervalles, $\Delta t = \bigcup_{I=1..IN} \Delta t_I$, le

nombre de personnes arrivant à S_j^m dans l'intervalle Δt_I avec un taux d'arrivée de μ_I est de $\mu_I \times \Delta t_I$. Leur durée moyenne d'attente est alors :

$$attente(\Delta t_I, S_j^m) = \mu_I \times \Delta t_I \times \left(\frac{\Delta t_I}{2} + \sum_{I'=I+1}^{IN} \Delta t_{I'} \right). \quad (\text{II.14})$$

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

Nous pouvons ainsi recalculer l'attente moyenne pendant Δt à l'arrêt S_j^m :

$$attente(\Delta t, S_j^m) = \sum_{I=1}^{IN} \mu_I \times \Delta t_I \times \left(\frac{\Delta t_I}{2} + \sum_{I'=I+1}^{IN} \Delta t_{I'} \right). \quad (\text{II.15})$$

b- Calcul de l'attente totale sur \mathcal{H}

Afin de calculer la charge des véhicules, il est nécessaire d'estimer le nombre de montées et de descentes pour chaque véhicule à chaque station. Dans ce but, le calcul de l'attente des voyageurs à une station n'est plus fondé sur le flux total d'arrivée mais sur les flux spécifiés selon les destinations des passagers. Selon l'hypothèse II.2, ces flux peuvent être déterminés à partir des matrices Origine-Destination et définissent le taux d'arrivée des personnes à un arrêt donné et à destination d'une autre station.

A l'arrêt S_j^m , supposons que V_i^l part à td_{ij}^{lm} et que l'arrêt S_k^r se trouve sur sa route. Notons alors $Veh^+(V_i^l, S_j^m, S_k^r)$ le premier véhicule qui succède à V_i^l à S_j^m et qui passe également par S_k^r après S_j^m (mais pas nécessairement immédiatement après).

Propriété II.2 : Si $V_{i'}^{l'} = Veh^+(V_i^l, S_j^m, S_k^r)$ alors,

- (i) $a_{ij}^{lm} = a_{i'j}^{l'm} = a_{ik}^{lr} = a_{i'k}^{l'r} = 1$
- (ii) $ta_{i'j}^{l'm} > td_{ij}^{lm}$
- (iii) $ta_{i'k}^{l'r} > td_{i'j}^{l'm}$ et $ta_{ik}^{lr} > td_{ij}^{lm}$
- (iv) $\forall V_{i''}^{l''} \in \mathcal{V}^{\mathcal{H}}$ tel que $V_{i''}^{l''} \neq V_{i'}^{l'}$ et $V_{i''}^{l''}$ vérifie (i), (ii) et (iii), $ta_{i''j}^{l''m} > td_{i'j}^{l'm}$

Ainsi, dans la propriété II.2, le premier point vérifie le passage de V_i^l et de $V_{i'}^{l'}$ par S_j^m et S_k^r . Le point (ii) illustre l'ordre de passage des deux véhicules à la station S_j^m pour que $V_{i'}^{l'}$ succède à V_i^l . De même, le point (iii) montre que les véhicules doivent absolument passer par S_j^m avant S_k^r . Finalement, le dernier point stipule que $V_{i'}^{l'}$ est le premier successeur qui vérifie les trois autres points.

Posons $\mu(\Delta t_I, S_j^m, S_k^r)$ le taux constant d'arrivée pendant Δt_I à la station $S_j^m \in \mathcal{S}^H$ et en destination de $S_k^r \in \mathcal{S}$.

Remarque II.2 : Pour les passagers qui montent à S_j^m et qui vont effectuer une correspondance à une autre station située sur la route de V_i^l , nous considérons comme leur destination immédiate, le nœud de correspondance qui est associé à leur trajet.

En se basant sur l'expression (II.15) et en ayant $V_{i'}^{l'} = Veh^+(V_i^l, S_j^m, S_k^r)$, nous pouvons maintenant formuler l'attente, à l'arrêt S_j^m , des voyageurs allant à S_k^r pendant l'intervalle Δt qui sépare le passage successif des deux véhicules, V_i^l et $V_{i'}^{l'}$, sous la forme suivante :

$$attente(\Delta t, S_j^m, S_k^r) = \sum_{I=1}^{IN} \mu(\Delta t_I, S_j^m, S_k^r) \times \Delta t_I \times \left(\frac{\Delta t_I}{2} + \sum_{I'=I+1}^{IN} \Delta t_{I'} \right) \quad (\text{II.16})$$

Nous pouvons à ce stade calculer aussi le nombre de personnes, $N_{i'jk}^{l'mr}$, qui montent à bord de $V_{i'}^{l'}$ à S_j^m et qui ont S_k^r pour destination. En effet, ce nombre est égal à celui des personnes qui attendent $V_{i'}^{l'}$ pendant l'intervalle Δt .

$$N_{i'jk}^{l'mr} = \sum_{I=1}^{IN} \mu(\Delta t_I, S_j^m, S_k^r) \times \Delta t_I. \quad (\text{II.17})$$

Avant de calculer l'attente totale, nous supposons que pour chaque véhicule V_i^l passant par S_j^m , l'expression $S_k^r > S_j^m$ représente les arrêts $S_k^r \in \mathcal{S}$ inclus dans sa route après S_j^m . La durée de l'attente de tous les passagers à S_j^m est alors la somme des attentes pour tous les véhicules V_i^l qui y passent ($a_{ij}^{lm} = 1$), comme décrit ci-dessous :

$$attente(S_j^m) = \sum_{V_i^l \in \mathcal{V}^H} (a_{ij}^{lm} \times \sum_{S_k^r > S_j^m} attente(ta_{i'j}^{l'm} - td_{ij}^{lm}, S_j^m, S_k^r)). \quad (\text{II.18})$$

Avec $\forall V_i^l \in \mathcal{V}^H, V_{i'}^{l'} = Veh^+(V_i^l, S_j^m, S_k^r)$.

Finalement, puisque le critère de régularité est relatif à l'attente totale, AT , des passagers aux arrêts dans l'horizon de la régulation, cette dernière est formulée alors dans (II.19a) et (II.19b) en sommant les temps d'attente aux différentes stations concernées.

$$AT = \sum_{S_j^m \in \mathcal{S}^H} attente(S_j^m) \quad (\text{II.19a})$$

$$AT = \sum_{S_j^m \in \mathcal{S}^H} \sum_{V_i^l \in \mathcal{V}^H} (a_{ij}^{lm} \times \sum_{S_k^r > S_j^m} attente(ta_{i'j}^{l'm} - td_{ij}^{lm}, S_j^m, S_k^r)) \quad (\text{II.19b})$$

Avec $\forall V_i^l \in \mathcal{V}^H, V_{i'}^{l'} = Veh^+(V_i^l, S_j^m, S_k^r)$.

II.4.3.2. Critère de correspondance

Le critère de correspondance est associé à la durée des transferts entre les véhicules à un pôle d'échange. Il s'agit alors de calculer la durée des correspondances dans l'horizon \mathcal{H} .

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

Propriété II.3 : $\forall V_i^l, V_{i'}^{l'} \in \mathcal{V}^H$, si au moins un des véhicules ne passe pas par S_j^m , alors aucune correspondance n'est possible entre eux. Autrement dit, si $(a_{ij}^{lm} = 0)$ ou $(a_{i'j}^{l'm} = 0)$, alors, $(y_{i'j}^{l'm} = 0)$ et $(y_{i'j}^{l'm} = 0)$.

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

$$\omega_{ii'j}^{l'm} = \rho_{ii'j}^{l'm} \times Ndesc_{ij}^{lm} \quad (\text{II.20})$$

Le calcul du nombre de personnes descendant de V_i^l à S_j^m , $Ndesc_{ij}^{lm}$, est présenté dans la section suivante, II.4.3.3.

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

$$TT = \sum_{V_i^l \in V^H} \sum_{V_{i'}^{l'} \in V^H} \sum_{S_j^m \in S^H} y_{ii'j}^{l'm} \times \omega_{ii'j}^{l'm} \times (td_{i'j}^{l'm} - ta_{ij}^{lm}). \quad (\text{II.21})$$

II.4.3.3. Critère de ponctualité

Le critère de la ponctualité est associé au respect des horaires de passage et donc des durées de parcours. Il s'agit d'optimiser la durée totale des trajets à bord des différents véhicules selon les charges de ces derniers (nombre de personnes). Dans ce but, et en se basant sur l'hypothèse II.1, calculons tout d'abord le nombre de personnes qui montent et qui descendent de chaque véhicule à chaque station.

a- Calcul du nombre de passagers montant

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

$$Nmont_{ij}^{lm} = \sum_{S_k^r > S_j^m} N_{ijk}^{lmr} + \sum_{V_{i'}^{l'} \in V^H} y_{i'ij}^{l'm} \times \omega_{i'ij}^{l'm}. \quad (\text{II.22})$$

Avec :

N_{ijk}^{lmr} : Le nombre de personnes montant à bord du véhicule allant de S_j^m à S_k^r , formulé dans (II.17).

$\omega_{ij}^{l'm}$: Le nombre de personnes en correspondance de $V_i^{l'}$ à V_j^m présenté dans (II.20).

b- Calcul du nombre de passagers descendant

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

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

$$N_{desc_{ij}}^{lm} = \sum_{S_k^r < S_j^m} (N_{ikj}^{lrm} + \sum_{V_i^{l'} \in V^H} \gamma_{i'ik}^{l'lr} \times \lambda_{i'ik}^{l'lr} \times \omega_{i'ik}^{l'lr}). \quad (II.23)$$

c- Calcul de la charge

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

$$C_{ij}^{lm} = C_{ij'}^{lm'} - N_{desc_{ij}}^{lm} + N_{mont_{ij}}^{lm}. \quad (II.24)$$

Remarque II.3 : Le calcul de la charge des véhicules, des nombres de personnes montant, descendant ou en correspondance se fait d'une manière récursive.

d- Calcul de la durée-passager totale de parcours sur \mathcal{H}

Finalement, nous calculons le total des durées-passagers des trajets effectués à bord des véhicules de \mathcal{V}^H en multipliant les charges par les durées des tronçons inter-stations pour chaque véhicule.

En prenant dans l'expression suivante $S_j^{m'} = \text{Arrêt_Prec}(V_i^l, S_j^m)$ pour $V_i^l \in \mathcal{V}^H$ et $S_j^m \in \mathcal{S}^H$, nous avons la durée totale des Routes, RT .

$$RT = \sum_{V_i^l \in \mathcal{V}^H} \sum_{S_j^m \in \mathcal{S}^H} a_{ij}^{lm} \times C_{ij'}^{lm'} \times (td_{ij}^{lm} - td_{ij'}^{lm'}) \quad (\text{II.25})$$

II.4.4. Les contraintes

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

Concernant les itinéraires des véhicules, il est nécessaire d'avoir une conformité entre les variables de passage et les variables de destination. Ainsi, (II.26) stipule que le véhicule V_i^l doit avoir une seule destination immédiate après S_j^m .

$$\sum_{S_k^r \in \mathcal{S}^H} x_{ijk}^{lmr} = a_{ij}^{lm} \quad (\text{II.26})$$

De même, nous imposons via (II.27) qu'un seul arrêt soit desservi juste avant S_j^m par V_i^l . Autrement dit, ce véhicule possède une unique origine immédiate.

$$\sum_{S_k^r \in \mathcal{S}^H} x_{ikj}^{lrm} = a_{ij}^{lm} \quad (\text{II.27})$$

Il est important également d'imposer une contrainte sur les intervalles de passage successifs de deux véhicules d'une même ligne à un arrêt. En effet, pour le cas du tramway ou des rames de métro, et à cause du partage des voies, il faut fixer un intervalle minimal de sécurité entre les passages des véhicules pour éviter les accidents. Nous supposons que si deux véhicules appartiennent à une même ligne, alors ils partagent une même voie. Nous définissons alors pour

chaque ligne l une borne inférieure $Inter_{min}^l$ pour les intervalles de passage entre les véhicules. D'où, pour $V_i^l \in \mathcal{V}^H$, ayant $V_{i'}^l$ comme son premier successeur à l'arrêt $S_j^m \in \mathcal{S}^H$, $V_{i'}^l$ doit arriver au moins $Inter_{min}^l$ minutes après le départ de V_i^l , tel que présente (II.28).

$$ta_{i'j}^{lm} - td_{ij}^{lm} \geq Inter_{min}^l \quad (\text{II.28})$$

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

Pour le même problème de partage des voies de métro ou de tramway, il est nécessaire d'imposer une limite pour la durée de stationnement des véhicules aux différentes stations du réseau. Cette limite, $ts_{max_{ij}}^{lm}$, peut dépendre du véhicule (V_i^l) et de la station (S_j^m) concernés comme illustré dans (II.29).

$$td_{ij}^{lm} - ta_{ij}^{lm} \leq ts_{max_{ij}}^{lm} \quad (\text{II.29})$$

La correspondance étant un critère très important pour les usagers du transport public, il est possible d'imposer des limites sur les durées des transferts entre les différentes lignes du réseau afin d'éviter la dégradation de la qualité de service. Ainsi, pour une correspondance de V_i^l vers $V_{i'}^{l'}$ à la station S_j^m , des limites inférieures et supérieures, imposées par les exploitants du réseau, sur la durée de transfert sont présentées dans (II.30a) et (II.30b).

$$(td_{i'j}^{l'm} - ta_{ij}^{lm}) \times y_{ii'j}^{l'm} \leq Trans_{max} \quad (\text{II.30a})$$

$$(td_{i'j}^{l'm} - ta_{ij}^{lm}) \times y_{ii'j}^{l'm} \geq Trans_{min} \quad (\text{II.30b})$$

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

$$C_{ij}^{lm} \leq C_{max_{ij}}^{lm} \quad (\text{II.31})$$

II.4.5. Caractéristiques du modèle mathématique

Ce problème possède des caractéristiques qui le rendent difficile à résoudre avec des méthodes classiques :

- espace de recherche discret,
- espace de recherche non-linéaire,
- dimension importante de l'espace de recherche.

Dans la formulation mathématique présente du problème, il y a plusieurs types de variables de décision : variable de passage, a_{ij}^{lm} , variable de destination, x_{ijk}^{lmr} , la modification de la durée du trajet inter-stations, δ_{ijk}^{lmr} , et la modification imposée sur la durée de stationnement aux arrêts, ε_{ij}^{lm} . Les deux premiers types sont en fait binaires, égaux à 0 ou 1, ce qui rend l'espace de recherche discret. Les deux autres variables sont exprimées en nombres entiers en minutes mais sont restreints dans des intervalles fixes, ce qui leur donne aussi un caractère discret.

La non-linéarité du problème résulte de la forme des critères formulés et des contraintes exprimées dans (II.30a) et (II.30b). [Deb & al, 98] stipule que le traitement de la non-linéarité dans ce genre de problème peut être fondé sur la technique de Franck-Wolfe qui consiste à effectuer des approximations successives des fonctions non-linéaires pour obtenir des solutions. Cependant, cette technique introduit de nouvelles contraintes linéaires pour gérer les contraintes non-linéaires, ce qui la rend plus lente et peut causer des problèmes de convergence.

Pour illustrer la dimension de l'espace de recherche, calculons d'abord le nombre de variables nécessaires pour la construction d'une solution à la problématique de régulation. En fait, pour v véhicules qui peuvent passer par s stations, nous pouvons déjà déduire le nombre de variables de passage à fixer qui est de $v \times s$, qui est également celui des variables de modification du temps d'arrêt. Pour les variables de décision concernant la destination des véhicules et la modification du temps de parcours, leur nombre dépend des variables de passage (a_{ij}^{lm}) qui sont égaux à 1. Prenons le pire des cas où les véhicules passent par tous les arrêts, nous avons alors un nombre de $v \times s \times (s-1)/2$ pour chacune des variables x_{ijk}^{lmr} et δ_{ijk}^{lmr} . La division par deux est en fait due à la relation (II.32) qui montre que si V_i^l va de S_j^m à S_k^r , alors il ne peut plus aller de S_k^r à S_j^m .

$$x_{ijk}^{lmr} + x_{ikj}^{lrm} = 1 \tag{II.32}$$

Les nombres des variables de décisions pour un horizon de v véhicules et s stations sont récapitulés alors dans le tableau II.2. Le nombre total de variables est alors de $v \times s \times (s+1)$ ce qui est de l'ordre de $o(v \times s^2)$.

Tableau II.2: Estimation du nombre de variables de décision.

| Variable | a_{ij}^{lm} | ε_{ij}^{lm} | x_{ijk}^{lmr} | δ_{ijk}^{lmr} |
|----------|---------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Nombre | $v \times s$ | $v \times s$ | $v \times s \times (s-1) / 2$ | $v \times s \times (s-1) / 2$ |

Calculons maintenant le nombre de solutions possibles que peut contenir l'espace de recherche, sans tenir compte des contraintes du problème. Pour les variables binaires, elle ne peuvent avoir que 0 ou 1 comme valeur, on aurait ainsi $2^{v \times s} \times 2^{v \times s \times (s-1) / 2}$ solutions possibles. De plus, si nous tenons compte des deux autres variables, le nombre de solutions possibles définissant la taille de l'espace de recherche serait alors de :

$$2^{v \times s} \times 2^{v \times s \times (s-1) / 2} \times (\varepsilon_{max} + 1)^{v \times s} \times (\delta_{max} + \delta_{min} + 1)^{v \times s \times (s-1) / 2} \tag{II.32a}$$

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

$$[2 \times \varepsilon \times (2\delta)^{(s-1) / 2}]^{v \times s} \tag{II.32b}$$

Exemple II.1: Pour un horizon relativement réduit avec $v = 5$ et $s = 10$, le modèle comporterait 550 variables. En prenant $\delta = \varepsilon = 3$, la taille de l'espace de recherche serait alors de 10^{214} , ce qui représente une dimension extrêmement importante.

D'après la nature de l'expression (II.32b), la dimension de l'espace de recherche évolue exponentiellement avec les paramètres définissant la taille de l'horizon, v et s . Pour choisir une solution, nous devons tester la performance de chaque possibilité en parcourant l'intégralité de l'espace. Puisque la durée de résolution du problème par un processeur est supposée évoluer considérablement avec ces mêmes paramètres, la dimension de l'espace impliquerait alors un énorme coût en terme de temps.

Par ailleurs, la complexité algorithmique du présent problème, qui consiste à évaluer le nombre d'opérations incluses dans les algorithmes de résolution en fonction de la taille des données [Carlier & al, 88], a rarement été étudiée. Néanmoins, la régulation est associée au domaine global des tournées des véhicules («vehicle routing problem»), et le modèle mathématique que nous avons formulé a beaucoup de similitudes avec les modèles associés aux problèmes POMDV qui sont considérés NP-Difficiles [Tan & al, 01] [Zhu, 95].

Finalement, le caractère discret de l'espace de recherche, la non-linéarité des critères et des contraintes et le nombre important de contraintes et de variables rendent le problème de régulation très difficile à gérer avec des techniques classiques telles que celle de séparation et d'évaluation progressive («Branch and Bound») [Deb & al, 98]. De plus, la présence de plusieurs critères à optimiser implique une recherche multicritère des solutions, ce qui rend la tâche encore plus compliquée.

Par conséquent, afin de mieux traiter les difficultés précédemment citées, nous choisissons de résoudre la problématique de la régulation au sein d'un réseau de transport en commun par des techniques avancées d'optimisation basées sur les algorithmes évolutionnistes et les systèmes multi-agent que nous allons détailler dans les deux chapitres suivants.

II.5. Conclusion

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

Par conséquent, nous avons choisi d'utiliser une modélisation hybride basée sur :

- les graphes pour la représentation des itinéraires et de l'affectation des nœuds et des arcs, ce qui résume la nature des décisions de régulation,
- les agents afin d'appréhender le caractère distribué du réseau et d'effectuer une meilleure surveillance en temps réel et en tant que première phase de la régulation.

Comme le modèle agent sera construit dans le chapitre III, nous avons seulement exposé dans le chapitre présent le modèle graphique choisi pour mettre en valeur les itinéraires et les problèmes d'affectation. La formulation mathématique du problème a été détaillée afin de saisir les différents paramètres et variables intervenant dans le processus en question. La régulation étant considérée comme un problème de réordonnancement ou d'optimisation, nous avons explicité les différents critères et contraintes à prendre en compte lors de la recherche d'une solution.

Les caractéristiques liées à la dimension de l'espace discret de recherche, la non-linéarité et l'aspect multicritère du modèle mathématique exposé nous ont incités à l'utilisation d'une technique avancée d'optimisation, les algorithmes évolutionnistes. Une approche évolutionniste de régulation avec ou sans reconfiguration sera alors présentée dans le chapitre IV. Cependant, dans des cas familiers de perturbation, nous n'avons pas besoin d'utiliser cette approche. Nous décrivons dans le chapitre suivant le système multi-agent d'aide à la décision qui effectue la surveillance, le diagnostic et la résolution des perturbations familières.

Chapitre III : Système Multi-Agent d'Aide à la Décision
proposé

III.1. Introduction

Les systèmes multi-agents, SMA, présentent des avantages potentiels dans la résolution des problèmes liés à des systèmes ouverts, distribués et complexes. En effet, il est raisonnable de traiter ces derniers par la décomposition modulaire et fonctionnelle pour que des « agents » soient spécialisés dans la résolution d'un aspect particulier du problème. Afin de concevoir des systèmes multi-agents cohérents, il est nécessaire de [Sycara, 98] :

- formuler, décrire, décomposer et allouer des problèmes et faire une synthèse des résultats parmi un groupe d'agents intelligents ;
- permettre aux agents de communiquer et interagir ;
- s'assurer que les agents prennent des décisions et effectuent des actions de manière cohérente.

Nous consacrons la première partie de ce chapitre à la caractérisation des agents et des SMA. En passant par les méthodologies de conception des SMA, nous notons les plus importantes applications des approches orientées agents, notamment dans le domaine du transport.

Les réseaux de transport urbain formant des systèmes ouverts, distribués et complexes, leur gestion par des SMA est bien adaptée. Ainsi, nous présentons dans ce chapitre un Système Multi-Agent d'Aide à la Décision, SMAAD, pour un réseau de transport multimodal.

Afin de cerner au mieux les particularités du SMAAD proposé, nous commençons d'abord par présenter les différents agents qui le composent ainsi que leur architecture interne. Nous décrivons aussi la nature de l'organisation du système considéré afin de situer les interactions qui le caractérisent. Nous illustrons les comportements des agents ARRET, VEHICULE, INCIDENT, ZONEPERT et ZONEREG via le langage de modélisation UML² dans le but de mettre en valeur les actions qu'ils réalisent dans le processus de gestion temps réel du réseau. Pour terminer, le comportement global du système est finalement décrit.

² Unified Modeling Language

III.2. Les Systèmes Multi-Agents

III.2.1. Les Systèmes Multi-Agents et l'Intelligence Artificielle

Les recherches en Intelligence Artificielle avaient pour objectif de développer des logiciels afin de simuler des capacités des êtres humains telles que le raisonnement, le langage naturel de communication et l'apprentissage. Les chercheurs ont ainsi traité le développement de théories, de techniques et de systèmes pour étudier les propriétés du comportement et du raisonnement d'une entité cognitive unique. L'évolution de l'Intelligence Artificielle a provoqué de plus amples intérêts vers des problèmes plus complexes, plus réalistes et de plus grande échelle, qui dépassent les capacités d'un agent individuel. En effet, la capacité d'un seul agent est limitée par ses connaissances, ses ressources de calcul et ses perspectives. Cette rationalité limitée a engendré la création d'organisations artificielles de résolution de problèmes. Les outils les plus puissants pour la gestion de la complexité sont la modularité et l'abstraction. Les Systèmes Multi-Agents offrent la modularité.

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

Ainsi, il est d'autant plus clair que pour être réussies, les recherches doivent accorder plus d'importance aux systèmes composés non d'un seul agent, mais de plusieurs. Pour résumer, [Ferber, 95] stipule que la nécessité de la distribution de l'activité et de l'intelligence peut être expliquée par les raisons suivantes :

- Les problèmes sont physiquement distribués.
- Les problèmes sont fonctionnellement très distribués et hétérogènes.
- Les réseaux imposent une vision distribuée.
- La complexité des problèmes impose une vision locale.

- Les systèmes doivent pouvoir s'adapter à des modifications de structure ou d'environnement.
- Le génie logiciel va dans le sens d'une conception en terme d'unités autonomes en interactions.

Ainsi l'Intelligence Artificielle Distribuée, sous-domaine de l'Intelligence Artificielle, s'est développée depuis deux dizaines d'années pour s'intéresser à une société d'agents interagissant dans le but de résoudre un problème commun lié aux ordinateurs, aux personnes, aux capteurs, aux avions, aux robots, etc. Une telle société est nommée Système Multi-Agent, SMA [Green & al, 97].

III.2.2. Caractéristiques des agents

III.2.2.1. Notion d'Agent

Plusieurs définitions attribuées à la notion d'agent existent dans la littérature. Par exemple, [Ferber, 95] propose une définition détaillée qui accentue les propriétés de l'agent liées à l'action, la perception, la communication, la vision locale, les tendances et objectifs, les ressources et les compétences.

Dans [Wooldridge & al, 95], [Jennings, 00] et [Jennings & al, 98], Jennings et Wooldridge proposent une définition commune que nous citons dans ce qui suit et dans laquelle nous pouvons relever les notions de situation, autonomie et flexibilité.

Définition III.1 : Un agent est un système informatique encapsulé qui est **situé** dans un environnement, et qui est capable d'effectuer des actions **autonomes** et **flexibles** afin d'atteindre les objectifs pour lesquels il a été conçu.

Nous avons cependant jugé utile de noter une autre définition plus explicite du terme Agent proposée par [Florez, 99] et basée sur les différentes définitions établies par, entre autres, Jennings, Wooldridge et Ferber.

Définition III.2 : Un agent est une entité **interactive** qui existe en tant que partie d'un environnement partagé par d'autres agents. C'est une entité conceptuelle qui **perçoit** et **agit** avec **initiative** ou en **réaction** dans un environnement où d'autres agents existent et **interagissent** les uns avec les autres sur la base de **connaissances partagées** de **communication** et de **représentation**.

Dans [Florez, 99], afin de mieux saisir la notion d'agent, nous pouvons relever quelques propriétés qui peuvent être attribuées aux agents :

- Adaptabilité : capacité à apprendre et à s'améliorer avec l'expérience.
- Autonomie : actions proactives et dirigées par des buts.
- Comportement collaboratif : capacité à travailler avec d'autres agents pour un objectif commun.
- Capacité inférentielle : capacité d'agir avec des spécifications abstraites des tâches.
- Capacité de communication au niveau des connaissances : capacité de communiquer avec les autres agents avec un langage comme celui des êtres humains.
- Personnalité : capacité à manifester des attributs d'un caractère humain crédible.
- Réactivité : capacité à détecter et réagir.
- Continuité temporelle : persistance d'une identité et d'un état sur une longue période.

III.2.2.2. Raisonnement individuel des agents

Le raisonnement individuel des agents peut améliorer la cohérence des systèmes multi-agents car chaque agent réfléchit sur les effets non locaux que peuvent avoir les actions locales, essaie de prévoir le comportement des autres agents et explique ou répare les conflits et les mauvaises interactions. Par ailleurs, faut-il concevoir les agents comme des entités « intelligentes », capables de résoudre les problèmes par eux-mêmes ou bien faut-il les assimiler à des entités simples réagissant directement aux variations de l'environnement ? La réponse à cette question a donné naissance à trois écoles de pensée relatives aux agents cognitifs, réactifs et hybrides.

a- Agent Cognitif

La notion d'agent a été développée par le biais de la psychologie humaine avec laquelle le comportement humain est prévu et expliqué à travers l'attribution d'attitudes. Ainsi, les agents cognitifs disposent d'une base de connaissances et de plans explicites leur permettant d'atteindre leurs buts [Bensaid, 99]. Par ailleurs, des modèles d'agent ont été formalisés dans le sens des croyances, des désirs, des intentions, des objectifs, etc., [Wooldridge & al, 94]. Un agent a une structure du type BDI, « Belief, Desire, Intention », est aussi qualifié de « délibératif » [Rao & al, 95] [Shoham, 93].

D'ailleurs, selon la programmation orientée Agent, [Shoham, 93] propose la définition suivante :

Définition III.3 : Un agent est une entité dont l'état est considéré comme constitué de composants mentaux tels que croyances, capacités, choix, engagements, etc.

Par exemple, dans [Giampapa & al, 02] et [Sycara, 98], un agent cognitif, appelé RESTINA, a été développé en intégrant la planification, l'ordonnancement, l'exécution, la collecte de l'information et la coordination.

b- Agent Réactif

Un agent peut être réactif, il n'a ainsi pas de représentation de son environnement. Il agit avec un comportement de stimulus/réponse et réagit à l'état présent de l'environnement dans lequel il est situé. Ce genre d'agents ne tient pas compte du passé et ne planifie pas le futur. A travers des interactions simples avec les autres, le comportement global complexe peut apparaître. Ainsi, les agents n'ont pas à réviser le modèle de leur environnement quand il change, ce qui présente un grand avantage et rend les systèmes réactifs plus rapides. Les propriétés principales de ces systèmes sont la robustesse et la tolérance aux fautes. En effet, un groupe d'agents peut compléter une tâche quand l'un d'eux échoue.

Par contre, les agents réactifs ont un comportement myope puisqu'ils ne prévoient pas l'effet des décisions locales sur le comportement global du système. En plus, il est difficile de gérer les agents pour accomplir des tâches complexes car la relation entre les comportements individuels et le comportement global du système n'est pas bien saisie.

c- Agent Hybride

En fait, pour la plupart des problèmes, ni une architecture purement réactive, ni une purement cognitive n'est appropriée, mais une architecture hybride peut combiner les avantages des deux. Ainsi, un agent hybride possède des composants réactifs et aussi des composants cognitifs pour garantir un raisonnement de qualité [Aknine & al, 98] [Chaib-draa, 96] [Sycara, 98].

III.2.2.3. Agents et objets

La recherche orientée Objet a beaucoup contribué au développement de l'approche orientée Agent. En effet, les agents et les objets partagent beaucoup de caractéristiques, ce qui les rend difficile à différencier. La Programmation Orientée Agent (POA) peut être considérée comme une spécialisation du paradigme de la Programmation Orientée Objet (POO). La POO considère le système comme composé d'objets communiquant entre eux pour accomplir des calculs internes, alors que la POA spécialise cette approche pour avoir des agents, au lieu d'objets, dont

les calculs internes se basent sur des croyances et des choix et qui communiquent entre eux par le biais de messages issus du principe de parole-action [Shoham, 93] [Florez, 99] [Jennings & al, 98].

En fait les objets sont définis comme des entités informatiques qui encapsulent un certain état, qui sont capables d'entreprendre des actions sur cet état et qui communiquent entre eux à travers des messages.

Les différences entre les agents et les objets sont :

- Le degré d'autonomie : les agents n'invoquent pas de méthodes mais font des requêtes d'actions. Dans la POO, la décision est prise par l'objet qui invoque la méthode. Dans l'autre cas, la décision revient à l'agent qui reçoit la requête.
- La notion de flexibilité (proactive, réactive ou sociale) du comportement autonome.
- Les agents ont leur propre module de contrôle alors que dans les modèles objets standard, il n'y a qu'un seul module de contrôle dans le système.

III.2.3. Caractéristiques des systèmes multi-agents

III.2.3.1. Société d'Agents

Les SMA sont en fait des sociétés d'agents qui sont définies par la plupart des auteurs de la manière suivante [Green & al, 97] [Sycara, 98] :

Définition III.4 : Un système multi-agent est un réseau d'agents (solveurs) faiblement couplés qui coopèrent pour résoudre des problèmes qui dépassent les capacités ou les connaissances individuelles de chaque agent. Les agents sont autonomes et peuvent être de natures hétérogènes.

La figure suivante illustre la définition des SMA donnée par Ferber dans [Ferber, 95]. En effet, un système multi-agent est composé d'un environnement, d'objets passifs qui sont manipulés par les agents, d'agents représentant les entités actives du système, d'interactions entre les agents et d'opérations qui permettent les perceptions et les différentes actions.

Pour appuyer ces définitions, les auteurs ont souligné certaines caractéristiques communes aux différents systèmes multi-agents :

- chaque agent a des informations incomplètes et des capacités limitées pour résoudre le problème et donc, il a un point de vue limité ;
- il n'y a pas de contrôle global du système ;
- les données sont décentralisées ;

- les calculs sont asynchrones.

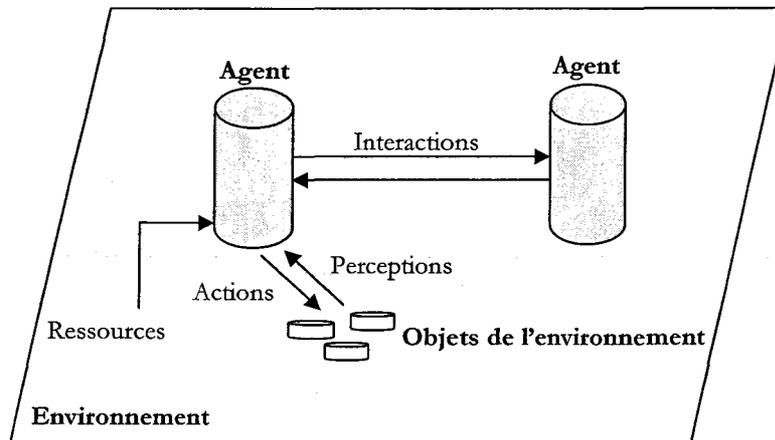


Figure III.1: Représentation d'un système multi-agent.

Ainsi, les agents d'un SMA n'ayant qu'une vision locale de leur environnement, sont amenés à coopérer, et donc à communiquer afin d'atteindre le but global du réseau. Aussi, il est nécessaire de définir la structure organisationnelle dans la société d'agents et d'y établir :

- la communication entre les agents,
- la coordination et la planification des tâches des agents,
- la négociation entre les agents pour la résolution des conflits.

En effet, dans tout type d'organisation, pour pouvoir résoudre avec cohérence les problèmes, les agents doivent communiquer entre eux, coordonner leurs activités et négocier dans les situations de conflits. Les conflits peuvent résulter d'une simple ressource limitée à des calculs plus complexes où les agents tombent en désaccord à cause des différences entre leurs domaines d'expertise. La coordination est nécessaire pour déterminer la structure organisationnelle d'un groupe d'agents et pour l'allocation des ressources et tâches. La négociation est nécessaire pour la détection et la résolution des conflits [Green & al, 97].

III.2.3.2. Organisations dans les Systèmes Multi-Agents

a- Structures organisationnelles

Une organisation est constituée d'un groupe d'agents, d'un ensemble d'activités effectuées par les agents, d'un ensemble de connexions entre ces entités et d'un ensemble de buts ou de critères d'évaluation avec lesquels les activités combinées des agents sont évaluées. Les structures

organisationnelles imposent des contraintes sur la nature de la communication ou de la coordination.

Nous illustrons dans ce qui suit quelques exemples d'organisation [Sycara, 98] :

- Hiérarchie : la prise de décision et le contrôle sont concentrés sur un seul agent ou groupe d'agents spécialisés à chaque niveau de la hiérarchie. Les interactions se font selon des communications verticales.
- Communauté d'experts : une organisation plate où chaque agent est spécialisé dans un aspect particulier. Les agents interagissent selon des règles d'ordre et de comportement. La coordination se fait selon un ajustement mutuel de leurs solutions pour garder une cohérence globale.
- Marché : le contrôle est distribué sur les agents qui concourent pour une tâche ou une ressource à travers des mécanismes d'appels d'offre et de contrats.
- Communauté scientifique : un modèle de communauté pluraliste où les solutions sont construites localement et ensuite communiquées à d'autres agents qui les testent, les défient et les raffinent.

b- Coordination

La coordination est un processus dans lequel les agents se sont engagés en vue d'assurer une communauté d'agents individuels agissant avec cohérence et harmonie [Green & al, 97] [Sycara, 98]. Les agents ont en fait besoin de la coordination pour empêcher les comportements chaotiques, pour être coordonnés de la même manière puisque aucun agent ne possède une vue globale sur le système et parce qu'ils possèdent des capacités et expertises différentes.

Il est clair que la coordination s'avère plus facile dans les situations de routine que dans les situations non familières. En effet, dans la routine, les agents peuvent être parfaitement coordonnés car on pourrait connaître ce qu'ils sont en train de faire et prévoir ce qu'ils vont faire. Les situations peuvent être de routine, familières ou non familières. Dans les situations familières, les agents peuvent être coordonnés selon des lois sociales, ce qui n'est pas possible dans les situations non familières [Chaib-draa, 96] [Green & al, 97].

La coordination comprend aussi l'allocation des tâches, ce qui consiste à affecter des responsabilités et des ressources nécessaires à la résolution de problèmes à un agent. Le créateur du système d'agents peut allouer toutes les tâches d'avance en engendrant ainsi une organisation de résolution des problèmes qui est non adaptable. Par contre, on peut avoir une allocation dynamique et flexible des tâches. Dans ce sens, Davis et Smith ont développé le « Contract Net

Protocole » (CNP) pour effectuer une sorte d'appel d'offre lors de l'allocation des tâches [Green & al, 97].

La planification fait également partie de la coordination. Pour un agent, elle constitue un processus de construction d'une séquence d'actions en tenant compte seulement des objectifs, des capacités et des contraintes environnementales. La planification a pour rôle d'éviter les conflits. Elle peut être centralisée ou distribuée.

c- Négociation

La négociation est un processus de communication d'un groupe d'agents qui a pour objectif d'atteindre un accord mutuel accepté dans une affaire donnée. Elle est donc considérée comme une méthode de coordination et de résolution de conflits. Le processus de négociation peut induire des échanges d'informations, des relaxations des buts initiaux, des concessions mutuelles, des mensonges ou des menaces. Elle relève ainsi principalement de la recherche d'un consensus. Elle peut être compétitive ou coopérative.

La négociation compétitive est utilisée dans les situations où des agents d'intérêts différents tentent de faire un choix de groupe avec des alternatives bien définies. Les agents sont néanmoins compétitifs et non coopératifs.

La négociation coopérative concerne les situations où les agents ont un but unique global envisagé pour le système. Il s'agit ainsi de systèmes distribués qui ont été centralement conçus pour réaliser un seul objectif global. Ces agents sont aussi dits collaboratifs.

d- Communication

Les agents ont besoin de communiquer pour pouvoir interagir et échanger de l'information [Wooldridge & al, 94] [Shoham, 93]. Les langages de communication peuvent se baser sur deux approches. La première est l'approche procédurale où la communication est basée sur un contenu exécutable (Java, etc). La deuxième est l'approche déclarative où la communication est basée sur des phrases déclaratives (définitions, hypothèses, etc.). Par ailleurs, l'approche procédurale étant limitée, l'approche déclarative est la préférée des deux. En effet, le contenu exécutable est difficile à coordonner et à contrôler. La plupart des langages basés sur l'approche déclarative se basent sur des actes avec des locutions comme demander ou commander. Le plus connu parmi ces langages est le KQML.

Le KQML, « Knowledge Query Manipulation Language », est composé de trois niveaux. Le premier est un niveau de communication qui décrit un niveau bas des paramètres de communication comme l'expéditeur, le receveur et les identificateurs de communication. Le

deuxième est le niveau du message où le protocole d'interprétation est indiqué. Le troisième niveau, contenant les informations assignées au message soumis [Florez, 99].

III.3. Conception et applications des SMA

III.3.1. Conception des SMA

Afin de concevoir, implémenter et évaluer les systèmes multi-agents, plusieurs méthodologies orientées multi-agent ont été conçues. Selon la définition donnée par G.Booch, une méthodologie est un ensemble de méthodes appliquées tout au long du cycle de développement d'un logiciel, ces méthodes étant unifiées par une certaine approche philosophique générale.

Des plates-formes associées aux différentes méthodologies de conception ont été construites avec une grande diversité de réalisation. Une plate-forme multi-agent est un outil qui permet de faciliter la construction et l'exploitation d'un SMA. Sa performance est liée au nombre de fonctions d'aide dans les tâches de développement.

Les différentes méthodologies orientées multi-agent sont construites à travers une phase d'analyse et de conception [Casteran & al, 00]. Par exemple :

- Ferber et Gutknecht présentent une méthodologie dans laquelle les agents sont identifiés par leurs rôles au sein de groupes dans le modèle organisationnel agent-groupe-rôle d'Aalaadin [Ferber & al, 98] [Gutknecht & al, 00]. Ces auteurs ont contribué à la construction d'une plateforme multi-agent appelée MADKIT³.
- Wooldridge, Jennings et Kinny proposent d'identifier les rôles des agents à partir de trois attributs : les permissions (ressources), les responsabilités (buts) et les protocoles. Ces derniers servent à définir le modèle d'interaction entre les rôles. La conception se base sur trois modèles : le modèle agent (types et instances), le modèle de services (fonctions) et le modèle d'acointances (liens de communication) [Wooldridge & al, 99]. Cette méthodologie a été appelée GALA [Wooldridge & al, 00].
- Kinny et Georgeff présentent une méthodologie pour des agents du type BDI et dont la phase d'analyse se base sur un modèle d'agent et un modèle d'interaction. Le concepteur est ensuite guidé dans la mise en œuvre du comportement des agents à travers : le modèle des croyances, le modèle des buts et le modèle des plans [Kinny & al, 96].

³ Multi-Agent Development KIT

Nous pouvons mentionner entre autres, la plate-forme MAGIQUE⁴ qui a été développée à l'université de Lille 1. Son architecture est principalement caractérisée par une stratégie de contrôle hiérarchique avec plusieurs niveaux de contrôle. Elle comporte des agents spécialistes et des agents superviseurs structurés sous forme de niveaux de contrôle [Bensaid, 99].

D'autres plates-formes industrielles dédiées aux SMA existent aussi. Nous pouvons noter par exemple, ZEUS et AgentBuilder qui ne concerne que les agents du type BDI [Laïchour, 02].

III.3.2. Applications des SMA

III.3.2.1. Applications générales

L'intérêt croissant pour les systèmes multi-agents réside dans leur capacité à :

- résoudre des problèmes qui sont trop larges pour un seul agent centralisé, à cause de ses ressources limitées ou du risque engendré par un système centralisé unique (échec à des instants critiques, goulot d'étranglement) ;
- permettre l'interconnexion et l'inter-opération entre plusieurs systèmes existants (systèmes d'aide à la décision, systèmes experts, etc.) ;
- fournir des solutions à des problèmes distribués (Régulation du Trafic Aérien, etc.) ;
- fournir des solutions qui sont issues de sources d'information distribuées (Contrôle Sismique, etc.) ;
- fournir des solutions quand l'expertise est distribuée (Santé, Production Manufacturière, etc.) ;
- améliorer la performance à travers l'efficacité et la vitesse des calculs, la sûreté (faire face à l'échec d'un composant), l'extensibilité (modification du nombre d'intervenants), la flexibilité, la robustesse (tolérance des incertitudes dans les données ou les connaissances) et réutilisabilité.

Par conséquent, les SMA possèdent des applications diverses qui ont évolué avec le développement des outils technologiques et surtout de l'Internet [Jennings & al, 98] [Chaib-draa, 95] [Sycara, 98] :

- Applications industrielles : Gestion de la production manufacturière [Kabachi & al, 96], contrôle et commande des processus (accélérateur de particules), télécommunication (gestion et contrôle des réseaux, transmission, etc.) et systèmes de transport (surveillance des véhicules automatisés (DVMT : « Distributed Vehicle Monitoring Task », etc.).

⁴ Modèle d'Architecture multi-aGent hiérarchIQUE

- Applications commerciales : Gestion de l'information (Internet, filtrage, collecte), commerce électronique, gestion des affaires, etc.
- Loisirs : Jeux, théâtre et cinéma interactifs.
- Applications médicales : orientation des patients, gestion des soins.

III.3.2.2. Applications dans le domaine du transport

Les SMA ont été appliqués à diverses problématiques liées aux systèmes de transport telles que :

- La surveillance des véhicules automatisés [Durfee & al, 91].
- Les systèmes d'aide au pilotage des avions militaires (surveillance des capteurs, collecte, vérification et analyse des données, proposition de mesures correctives ou de plans optionnels au pilote pour qu'il puisse atteindre le but de sa mission) [Chaib-draa, 95].

En ce qui concerne le contrôle du trafic aérien, [Ljungberg & al, 92] proposent un SMA, nommé OASIS⁵, pour le contrôle du trafic aérien de la région de Sydney en Australie. Il a pour but de réduire la congestion du trafic aérien en maximisant l'utilisation des pistes en ordonnant les atterrissages. Ce système possède deux types d'agents : des agents « globaux » qui traitent les relations entre les avions, la coordination et le raisonnement (COORDINATEUR, SEQUENCEUR, VERIFICATEUR DE TRAJECTOIRE, MODELE DU VENT, INTERFACE UTILISATEUR) et des agents AVION responsables des calculs et du raisonnement associés à chaque avion (position, vitesse, heure d'atterrissage, etc.).

[Fischer & al, 95] présente une plate-forme, MARS, de simulation multi-agent pour le transport des marchandises. Elle décrit un scénario lié à des compagnies de transport géographiquement distribuées qui gèrent des commandes arrivant en temps réel. Le système comprend deux types d'agents correspondant aux compagnies de transport et aux camions. Les agents compagnies doivent affecter les ordres aux camions ou coopérer avec les autres agents du même type pour qu'ils se chargent de ou des ordres. La coopération se base sur une négociation à l'aide d'une version évoluée du « Contract Net Protocole ». Le comportement et la cohérence du système sont évalués à partir des coûts associés aux ordres ordonnancés. Un scénario pour le transport des frets par trains est aussi présenté dans [Lind & al, 98].

[Chaib-draa, 96] aborde le problème de gestion du trafic urbain par une approche agent. Les agents peuvent correspondre à des hommes (conducteurs, policiers, piétons) ou des machines (véhicules, feux de circulation, etc.) et doivent constamment ajuster leurs actions pour éviter les

⁵ Optimal Aircraft Sequencing using Intelligent Scheduling

bouchons et les accidents. Les agents sont dotés alors de lois sociales pour que leurs fonctions soient basées sur des compétences, ce qui implique des activités de coordination rapide et sans effort entre eux. La performance des agents est guidée par des modèles stockés de procédures prédéfinies, qui vont de la perception ou de l'observation à l'action. Les situations non familières sont adaptées à des situations familières en utilisant des raisonnements basés sur des cas. Le modèle d'agent est ainsi basé sur trois niveaux : compétences (pour la routine), règles (situations familières) et connaissances (situations non familières).

[Gruer & al, 01] propose une approche multi-agent pour la modélisation et la simulation des systèmes de transport. L'approche s'appuie sur un langage formel de spécification (Objet-Z) et sur des diagrammes d'état pour décrire et simuler le comportement des agents : BUS, ARRET et SECTION.

[Saussol & al, 00] modélise un réseau de transport urbain par un SMA dans le but d'assister le régulateur dans la régulation des correspondances. Un agent modélise une entité active du processus de transport. Il peut être un agent :

- BUS qui modélise l'entité bus (véhicule + conducteur). Cet agent doit gérer son déplacement et ses passagers, détecter les perturbations et prendre des décisions dans le cas où une correspondance est compromise.
- STATION qui modélise les arrêts du réseau qui peuvent être arrêts simples ou arrêts de référence parmi lesquels on distingue les terminus et les arrêts de correspondances. Cet agent sert à représenter l'arrivée des passagers à la station et à gérer leurs échanges avec l'agent BUS.
- SECTION qui modélise une section de ligne. Sur le réseau, cette section est un trajet délimité par des arrêts de référence.
- DEPOT modélise le dépôt du réseau.
- INTERFACE permettra d'interfacer le SAD pour échanger les informations avec le régulateur.

Toujours dans le cadre de la régulation des correspondances, [Laïchour & al, 01] présente un modèle multi-agent qui se base sur trois types d'agents :

- L'agent ACQUISITION qui effectue la gestion des données relatives aux passages des bus aux arrêts de régulation.
- L'agent CORRESPONDANCE qui s'occupe de la détection et du diagnostic des perturbations au niveau des correspondances ainsi que de la proposition de décisions.
- L'agent SUPERVISEUR qui a un rôle d'interface entre le régulateur et le système d'aide à la régulation des correspondances.

[Balbo, 00] propose aussi un SMA d'aide à la décision pour la régulation d'un réseau de transport par bus. Ce système est basé sur un module d'interaction qui utilise l'environnement comme support de communication. Sa particularité réside dans son fonctionnement sans horaires préétablis pour les véhicules mais suivant une gestion dynamique du planning. Il est composé d'agents :

- ARRET qui assurent en conditions normales la gestion des horaires en temps réel. Ils créent les horaires de passage, à travers la distance du parcours et le temps nécessaire, pour que les véhicules les suivent.
- BUS qui ont pour rôle d'exécuter les courses qui leur sont affectées et de proposer des mesures de régulation.
- INCIDENT qui sont responsables de la gestion des perturbations. Ils synthétisent les informations afin d'évaluer la difficulté du problème et l'adéquation des solutions proposées par les agents BUS.
- ZONEARRET qui assurent la gestion des informations concernant un problème afin de les rendre disponibles aux agents INCIDENT. Ces agents calculent pour l'ensemble des arrêts concernés : la demande théorique, la difficulté de circulation, l'étude en mètres et en nombre d'arrêts et le temps gagné ou perdu par le véhicule précédent.

III.3.3. Discussion

Les réseaux de transport urbains constituent des systèmes dont les informations sont dispersées, la gestion est distribuée et la télécommunication est mobile, ce qui induit leur modélisation par des systèmes distribués. Par conséquent, le choix d'une modélisation du réseau basée sur une approche Agent est bien appropriée ; d'autant plus que son efficacité a été démontrée par plusieurs applications dans le domaine du transport. En fait, le choix d'une telle approche est justifié par le fait que [Gruet & al, 01] :

- Le système considéré est complexe ce qui nécessite un ensemble d'entités distribuées qui interagissent.
- Le comportement global du système est traduit par des phénomènes émergents qui résultent du comportement individuel des entités et de leurs interactions.

En vue de la modélisation d'un SAD pour la régulation du transport multimodal, nous avons choisi ainsi une approche multi-agent. Les SAD existants ne concernent que les réseaux des bus. De plus, la plupart ne traitent que le problème des correspondances. Par contre, l'approche

proposée par [Balbo, 00] nous semble la plus intéressante grâce à la présence d'un agent bien original lié aux perturbations, l'agent INCIDENT.

Afin de concevoir un SMA pour l'aide à la régulation, nous avons essayé de nous baser sur l'une des méthodologies précédemment citées, ce qui n'est pas une tâche facile car leur adaptation à notre problématique n'est pas très évidente. En effet, la difficulté majeure liée à la conception des méthodologies multi-agents réside dans leur adaptation au plus grand nombre de domaines différents afin de couvrir la plupart des cas possibles. Néanmoins, peu de recherches ont mené à la standardisation des plates-formes multi-agents.

Toutefois, en s'inspirant de la méthodologie de conception établie par Ferber et Gutknecht dans [Ferber & al, 98] et [Gutknecht & al, 00], nous proposons une identification des agents basée sur leur rôles. En effet, la décomposition modulaire du processus de régulation résulte en un grand nombre de tâches qu'on peut associer à des rôles :

- application des différentes courses prévues par le TMT (par les véhicules),
- suivi des différentes courses (horaires réels de passage des véhicules par les arrêts),
- détection des écarts entre les horaires théoriques et les horaires réels,
- évaluation des perturbations (gravité, conséquences),
- recherche de solutions,
- évaluation des solutions,
- prise de décision,
- application des procédures de régulation,
- suivi de la régulation.

Nous pouvons ainsi former des groupes à partir de ces différents rôles de diverses manières :

- lignes, itinéraires,
- zones spécifiques (centre ville, périphérie, proximité d'un nœud de correspondance),
- groupe de véhicules liés à une perturbation ou à sa régulation,
- groupe d'arrêts liés à une perturbation ou à sa régulation,
- arrêts critiques, nœuds de correspondance, terminus, dépôt.

Nous proposons alors dans la dernière partie de ce chapitre le Système Multi-Agent d'Aide à la Décision (SMAAD) que nous avons conçu pour la régulation du trafic d'un réseau de transport multimodal.

III.4. Le Système Multi-Agent d'Aide à la Décision proposé

III.4.1. Description du SMAAD

III.4.1.1. Rôle du SMAAD

Afin de palier aux perturbations, nous proposons un Système Multi-Agent d'Aide à la Décision (SMAAD), [Fayech & al, 02b], qui a pour rôle d'assister le régulateur dans les différentes tâches de:

- surveillance,
- diagnostic (détection des incidents, analyse),
- décision.

Le régulateur supervise en fait l'exploitation du réseau en s'appuyant sur les données du Système d'Aide à l'Exploitation (SAE) qui sert alors comme support. En cas de perturbation, il peut s'appuyer sur les propositions fournies par le SMAAD pour choisir les décisions à entreprendre. Le régulateur peut aussi fournir au SMAAD des informations complémentaires (retard estimé, nature de la perturbation, etc.). Ainsi, le SMAAD et le régulateur se procurent les données nécessaires sur le réseau par l'intermédiaire du SAE.

La figure III.2 situe la position du SMAAD par rapport à celle du SAE dans le processus de contrôle global du réseau. L'application des décisions de régulation étant dans tous les cas effectuée par l'intermédiaire du SAE, nous proposons de placer ce dernier entre le réseau réel d'une part et le SMAAD et le régulateur d'une autre part. Ainsi, la communication :

- **Régulateur-SAE** représente la saisie, en différé, des TMT, leur mise à jour en temps réel (ajout de correspondances), les communications avec les conducteurs, etc.
- **Régulateur-SMAAD** représente dans un sens, la mise à jour de quelques données relatives aux perturbations (fournies par exemple par les conducteurs des véhicules) et la demande ou la validation de mesures de régulation, et la proposition de solutions dans l'autre sens.
- **SMAAD-SAE** illustre l'application des mesures de régulation adaptées et validées par le régulateur dans un sens et la mise à jour des données propres aux agents dans l'autre sens.

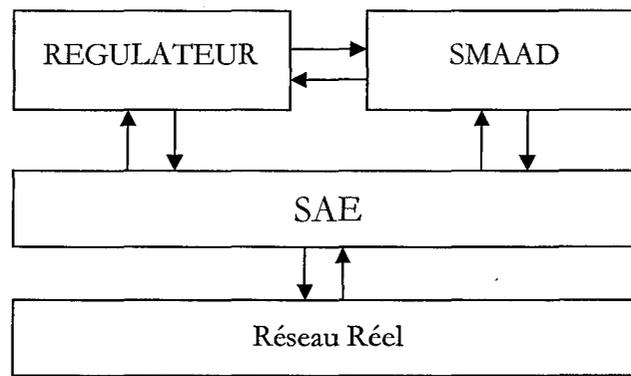


Figure III.2: Intégration du SMAAD dans le processus global de contrôle du réseau.

III.4.1.2. Les agents du SMAAD

Notre SMAAD est composé de deux modules [Fayech & al, 02b]:

- le module de surveillance qui est responsable de la gestion horaire statique du réseau ;
- le module de régulation qui gère les perturbations.

Le module de surveillance opère en conditions normales et perturbées. Il est composé des agents :

- VEHICULE représentant la composante horaire du réseau,
- ARRET formant la composante spatiale du réseau.

Une des particularités du système que nous proposons, réside dans la prise en compte de la multimodalité du réseau. En effet, les approches de régulation qui ont été établies par plusieurs chercheurs n'ont traité que le cas monomodal d'un réseau de transport urbain. Ainsi, l'agent VEHICULE peut être un agent BUS, METRO ou TRAMWAY par exemple. La figure III.3 représente les différents modes de transport.

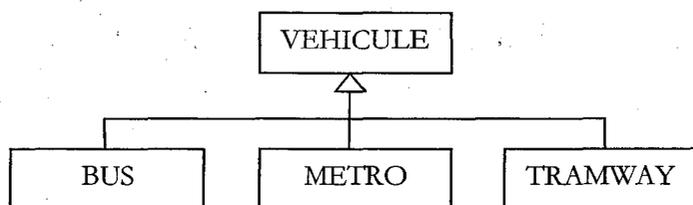


Figure III.3: Représentation de la multimodalité.

Le module de régulation traite les perturbations qui concernent tous les modes ce qui lui permet de détecter les éventuelles liaisons entre elles. C'est seulement les manœuvres de régulation et les contraintes qui diffèrent entre les différents modes.

Le module de régulation n'opère qu'en mode perturbé. Il est créé à l'apparition d'un incident. Nous définissons dans ce qui suit les agents qui le composent :

- INCIDENT : responsables de la gestion des perturbations (identification, médiation entre les autres agents et le régulateur, demande de validation des solutions proposées, etc.).
- ZONEPERT : responsables du diagnostic des perturbations, l'identification des contraintes et la proposition de solutions primaires dans des situations qui lui sont familières.
- ZONEREG : responsables de la résolution avec une approche évolutionniste de régulation dans les situations non familières.

Ces agents coopèrent entre eux et avec ceux du module de surveillance pour traiter au plus vite les différents incidents affectant le trafic du réseau. Leurs rôles et comportements seront détaillés dans les sections qui suivent. Pour l'instant, la figure III.4 en présente une synthèse.

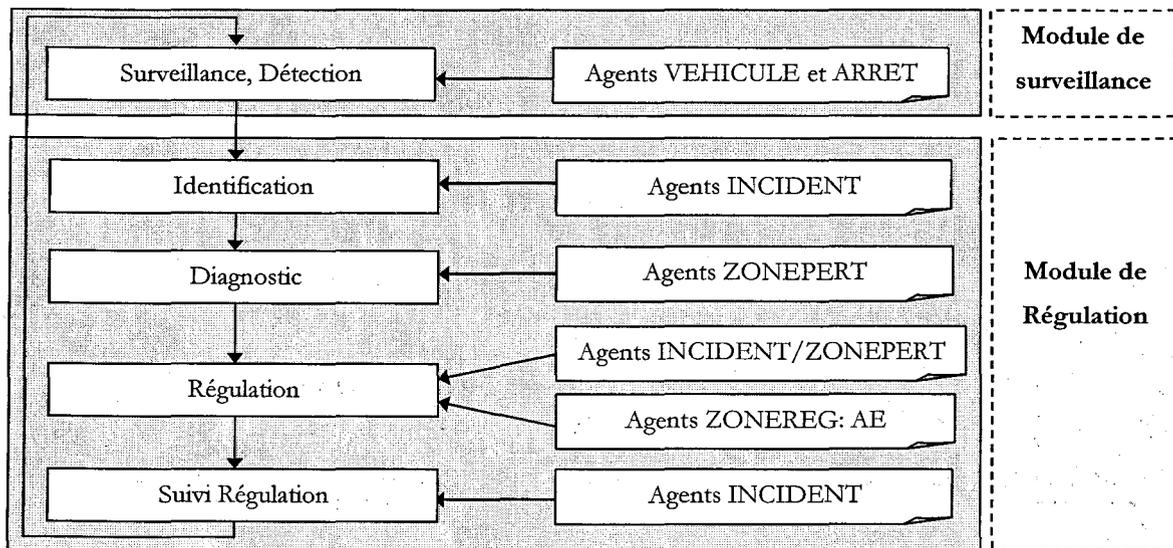


Figure III.4: Rôle des agents du SMAAD.

III.4.1.3. Organisation du SMAAD

L'organisation initiale, en situation normale, du SMAAD est représentée par le module de surveillance. C'est une organisation statique qui s'occupe de la gestion des horaires de passage des véhicules aux différents arrêts. Les agents s'échangent des informations afin de vérifier le respect des TMs théoriques.

L'organisation statique est définie alors comme étant l'ensemble des liens reflétant l'organisation structurelle du réseau. Elle regroupe, au niveau d'abstraction le plus général, tous les agents VEHICULE et ARRET. A un niveau supérieur, ces agents peuvent être regroupés en microsociétés selon leurs lignes ou itinéraires d'appartenance, ou selon les incidents qui les relient.

Si une perturbation est détectée, une organisation d'une architecture dynamique est établie afin de gérer l'incident. Ainsi, le module de régulation a une organisation dynamique. En fait, sa composition dépend des perturbations et de leurs évolutions dans le temps et dans l'espace. Par exemple, une perturbation qui ne concerne qu'une seule ligne peut évoluer et affecter une autre ligne à cause d'une éventuelle correspondance, l'agent ZONEPERT concerné doit alors considérer les agents VEHICULE et ARRET de l'autre ligne.

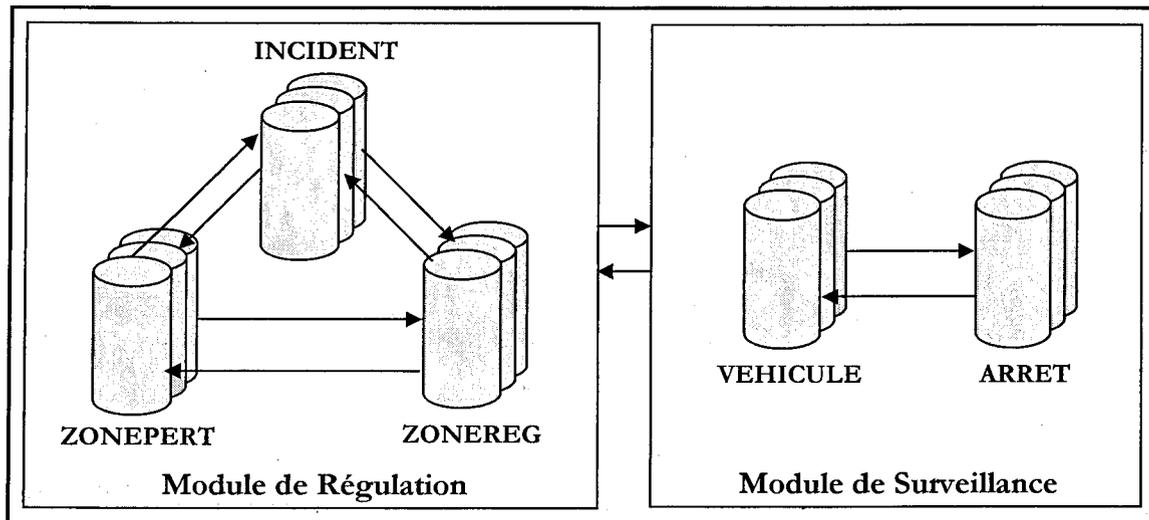


Figure III.5: Organisation du SMAAD.

L'organisation du module de régulation peut en fait être considérée comme une communauté scientifique où les solutions sont construites localement puis communiquées à d'autres agents pour être affinées et testées [Sycara, 98]. Les solutions sont en effet proposées par les agents ZONEPERT et ensuite transmises à l'agent ZONEREG qui les implémente dans la population initiale de son algorithme évolutionniste afin de les améliorer. Les meilleures solutions sont finalement proposées au régulateur par l'intermédiaire de l'agent INCIDENT. Le régulateur reste néanmoins le décideur final.

Toutefois, l'organisation dynamique du module de régulation peut suggérer une communauté d'experts puisque chaque agent est spécialisé sur une tâche particulière du processus de régulation.

III.4.1.4. Architecture des agents

Un agent est l'entité de base d'un Système Multi-Agent. Nous associons aux agents du SMAAD une architecture spécifique qui leur permet d'être autonomes et de posséder leurs propres modes de raisonnement. Le modèle interne des agents considérés contient alors une base de connaissances, une base d'intentions et des modules de communication, de raisonnement et de contrôle. L'architecture interne d'un agent est présentée par la figure III.6 [Laïchour & al, 01] [Saussol, 00]. Ainsi, un agent a :

- Une base de connaissances contenant toutes les données et informations qui concernent l'agent ainsi que les autres agents.
- Une base d'intentions contenant les différents buts que l'agent doit atteindre.
- Un module de communication qui est responsable de la perception et de l'envoi des messages en provenance ou en direction de l'environnement ou des autres agents.
- Un module de raisonnement qui contient les méthodes qui permettent à l'agent de raisonner ou de prendre des décisions sur la tâche à effectuer. Il utilise les données provenant des bases de connaissances et de stratégies.
- Un module de contrôle qui permet d'assurer une cohésion à l'intérieur de l'agent par la gestion des tâches internes. Il est responsable de l'activation des différents modules internes et aussi de la mise à jour des connaissances en fonction de l'évolution de l'agent et de l'environnement.

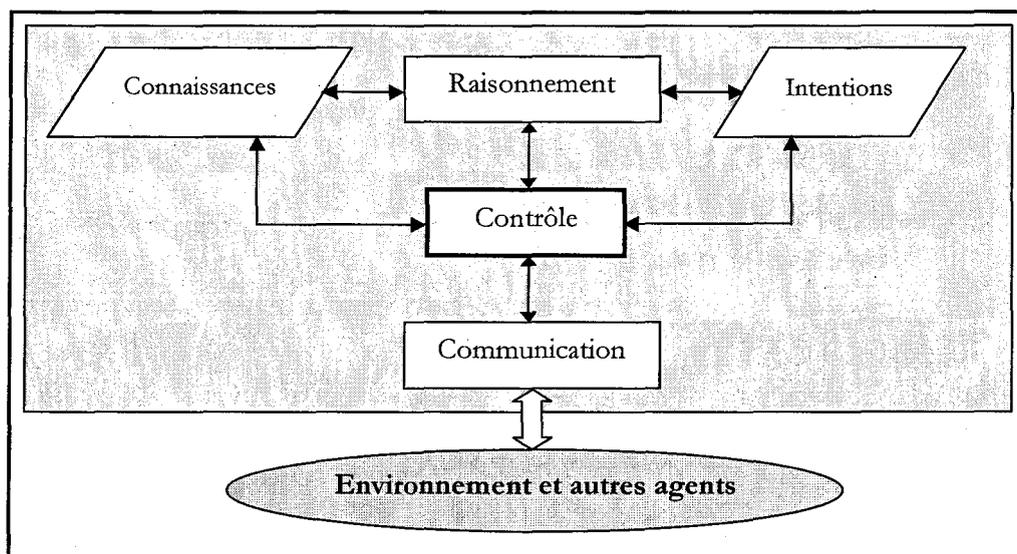


Figure III.6: Modèle d'un agent.

Nous décrivons la nature des messages qui représentent les interactions entre les agents d'après :

- l'expéditeur du message (sa référence),
- le destinataire,
- le contenu du message.

Ainsi, un message s'écrit sous la forme :

$$\langle \text{message} \rangle = \langle \text{expéditeur} \rangle \langle \text{destinataire} \rangle \langle \text{contenu} \rangle.$$

Mis à part son rôle de perception et d'envoi, nous incorporons dans le module de communication les protocoles d'interprétation des différents messages que l'agent peut envoyer ou recevoir. Les actions qui leur sont associées sont gérées par le module de contrôle.

III.4.2. Comportement des différents agents

III.4.2.1. Agents VEHICULE

Ces agents représentent la composante horaire du réseau. A chaque $V_i^l \in \mathcal{V}$, nous associons un agent VEHICULE. Un tel agent a pour but d'appliquer le TMT qui le concerne. Il doit aussi appliquer les mesures de régulation qui lui sont imposées par le régulateur.

La base de connaissances des agents VEHICULE comprend les différentes informations qui décrivent leurs courses et caractéristiques :

- un numéro d'identification unique,
- sa capacité et sa charge,
- son itinéraire et la ligne du réseau qu'il dessert,
- le prochain arrêt à desservir et distance le séparant de cet arrêt,
- son TMT (les horaires théoriques de passage relatifs à son itinéraire et les correspondances),
- sa vitesse, etc.

Les principales actions que nous intégrons dans de tels agents sont :

- Déplacer : action à réaliser quand le véhicule est en inter-stations.
- S'arrêter : action à exécuter quand il est en arrêt dans une des stations du réseau.
- Etre au Dépôt : action quand il est inactif dans le dépôt.
- Mettre à jour sa base de connaissances.

La figure III.7 illustre le comportement des agents VEHICULE à l'aide du formalisme UML. L'action de la mise à jour est incorporée dans les différentes actions de manière à s'exécuter à chaque début de période de mise à jour fixée par les exploitants selon celle du SAE. Par exemple, pour la Compagnie de Transport du Pays de Montbéliard, les données du SAE sont mises à jour au maximum toutes les 10 secondes. L'action de mise à jour est alors gérée par le module de contrôle interne de l'agent.

Par ailleurs, à travers la mise à jour des données, le véhicule exécute les actions de régulation qui lui sont imposées. En effet, les actions agissent sur les horaires de passage, les itinéraires et les durées d'arrêt et de parcours, qui sont inclus dans la base de connaissances de l'agent.

L'action, « S'arrêter », relative à l'arrêt du véhicule dans une station s'accompagne d'un message de « DéclarationArrivée ». En fait, le passage d'un véhicule par une station est représenté par l'envoi de ce message de l'agent VEHICULE correspondant à l'agent ARRET concerné pour lui confirmer l'arrivée. Le contenu de ce message décrit l'heure réelle d'arrivée et le retard éventuel, ainsi que la référence de l'arrêt suivant sur le parcours du véhicule.

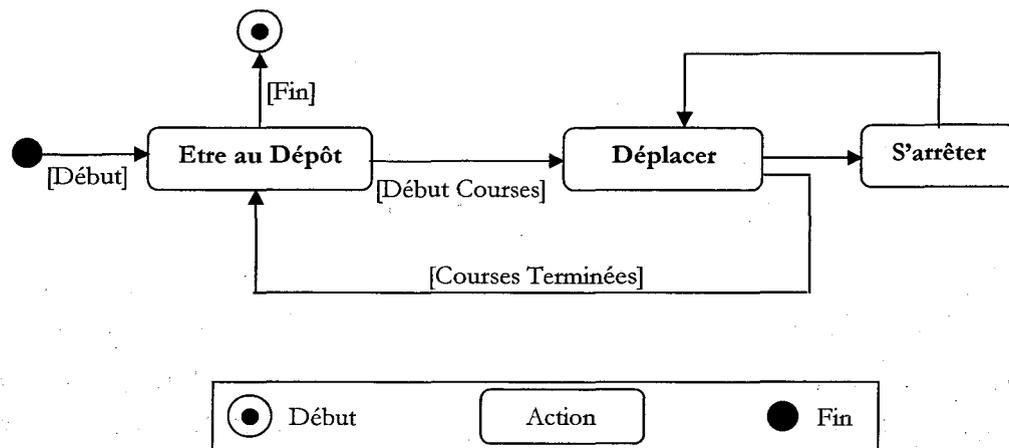


Figure III.7: Comportement des agents VEHICULE.

Les agents VEHICULE ne disposent que d'un protocole de langage réduit. Ils fournissent, en cas de demande, des informations comme leurs positions, une estimation de leurs horaires d'arrivée ou des retards éventuels. Ces deux dernières données sont calculées à travers l'action « Déplacement ».

L'horaire estimé d'arrivée d'un véhicule à une station est donné par le SAE mais peut être aussi calculé d'après :

- la distance séparant les arrêts,
- la vitesse moyenne du véhicule,

- un coefficient de fluidité décrivant l'état de la circulation,
- l'horaire de départ de l'arrêt précédent.

Nous avons alors :

$$\text{Horaire estimé d'arrivée} = \text{Horaire de départ précédent} + \text{coefficient de fluidité} \times \text{distance entre arrêts} / \text{vitesse.}$$

Cet horaire peut aussi être saisi par le régulateur au niveau du SAE dans le cas où il a des informations plus précises sur l'état des véhicules.

III.4.2.2. Agents ARRET

Ces agents, associés à chaque station $S_j^m \in \mathcal{S}$, possèdent une base de connaissances relatives

à :

- la référence de l'arrêt et de la ligne,
- la nature de la station (simple, nœud de correspondance, terminus),
- la liste des véhicules qui s'y arrêtent et leurs horaires de passage,
- les retards ou avances des véhicules attendus,
- le nombre de personnes en attente, etc.

Les agents ARRET ont pour rôle de :

- assurer le respect des TMT,
- détecter les écarts entre les horaires théoriques de passage et les horaires réels,
- créer un agent INCIDENT pour gérer la perturbation,
- signaler les perturbations éventuelles aux arrêts suivants,
- communiquer avec les autres agents ARRET et VEHICULE pour s'informer des horaires de passages.

Nous pouvons déceler alors les actions suivantes que ces agents doivent accomplir :

- Surveiller : correspondant à l'attente d'un message « DéclarationArrivée » du véhicule qui est en route.
- Estimer Retard : pour détecter les perturbations.
- Créer Incident : lorsqu'une perturbation est détectée.
- Tester Retard_Effectif : vérifier l'importance du retard quand le véhicule est arrivé.
- Tester Dernier Véhicule : pour détecter la fin des courses.
- Mettre à jour les connaissances : de même que pour l'agent VEHICULE.

En fait, les agents ARRET surveillent les passages des véhicules afin de détecter les éventuels écarts entre les horaires réels ou estimés de passage et ceux des passages théoriques. En cas de dépassement de la limite tolérée des écarts, fixée par le régulateur, ces agents doivent signaler l'apparition d'une perturbation par la création d'un agent INCIDENT qui aura la responsabilité de la gérer. En établissant des estimations pour les horaires de passage, les agents ARRET peuvent détecter les retards avant que l'horaire théorique ne soit dépassé. Ainsi, en prévoyant les incidents avant leurs apparitions, les agents ARRET contribuent à une régulation plus rapide et plus efficace.

Pour un véhicule V_i^l en route vers l'arrêt S_j^m , c'est l'agent ARRET correspondant qui détecte le retard ou l'avance à travers les écarts entre :

- l'horaire théorique d'arrivée, $(ta_{ij}^{lm})^{théo}$,
- l'horaire réel, $(ta_{ij}^{lm})^{réel}$,
- l'horaire estimé d'arrivée, $(ta_{ij}^{lm})^{estim}$.

En supposant que l'heure réelle courante est t , le retard de V_i^l à S_j^m est signalé par l'agent ARRET concerné quand l'une des conditions suivantes est vérifiée :

- $Retard_Effectif(V_i^l, S_j^m) = (ta_{ij}^{lm})^{réel} - (ta_{ij}^{lm})^{théo} \geq Seuil_Retard$,
- $Retard_Courant(V_i^l, S_j^m) = t - (ta_{ij}^{lm})^{théo} \geq Seuil_Retard$,
- $Retard_Estimé(V_i^l, S_j^m) = (ta_{ij}^{lm})^{estim} - (ta_{ij}^{lm})^{théo} \geq Seuil_Retard$.

Il est évident que :

$$\lim_{t \rightarrow (ta_{ij}^{lm})^{réel}} (Retard_Courant(V_i^l, S_j^m)) = Retard_Effectif(V_i^l, S_j^m).$$

La figure III.8 représente le comportement d'un agent ARRET. Avant l'arrivée du véhicule, le calcul du retard est réalisé à travers l'action « Estimer Retard ». En fait, ce calcul se base sur l'échange des informations entre les agents ARRET et les agents VEHICULE. Aussi, les agents ARRET déclenchent une alarme pour les perturbations quand le maximum des types de retard calculés atteint le seuil toléré.

L'action « Créer Incident » comporte trois tâches importantes :

- Tester Incident : Il faut vérifier si un agent INCIDENT a été déjà créé pour gérer la perturbation causée par le véhicule concerné. Cette tâche sert à éviter la redondance dans la gestion des incidents. Autrement dit, pour une perturbation qui concerne un véhicule dans une zone donnée, un seul INCIDENT doit la gérer.
- Créer : dans le cas où aucun agent INCIDENT ne gère la perturbation considérée, il s'agit d'en créer un par le biais des informations disponibles sur la nature et les caractéristiques de l'incident.
- Informer Arrêt Suivant : envoyer un message d'information à l'arrêt suivant qui se trouve sur l'itinéraire du véhicule perturbé à propos du retard qu'il soit estimé, courant ou réel.

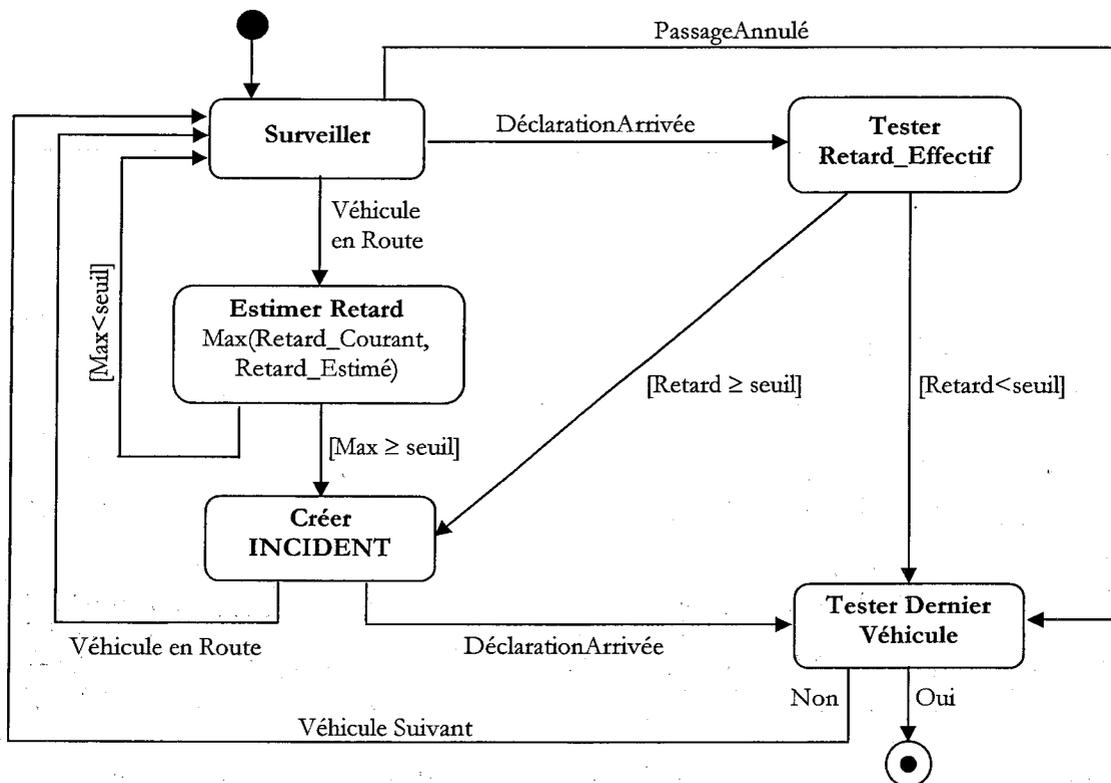


Figure III.8: Comportement des agents ARRET.

III.4.2.3. Agents INCIDENT

Ces agents sont créés dès l'apparition d'une perturbation. Ils sont responsables de la gestion des incidents. Un agent INCIDENT doit contrôler toutes les tâches liées à la régulation comme l'évaluation des perturbations, la proposition de solutions ou le suivi. Il a ainsi une durée de vie liée à celle de la perturbation qui lui est associée. Il ne s'autodétruit qu'à la disparition complète de

la perturbation ou après l'application réussie des manœuvres de régulation ordonnées par le régulateur. L'agent INCIDENT crée et coopère avec :

- un ou des agents ZONEPERT pour le diagnostic et la régulation à un premier niveau stratégique,
- un agent ZONEREG pour la régulation avec une approche évolutionniste.

La base de connaissances des agents INCIDENT, subissant une mise à jour fréquente, concerne les informations sur :

- la nature de la perturbation traitée et sa cause,
- la référence de l'arrêt où l'incident a été détecté et l'horaire de détection, t_{pert}
- le véhicule perturbé,
- les indicateurs d'évaluation des perturbations et des mesures de régulation,
- les agents ZONEPERT associés,
- les décisions à proposer au régulateur,
- les décisions validées par le régulateur, etc.

Nous pouvons définir le rôle d'un agent INCIDENT via les actions qu'il peut réaliser, illustrées par la figure III.9 :

- Créer ZONEPERT : pour le diagnostic de l'incident et la proposition de solutions intermédiaires.
- Attendre Diagnostic et Solutions Primaires : de la part de ZONEPERT.
- Evaluer Diagnostic : en comparant les valeurs des indicateurs choisis selon l'état perturbé ou théorique ou éventuellement régulé. L'agent peut alors, suivant l'importance de la perturbation, choisir ou non de créer ZONEREG.
- Créer ZONEREG : pour une génération de solutions plus avancées avec une approche évolutionniste de régulation.
- Attendre Solutions Régulation : à fournir par ZONEREG en se basant sur des comparaisons avec l'état perturbé du réseau..
- Evaluer Régulation : l'agent évalue l'effet de la régulation par rapport à la situation théorique.
- Proposer Régulation : la ou les solutions trouvées sont proposées au régulateur.
- Attendre Validation : le régulateur doit étudier les solutions données et en choisir une. Il peut éventuellement modifier une des solutions et demander à INCIDENT de l'évaluer (à travers ZONEREG).

- Appliquer et Suivre Régulation : La solution validée doit être appliquée et suivie via la mise à jour imposée par ZONEPERT sur les agents ARRET et VEHICULES concernés.

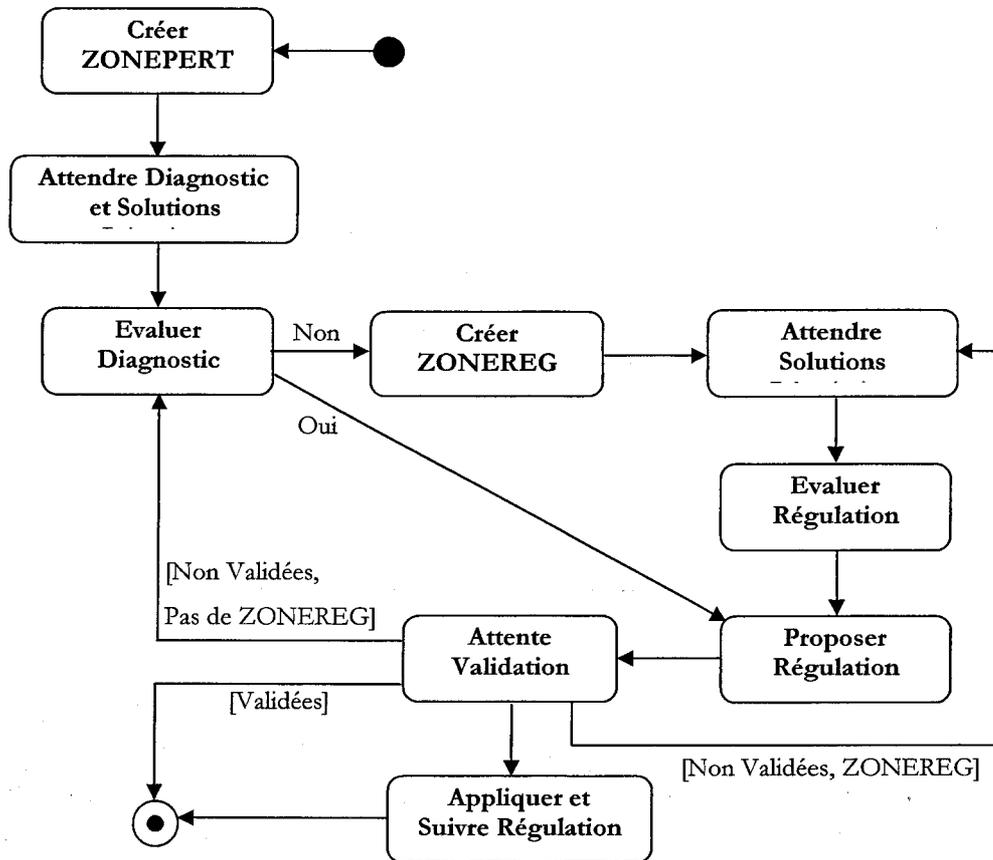


Figure III.9: Comportement de l'agent INCIDENT.

Par ailleurs, chaque agent INCIDENT doit surveiller l'état de son environnement et notamment l'apparition d'autres agents du même type qui peuvent lui être liés. En effet, dans le cas de perturbations liées, les agents INCIDENT concernés doivent coopérer afin de fournir des solutions cohérentes et éviter les conflits. Le nouvel agent INCIDENT doit s'occuper de la résolution simultanée des deux perturbations [Fayech & al, 02a].

Les agents INCIDENT doivent fournir à tout instant au régulateur une ou plusieurs solutions. Ainsi, une durée limite de traitement des données peut être fixée afin de fournir au plus vite de l'aide au régulateur même au moyen de solutions temporaires mais immédiates. Nous verrons que la proposition de solutions à n'importe quel moment est possible grâce au caractère interruptible de l'algorithme évolutionniste de régulation.

III.4.2.4. Agents ZONEPERT

a- Comportement global

Un agent ZONEPERT est créé par un agent INCIDENT. Comme son nom l'indique, cet agent représente la « ZONE PERTurbée ». Il est ainsi responsable de la société d'agents, ARRET et VEHICULE, correspondant à cette zone comme présenté par la figure III.10. La composition de la société d'agents qu'il représente est dynamique, elle peut évoluer en fonction du temps et de l'espace selon l'évolution de la perturbation. Par conséquent, les agents ZONEPERT réalisent aussi une action de mise à jour de leurs connaissances.

Les connaissances d'un agent ZONEPERT sont liées à :

- la liste des agents ARRET et VEHICULE concernée par la perturbation,
- l'agent INCIDENT parent,
- les critères de diagnostic et de régularité, etc.

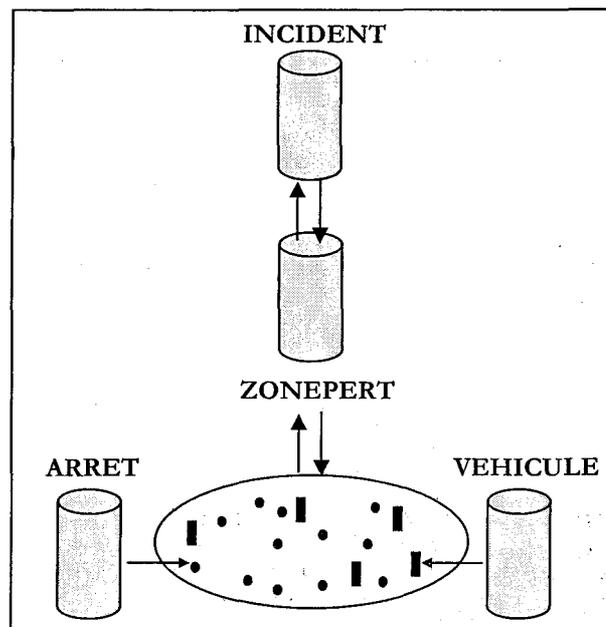


Figure III.10: Etat de l'organisation dynamique lors de l'évaluation des incidents.

Les actions que réalisent les agents ZONEPERT sont :

- Rechercher Zone : la recherche de la zone concernée par la perturbation selon une stratégie définie pour construire l'horizon spatio-temporel.
- Rechercher TMT : collecte des TMT pour les véhicules aux arrêts de la zone.
- Simuler TMP : collecte des informations nécessaires à l'aide des agents VEHICULE et ARRET pour estimer les horaires de passage dans l'état perturbé du réseau (sans

régulation), formant les Tableaux de Marche Perturbés, TMP. Les TMP tiennent compte alors des éventuels retards ou avances des véhicules.

- Contrôler Correspondance : vérifier le bon déroulement des éventuelles correspondances. Si une ou plusieurs correspondances sont impliquées, il faut reconstruire la société d'agents formée par ZONEPERT afin de tenir compte des autres lignes du réseau concernées.
- Diagnostiquer Incident : évaluation de l'importance de la perturbation en fonction des critères de régulation correspondants.
- Fournir Régulation Primaire : recherche de solutions de régulation si la perturbation a été déjà rencontrée. Autrement dit, l'agent ZONEPERT recherche si la perturbation correspond à une situation familière.
- Proposer Résultats : envoi des différentes informations collectées à l'agent INCIDENT.

Le comportement des agents ZONEPERT est représenté par la figure III.11 à travers le séquençement des tâches qu'ils exercent.

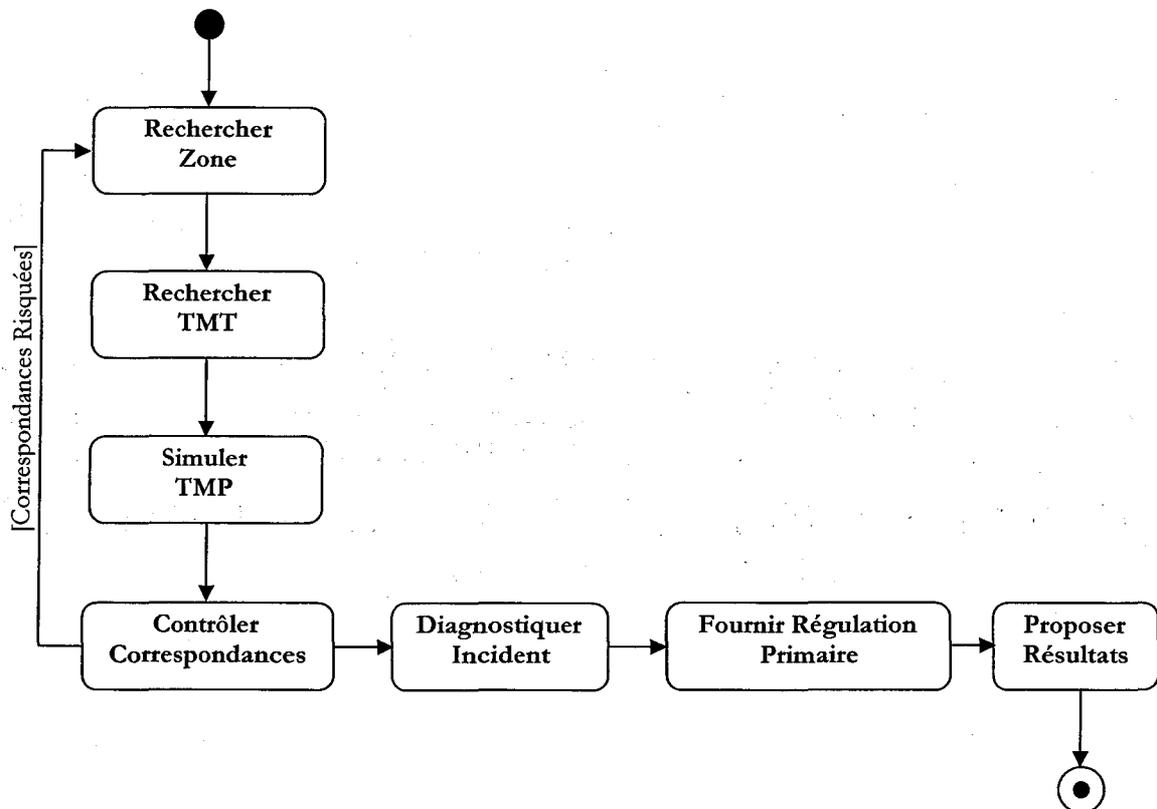


Figure III.11: Comportement d'un agent ZONEPERT.

b- Construction de l'horizon

En fait, la société d'agents formée par un agent ZONEPERT représente l'horizon spatio-temporel \mathcal{H} que nous avons commencé à décrire au paragraphe II.4.1. Elle est composée d'agents :

- VEHICULE : illustrant l'axe temporel de l'horizon et formant $\mathcal{V}^{\mathcal{H}}$,
- ARRET : représentant l'axe spatial et formant $\mathcal{S}^{\mathcal{H}}$.

L'horizon est nécessaire pour délimiter l'étude de la portée des incidents et des mesures de régulation. Il est déterminé à partir de la position des véhicules à l'instant de détection de l'incident, t_{pert}

Comme décrit par la figure III.12, pour maîtriser la formation de lacunes et de « trains de véhicules », ZONEPERT doit au moins regrouper les agents correspondant à ces trois véhicules :

- le véhicule perturbé, V_p^l ,
- son successeur, V_{p+1}^l ,
- son prédécesseur, V_{p-1}^l .

Ainsi, l'évaluation de la perturbation et des décisions de régulation doit concerner le passage de ces véhicules aux arrêts concernés. Ces derniers sont en fait :

- les arrêts en attente du véhicule perturbé, formant « Zone Attente » entre la position du véhicule perturbé et le véhicule précédent,
- les arrêts en attente du véhicule suivant, formant « Zone Précédente » entre la position du véhicule suivant et le véhicule perturbé,
- les arrêts en attente du véhicule précédent, formant « Zone Suivante » entre la position du véhicule précédent et le prédécesseur de ce dernier.

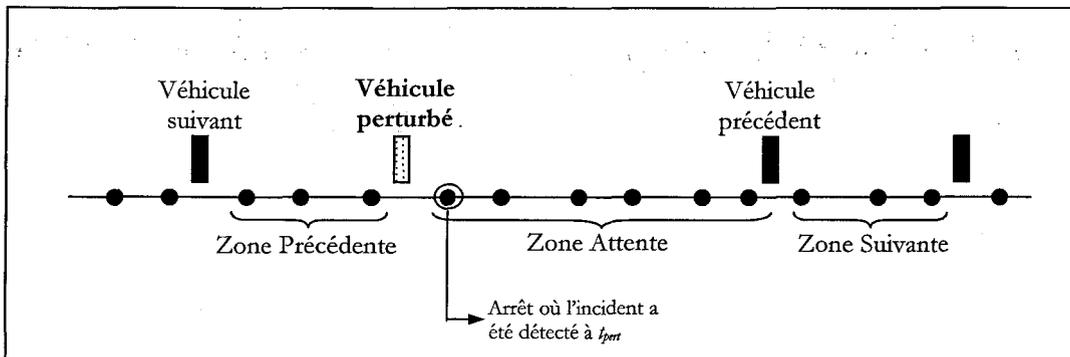


Figure III.12: Construction de l'horizon à partir de l'instant t_{pert} .

Nous avons alors :

- $\{V_{p-1}^l, V_p^l, V_{p+1}^l\} \subset \mathcal{V}^H$,
- $\{\text{Zone Précédente} \cup \text{Zone Attente} \cup \text{Zone Suivante}\} \subset \mathcal{S}^H$,

[Cure & al, 84] propose une estimation du nombre de véhicules qui doivent être considérés dans la régulation, mais en tenant compte seulement des critères de ponctualité et de régularité.

Dans le cas où un nœud de correspondance est inclus dans ZONEPERT et qu'une correspondance risque de ne pas avoir lieu à cause de l'incident, il est nécessaire de réunir les agents VEHICULE et ARRET associés à la ligne qui effectue un échange de passagers avec la ligne perturbée. Le choix des agents est réalisé alors de la même manière en tenant compte du véhicule en correspondance avec le véhicule perturbé et du nœud de correspondance.

c- Diagnostic

La phase de diagnostic réalisée par les agents ZONEPERT comporte l'analyse de la perturbation en vue de l'évaluation de ses conséquences. Dans le cas d'une ligne gérée en fréquence, selon la logique de régularité, [Cure & al, 84] et [Hayat & al, 97] proposent un indicateur de régularité appelé Coefficient d'Irrégularité, *CI* ou *IREG*. Cet indicateur sert à mesurer le respect des horaires d'arrivées en terminus ou en ligne par l'écart type des temps de parcours. Pour les intervalles entre véhicules successifs, ce coefficient à la station S_j^m est égal à :

$$IREG = \frac{(\sigma_j^m)^2}{(E_j^m)^2}$$

avec :

- σ_j^m : l'écart type des intervalles entre les passages successifs à S_j^m ,
- E_j^m : la moyenne de ces intervalles à S_j^m .

Cet indicateur rend compte en fait de l'augmentation du temps d'attente des voyageurs occasionné par un incident. Il est nul quand la régularité des intervalles est parfaite. Il est calculé par l'agent ZONEPERT après la simulation des horaires de passage dans le cas perturbé du réseau où aucune décision n'est prise.

Par ailleurs, afin de connaître la gravité d'un incident quelconque, les perturbations peuvent être évaluées selon les critères sur lesquels la régulation est fondée (cf. II.4.3) :

- régularité,

- ponctualité,
- correspondance.

Ainsi, comme illustré par la figure III.13, on réalise, pour chaque critère, une comparaison entre l'état perturbé du trafic du réseau (avant régulation) et son état normal (théorique).

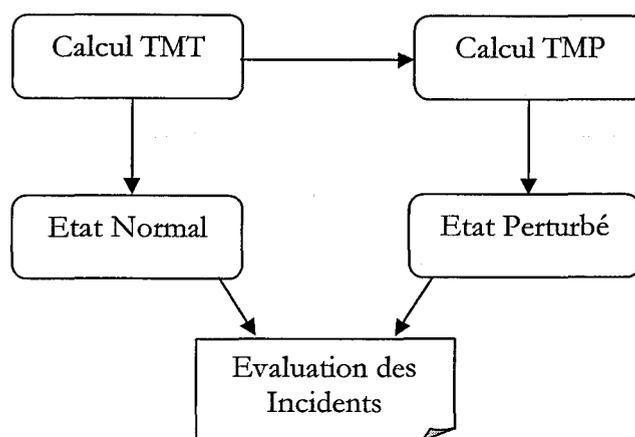


Figure III.13: Evaluation des incidents.

C'est à partir d'une telle comparaison entre les états du réseau que les agents ZONEPERT détectent les éventuelles correspondances qui risquent d'être ratées, ce qui les obligent à tenir compte des autres lignes concernées.

Les agents ZONEPERT calculent alors pour le cas perturbé (en passager-minute) :

- l'attente totale des voyageurs aux arrêts de S^H, AT_o ,
- la durée totale des correspondances, TT_o ,
- la durée totale des trajets à bord des véhicules de V^H, RT_o .

d- Régulation

En se basant sur les données fournies par les agents VEHICULE et ARRET ainsi que sur leurs bases de connaissances, les agents ZONEPERT doivent déterminer les contraintes qui limitent l'application des mesures de régulation. Aussi, ils peuvent définir l'ensemble des manœuvres de régulation qui peuvent être envisagées à travers un premier niveau stratégique de régulation, dans le cas de perturbations qui correspondent à des situations familières.

En fait, d'après [Chaib-draa, 96], les agents peuvent utiliser une base de règles pour gérer leurs actions dans certaines situations familières. Nous nous servons de cette spécification des actions des agents pour les situations de routine, familières ou non familières pour définir les décisions que peuvent proposer les agents ZONEPERT.

Ainsi, les situations familières peuvent être établies après une enquête spécifiée sur les liens entre les mesures de régulation et les perturbations, fondée sur l'expérience des régulateurs. La base de règles associée ne fait qu'intégrer alors l'expertise du régulateur dans le SMAAD. Dans ce but, nous pouvons construire des règles du type « **SI, ALORS** » en s'inspirant d'une classification des incidents proposée par [Saussol, 00] selon l'importance du retard ou de l'avance engendrés. Cette base peut être alimentée et mise à jour par les agents ZONEPERT sous la supervision des régulateurs. Un exemple de règles est présenté par la figure III.14.

| Base de Règles | |
|-----------------------|--|
| R₁ | SI « Retard $R < 2\text{min}$ », ALORS « La régulation ne s'effectue que dans des cas particuliers (correspondance absolue, dernier véhicule) ». |
| R₂ | SI « Retard $2\text{min} \leq R < 4\text{min}$ », ALORS « Une régulation est nécessaire pour rattraper le retard ». |
| R₃ | SI « Retard $R \geq 4\text{min}$ », ALORS « Une régulation est nécessaire pour rattraper le retard ». |
| R₄ | SI « Avance $A > 0$ », ALORS « Le véhicule doit attendre au prochain arrêt de régulation ». |

Figure III.14: Base de Règles de ZONEPERT.

Si l'agent ZONEPERT ne communique aucune proposition de régulation à l'agent INCIDENT, ce dernier se trouve obligé de créer un agent ZONEREG pour chercher des solutions. L'agent ZONEPERT doit alors fournir les données nécessaires à ZONEREG et l'informer des éventuels changements en cours de traitement par l'envoi de messages de mise à jour.

III.4.2.5. Agents ZONEREG

Dans les situations non-familiales, nous chargeons l'agent ZONEREG de la résolution du problème d'optimisation lié à la perturbation concernée. Il est créé par l'agent INCIDENT dès que ce dernier le juge nécessaire. Pour générer des solutions, l'agent ZONEREG doit récupérer les données fournies par INCIDENT et ZONEPERT à propos des positions et horaires de passage (TMT et TMP) des différents véhicules concernés aux différents arrêts situés dans la zone de la perturbation. Il se base aussi sur la première analyse stratégique effectuée par l'agent ZONEPERT.

Sa base de connaissance contient alors :

- la référence de l'incident,

- les TMT et TMP pour l'horizon considéré,
- les différentes informations sur les flux de voyageurs liées à l'horizon temporel,
- les contraintes imposées sur l'application des mesures de régulation, etc.

L'agent ZONEREG utilise une approche évolutionniste de régulation appliquée à l'horizon \mathcal{H} . La coopération entre des approches Agent et des approches évolutionniste, pour la résolution des problèmes distribués, est rarement rencontrée dans la littérature. En effet, les seules applications des algorithmes évolutionnistes dans des systèmes multi-agents se traduisent par un rôle d'apprentissage des stratégies des agents par ces algorithmes [Grefenstette, 92].

L'agent ZONEREG construit d'abord un chromosome adéquat contenant les décisions à entreprendre sur les véhicules aux arrêts considérés. Le codage initial peut être modifié quand :

- de nouveaux agents intègrent la société gérée par ZONEPERT, auquel cas, il faudrait en tenir compte dans la prise de décision en les représentant dans le codage,
- des agents ont quitté la zone de perturbation considérée et ne doivent alors plus être représentés dans le codage.

En effet, compte tenu de l'évolution des perturbations et des états des entités de l'horizon, l'agent ZONEREG doit constamment être informé par l'agent ZONEPERT associé des nouvelles arrivées de données ou des modifications éventuelles. En fait, l'agent ZONEREG ne communique pas avec les agents ARRET et VEHICULE.

Cet agent doit interrompre ses actions et fournir à l'agent INCIDENT les meilleurs résultats trouvés quand :

- la durée limite de traitement, imposée par INCIDENT, est atteinte ($t_{pert} + LimReg$) ;
- il reçoit un ordre d'arrêt de la recherche de INCIDENT à travers un message « Arrêt Recherche » ;
- l'algorithme a terminé sa recherche.

Nous décelons alors les actions suivantes que nous associons aux agents ZONEREG (figure III.15) :

- Attendre Données ZONEPERT : l'agent ne peut pas procéder à la régulation tant qu'il ne dispose pas des différentes données décrivant l'horizon considéré.
- Construire Chromosome : le codage est construit en fonction des caractéristiques des véhicules et arrêts inclus dans \mathcal{H} .

- Lancer Algorithme Evolutionniste : ZONEREG doit avancer dans la recherche des décisions de régulation adéquates. L'approche de régulation par les algorithmes évolutionnistes sera détaillée dans le chapitre suivant.
- Mettre à Jour : lors de la réception d'un message de mise à jour de ZONEPERT, il faut altérer les informations pour adhérer au mieux au contexte de la perturbation. Les modifications résultantes peuvent être importantes quand la reconstruction du codage est nécessaire ou faibles dans le cas contraire.
- Annoncer Résultats : quand l'une des conditions d'interruption citées précédemment est vérifiée, ZONEREG doit fournir les résultats obtenus à INCIDENT.

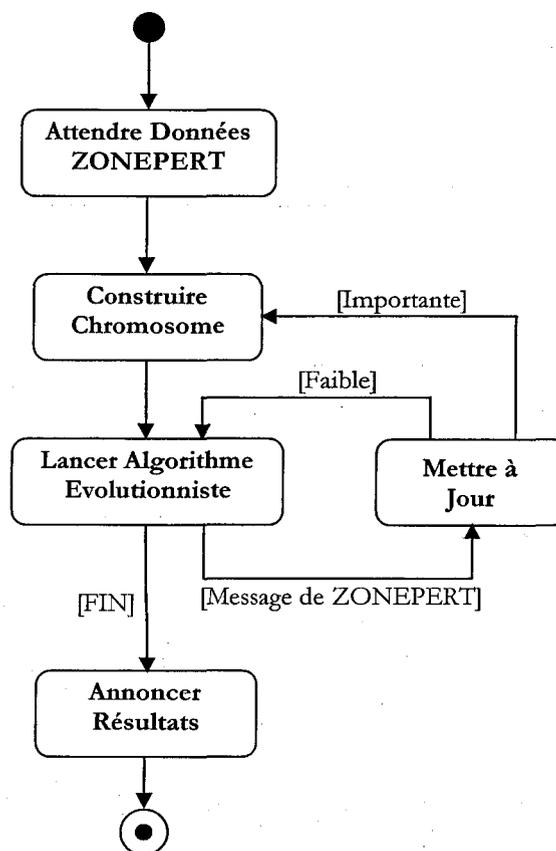


Figure III.15: Comportement d'un agent ZONEREG.

La particularité de cette approche qui réside dans son caractère interruptible, favorise l'utilisation de l'algorithme évolutionniste en tant qu'algorithme Anytime. En fait, les algorithmes ou techniques Anytime sont définis par rapport à leur capacité à fournir à tout instant un ou plusieurs solutions, mais qui peuvent en générer des meilleures s'ils disposent de plus de temps. En effet, plus ces algorithmes disposent de temps, meilleur est le résultat, d'autant plus qu'en

temps réel, ils sont capables de procéder même avec des informations incomplètes [Duvallat & al, 00].

Par ailleurs, si l'algorithme est interrompu lors de l'arrivée d'une nouvelle information importante, l'analyse peut être réutilisée afin de procéder de la même manière sur le nouvel état du système. En effet, les solutions déjà trouvées peuvent être implémentées dans la population initiale de l'algorithme qui va redémarrer en altérant le codage si nécessaire suite aux nouvelles données.

III.4.3. Comportement global du SMAAD

Après avoir décrit les comportements individuels des différents agents du SMAAD proposé, nous présentons une récapitulation des différentes interactions entre les entités du système afin de mieux saisir le processus de régulation. Dans ce but, nous illustrons le comportement du module de régulation du SMAAD par un diagramme de séquence en UML. Pour simplifier, nous avons choisi le cas le plus simple du processus de gestion d'une perturbation. Autrement dit, il n'y a pas de correspondance en jeu, ni de modification au sein de la société d'agents gérée par ZONEPERT, ce qui réduit les tâches de ZONEPERT et ZONEREG. Seules les actions les plus importantes des agents ont été affichées pour raison de clarté.

Nous avons alors, à la figure III.16, le séquençage des opérations réalisées par les agents en vue de limiter les conséquences de la perturbation. Nous prenons INCIDENT1, ZONEPERT1 et ZONEREG1 comme des instances, respectivement, des types d'agents INCIDENT, ZONEPERT et ZONEREG. La création de INCIDENT1 se fait à l'instant t_{pert} . Nous représentons le comportement d'un agent par une ligne verticale.

Nous distinguons, pour résumer, les opérations suivantes :

- Création ZONEPERT : pour le diagnostic et la régulation des situations familières,
- Création ZONEREG : pour la régulation des situations non familières avec les algorithmes évolutionnistes,
- Proposition Régulation : pour que le régulateur puisse vérifier la validité des solutions et en déduire les mesures adéquates,
- Application et Suivi : pour l'application des mesures de régulation.

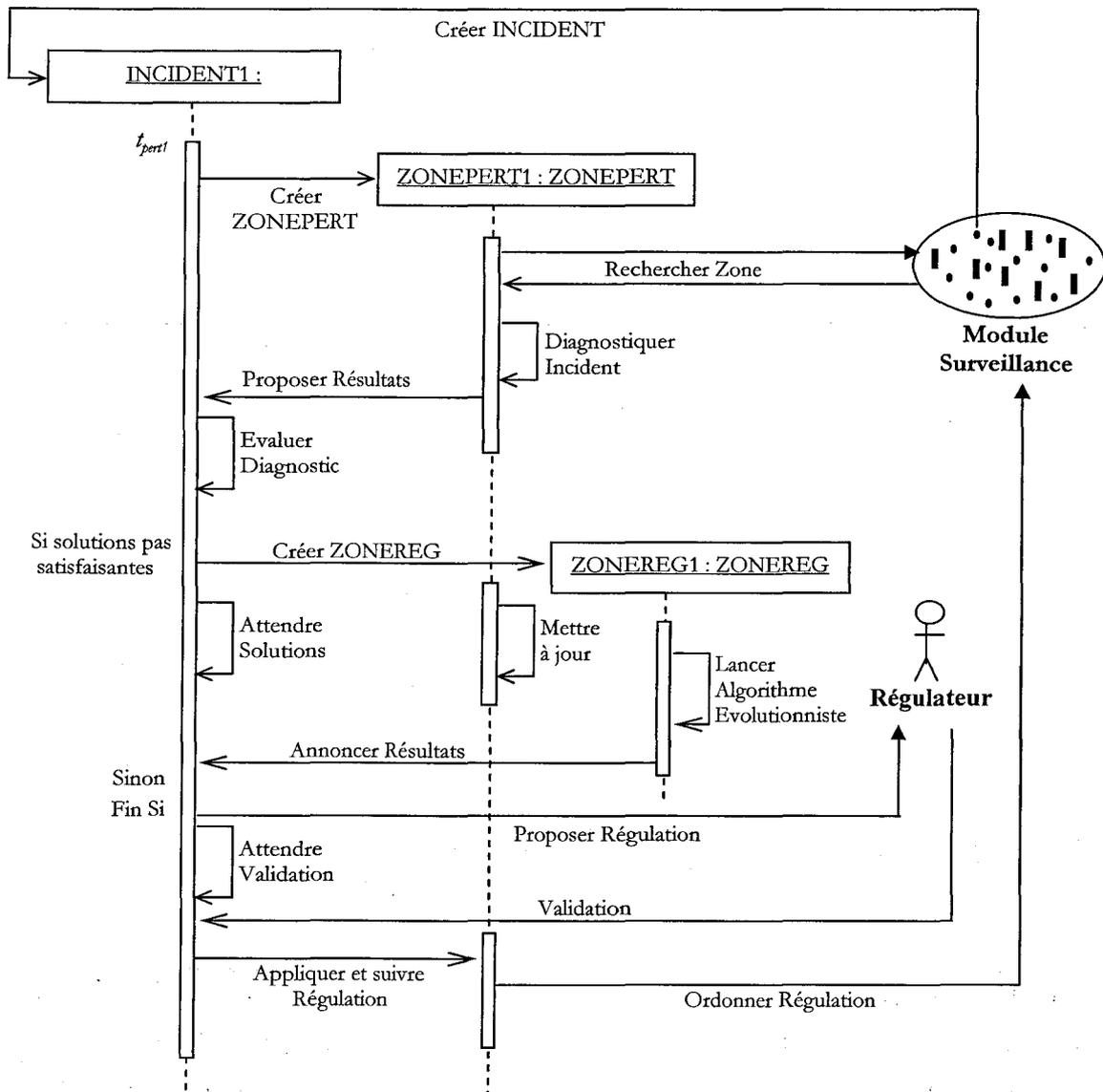


Figure III.16: Interactions dans le module de régulation du SMAAD.

Au cours de cette dernière opération, l'agent INCIDENT est assisté par l'agent ZONEPERT puisque ce dernier est plus en contact avec le module de surveillance. L'application est en fait effectuée par des messages « Ordre Régulation » envoyés par ZONEPERT aux agents VEHICULE et ARRET. Les différentes informations liées aux horaires et itinéraires doivent alors être modifiés selon les décisions validées.

III.5. Conclusion

Nous avons ainsi décrit au début de ce chapitre les caractéristiques des agents et des systèmes multi-agents afin de mieux saisir leur application dans le domaine du transport multimodal. Nous savons que ce genre d'application a déjà fait l'objet de quelques recherches dédiées dans la plupart

des cas uniquement au problème de la correspondance et au réseau des autobus. Le caractère distribué lié à la problématique de la régulation nous a alors incité à concevoir un système d'aide à la décision pour un réseau de transport multimodal en se basant sur une approche orientée Agent. Nous avons appelé ce système, le SMAAD.

Après une décomposition modulaire du processus de régulation, nous avons choisi de traiter dans le SMAAD les cinq types d'agents, intégrés dans une organisation statique ou dynamique afin de résoudre les problèmes créés par les perturbations.

Le module de surveillance du SMAAD a pour rôle de détecter le plus tôt possible les perturbations afin d'anticiper leurs effets et réduire leur importance. En effet, à l'aide des interactions entre les agents ARRET et les agents VEHICULE, les informations sur les horaires de passage sont constamment mises à jour et comparées avec les horaires théoriques des TMT.

Les rôles des agents du module de régulation reposent sur la caractérisation des situations de coordination données par [Chaib-Draa, 96]. En effet, nous avons intégré une base de règles dans les agents ZONEPERT afin de traiter les incidents qui relèvent de situations familières. Dans les situations non familières, la recherche des solutions se fait, par ZONEREG, à travers une technique avancée basée sur les algorithmes évolutionnistes.

De ce fait, nous pouvons affirmer que le SAD que nous proposons est flexible grâce à son adaptation aux différentes situations perturbées. Aussi, il possède un haut niveau de coopération entre les différents agents et les méthodes de résolution (les algorithmes évolutionnistes et les bases des règles de décisions). Le degré d'autonomie des agents et du système lui-même est aussi élevé grâce à l'indépendance de la plupart des actions qu'ils entreprennent.

Toutefois, le rôle du régulateur reste primordial dans le processus étudié. En effet, le SMAAD lui propose les solutions trouvées et ne les applique que si l'une d'elles a été validée. La validation des solutions permet au régulateur de les modifier ou d'imposer ses propres décisions. Nous pouvons alors déceler un autre rôle possible du SMAAD lié à l'apprentissage puisque ces opérations peuvent être effectuées en « hors-ligne » afin d'enrichir la base de règles des agents ZONEPERT liée aux situations familières. Cet apprentissage ne peut se faire qu'avec l'aide des agents ZONEREG. Nous détaillons dans le chapitre suivant l'algorithme évolutionniste de régulation sur lequel ces derniers agents sont fondés.

Chapitre IV : Approche Evolutionniste de la Régulation

IV.1. Introduction

Les agents ZONEREG, en tant que composants du module de régulation du SMAAD, sont impliqués dans le processus de décision. Leur fonction principale est de proposer une ou plusieurs solutions au régulateur. Ces solutions concernent des décisions temporelles et/ou spatiales affectant :

- les horaires de passage des véhicules ;
- les itinéraires des véhicules.

Ces entités qui représentent le réordonnancement des courses des véhicules sont modélisées par les variables de passage, les variables de destination et les variables de modification des temps d'arrêt. La réaffectation des itinéraires aux véhicules résulte en une reconfiguration partielle du réseau selon les conditions d'exploitation et la nature de la perturbation traitée. Par contre, les itinéraires attribués peuvent être les mêmes que ceux qui étaient prédéfinis. Autrement dit, les décisions de régulation n'entraînent pas systématiquement des déviations dans les parcours.

Ainsi, nous présentons dans ce chapitre deux versions d'un algorithme évolutionniste de régulation. Après avoir introduit le principe et les opérateurs des algorithmes évolutionnistes, nous proposons l'approche évolutionniste de régulation sans reconfiguration, qui ne concerne que la régulation des horaires. Il s'agit alors d'une régulation horaire. En effet, à travers cette approche et le codage dynamique des horaires, nous proposons au régulateur un ensemble de décisions sur les temps d'arrêt, établies suivant les critères de régularité, ponctualité et correspondance.

La troisième partie de ce chapitre se base sur la flexibilité de la zone étudiée du réseau, pour la réalisation d'une approche plus générale de régulation avec reconfiguration, ce qui constitue une régulation spatio-temporelle. Par conséquent, nous présentons deux codages possibles des solutions modélisant d'une part l'affectation des arrêts et des horaires et d'autre part les itinéraires et les horaires. Pour ces deux codages, les opérateurs doivent tenir compte des graphes de déplacement des véhicules afin d'établir des solutions cohérentes. Dans le cas contraire, nous proposons un algorithme de recherche d'itinéraires associés à des chemins hamiltoniens. Cet algorithme ainsi que les différents outils de transformation des chemins d'un graphe sont alors détaillés dans cette partie.

IV.2. Les Algorithmes Evolutionnistes

IV.2.1. Principe général

Les Algorithmes Evolutionnistes (AE) sont des métaheuristiques basées sur des métaphores biologiques inspirées des mécanismes d'évolution darwinienne et de la génétique moderne. En vue d'imiter les processus d'évolution observés dans la nature, la première adaptation des premiers AE, à travers les algorithmes génétiques, aux problèmes d'optimisation combinatoire a été réalisée par Holland, dans les années 70 [Holland, 92].

Les algorithmes génétiques ont été ensuite développés par d'autres chercheurs comme Goldberg, Davis et Michalewicz [Goldberg, 89] [Davis, 91] [Michalewicz, 94]. Depuis, d'autres variantes de ces algorithmes ont été aussi développées telles que les algorithmes à stratégie d'évolution [Schwefel & al, 97], la programmation génétique [Koza, 98] et la programmation évolutionniste [Fogel, 94], [Bounsaythip, 98].

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

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

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

IV.2.2. Architecture des algorithmes évolutionnistes

Un algorithme évolutionniste est un algorithme itératif qui possède une architecture bien définie. Il procède par différentes étapes en vue de résoudre un problème d'optimisation. Comme illustré par la figure IV.1, il s'agit en effet des étapes de [Schwefel & al, 97] :

- **Genèse** : première phase de l'algorithme dans laquelle la population initiale est construite d'une manière aléatoire ou à travers des résultats issus d'autres techniques d'optimisation.
- **Evaluation** : consiste à calculer la valeur de la fonction coût pour chaque individu.
- **Sélection** : le choix des éléments les plus adaptés pour la formation de la nouvelle génération.
- **Recombinaison et mutation** : phase de reproduction dans laquelle une nouvelle population est construite à partir des individus sélectionnés via des opérateurs de croisement et de mutation.
- **Arrêt** : il s'agit d'un test de l'efficacité de l'algorithme à travers une valeur de la fonction objectif à atteindre, le nombre d'itérations ou le temps d'exécution. La solution courante est prise quand ce test est vérifié ; sinon, les étapes sont recommencées à partir de l'évaluation.

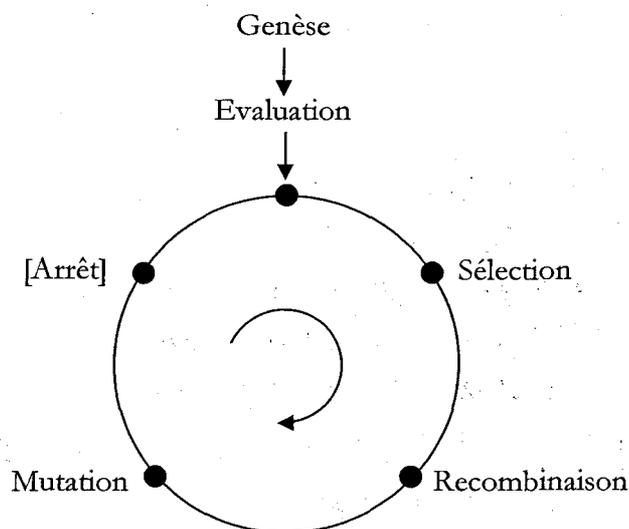


Figure IV.1: Architecture générale d'un algorithme évolutionniste.

Nous détaillons les principales étapes réalisées par les AE dans la section suivante.

IV.2.3. Mise en œuvre des algorithmes évolutionnistes

La mise en œuvre d'un algorithme évolutionniste nécessite plusieurs étapes de conception et de choix de certains paramètres. En effet, il est important de choisir le codage des solutions, l'opérateur de sélection et le processus de renouvellement de la population via les opérateurs de croisement et de mutation.

IV.2.3.1. Choix d'un codage

Il est nécessaire de commencer d'abord par la représentation génétique des solutions du problème, c'est à dire par le codage approprié des solutions sous forme de chromosomes ou génotypes. Le codage peut être direct quand il y a une correspondance biunivoque entre l'ensemble des chromosomes et celui des solutions qui leur correspond. Il peut être indirect quand un générateur doit être utilisé pour définir la solution associée à un chromosome. Aussi, il peut être mixte lorsqu'il combine les deux codages [Aloulou, 02].

Exemple IV.1 : Supposons la problématique de la régulation ne s'intéresse qu'à la résolution du problème d'affectation des arrêts à un véhicule V_i^l . Une solution non complète serait alors un ensemble d'affectation d'arrêts à ce véhicule sans le choix de l'itinéraire. Nous pouvons suggérer, dans la figure IV.2, un chromosome possible décrivant les variables de passage a_{ij}^{lm} aux stations S_j^m de S^M . Nous rappelons que a_{ij}^{lm} est nul si V_i^l ne passe pas par S_j^m et est égal à 1 sinon (cf. II.4.2.1). Les gènes du chromosome correspondant au véhicule concerné sont associés alors à l'affectation ou non d'un arrêt. Le nombre de gènes est celui des arrêts possibles.

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

Figure IV.2: Exemple de codage d'un chromosome.

IV.2.3.2. Opérateur de sélection

La sélection consiste à choisir les individus de la population courante qui vont survivre et se reproduire. Elle est réalisée en fonction de la valeur de la fonction coût qui évalue les solutions. L'opérateur de sélection joue ainsi un rôle primordial dans la détermination de la performance des nouvelles générations et donc dans l'amélioration de la qualité des solutions.

Plusieurs techniques de sélection sont utilisées par les chercheurs ; elles peuvent être déterministes ou stochastiques [Bounsaythip, 98] :

- La sélection déterministe consiste par exemple à garder les meilleurs individus au sens de leurs coûts et de rejeter le reste, ce qui implique leur classement ou « ranking ».
- Une sélection stochastique peut être réalisée par la technique de la Roulette pondérée [Goldberg, 89], où chaque individu occupe une surface de la roue proportionnelle à sa fonction coût. En supposant que f_i est la valeur de la fonction coût associée au i -ème

individu, la probabilité de sélection de ce dernier est en fait égale à $\frac{f_i}{f_s}$, avec $f_s = \sum_j f_j$.

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

IV.2.3.3. Opérateur de croisement

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

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

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

- **Croisement à un point** : il s'agit de choisir au hasard, un point de croisement pour chaque couple de chromosomes et d'effectuer un échange des ensembles d'allèles se trouvant de part et d'autre de ce point entre les deux parents (figure IV.3).

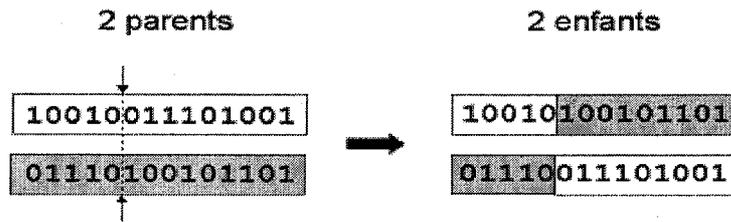


Figure IV.3: Exemple d'un croisement à un point.

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

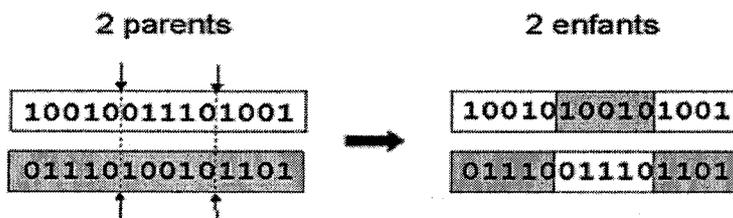


Figure IV.4: Exemple de croisement à deux points.

- **Croisement uniforme** : il opère à l'aide d'un masque qui représente les tirages aléatoires pour décider de la transmission de la valeur de l'allèle à l'un ou l'autre des descendants. Si, à la même position que l'allèle, la valeur du masque est égale à 1, l'allèle du parent 1 passe à celui de l'enfant 1 et l'allèle du parent 2 passe à l'enfant 2. Sinon, c'est l'inverse qui se produit (figure IV.5).

| | |
|----------|---------------------|
| Parent 1 | 1 0 0 0 1 1 1 1 1 0 |
| Parent 2 | 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 |
| Masque | 1 0 0 1 1 1 0 0 1 0 |
| Enfant 1 | 1 1 1 0 1 1 0 0 1 1 |
| Enfant 2 | 1 0 0 1 0 0 1 1 0 0 |

Figure IV.5: Exemple de croisement uniforme.

IV.2.3.4. Opérateur de mutation

La mutation est définie comme étant la modification aléatoire de la valeur d'un allèle dans un chromosome. La figure IV.6 illustre un exemple de mutation appliquée à la position 9 d'un chromosome binaire. Elle joue le rôle de bruit et empêche l'évolution de se figer et garantit que l'optimum global peut être atteint. Cet opérateur évite donc une convergence prématurée vers les

optimums locaux. Il est appliqué avec une probabilité fixée, p_m . Le taux de mutation rend la recherche trop aléatoire s'il est trop élevé. Par ailleurs, s'il est trop faible, la recherche risque de stagner.

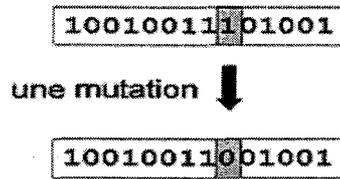


Figure IV.6: Exemple de mutation.

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

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

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

IV.2.4. Caractéristiques des algorithmes évolutionnistes

Les AE sont capables de s'adapter à n'importe quel espace de recherche. Grâce à leur caractère modulaire, ces algorithmes ont une indépendance presque totale du problème à optimiser. Ils demandent une mesure de la qualité de la solution et nécessitent la définition de l'espace par un codage et des opérateurs qui lui permettent de le parcourir efficacement.

Le principal avantage des AE par rapport aux autres techniques d'optimisation (énumératives, « hill-climbing », etc.) consiste en une combinaison de :

- l'exploration de l'espace de recherche, basée sur des paramètres aléatoires, grâce à une recherche parallèle,
- l'exploitation des meilleures solutions disponibles à un moment donné.

Néanmoins, comme pour les méthodes par voisinage, il faut tenir compte des spécificités du problème pour concevoir ou choisir le codage et les opérateurs les plus adéquats. En outre, il est nécessaire d'effectuer plusieurs expérimentations pour ajuster les paramètres de l'algorithme (taille de la population, probabilités de croisement et de mutation, nombre de générations, etc.), ce qui constitue un des inconvénients des AE.

IV.2.5. Les algorithmes évolutionnistes et le domaine du transport

Grâce à leurs différents avantages liés à la résolution des problèmes d'optimisation combinatoire, les AE ont connu un réel développement dans le domaine de l'ordonnancement en général et dans l'ordonnancement des systèmes de production en particulier. En effet, [Pierreval & al, 03] présente une étude des différentes approches évolutionnistes dans l'organisation de la production cellulaire et la conception des ateliers de production et des systèmes d'assemblage. [Caux & al, 94] présente également les applications des algorithmes génétiques aux problèmes d'ordonnancement. Aussi, ces algorithmes ont été utilisés pour la résolution des problèmes du voyageur de commerce (PVC), de tournée de véhicules et aussi de contrôle du trafic aérien.

En ce qui concerne le contrôle du trafic aérien, [Hansen, 03] et [Delahaye & al, 96] abordent ce domaine par des approches évolutionnistes. En effet, [Delahaye & al, 96] traite, à travers des approches génétiques, trois problématiques liées à :

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

[Ciesielski & al, 98] et [Stevens, 95] présentent une approche évolutionniste pour l'ordonnancement des temps d'atterrissage des avions sur un nombre limité de pistes. Selon [Ciesielski & al, 98], le codage correspondant illustre pour chaque avion, la piste sur laquelle il devrait atterrir et le temps de l'atterrissage (en nombre de périodes de 30 secondes) suivant l'heure courante. La figure IV.7 présente un exemple pour ce codage. Nous pouvons alors déduire que l'avion 1 va atterrir à 12:00 sur piste 0, que l'avion 2 va atterrir à 12:03 sur piste 1, que l'horaire d'atterrissage de l'avion 3 est de 12:04:30 sur piste 0, etc.

| 1 | 2 | 3 | 4 | ... |
|-------|-------|-------|--------|-----------|
| 0 0 | 6 1 | 9 0 | 12 0 | |

Figure IV.7: Exemple de codage de l'ordonnancement des atterrissages.

La particularité de l'approche proposée par Ciesielski réside dans le caractère « anytime » de l'algorithme évolutionniste. En effet, l'ordonnancement des horaires d'atterrissage est effectué en temps réel.

Le Problème du Voyageur de Commerce (PVC) représente un voyageur de commerce qui doit passer par un certain nombre de villes avec un minimum de temps de parcours total. Sa tournée doit être planifiée de manière à passer une seule fois par chaque ville. [Potvin, 96] aborde ce problème par une approche génétique en codant les solutions par des chromosomes contenant la séquence ordonnée de passages aux différentes villes. La figure IV.8 présente un exemple d'un tel codage pour un problème à 9 villes. Potvin présente les différents opérateurs de croisement spécifiques respectant les contraintes du problème.

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 3 | 2 | 6 | 4 | 8 | 7 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

Figure IV.8: Exemple de codage pour un PVC.

[Ngamchai & al, 00] présente un algorithme génétique pour la conception des lignes d'un réseau de bus avec localisation des nœuds de correspondance. Nous avons déjà présenté au paragraphe II.2.4 la modélisation graphique proposée pour ce problème. En fait, Ngamchai présente un individu en tant que collection de chemins. Chaque chemin représente une route et le nombre de chemins dans un individu représente le nombre de véhicules. L'individu lié au graphe illustré par la figure II.4 correspond alors à :

Individu 1 [1,2,3,4],[1,5,6,9,10,11],[4,7,8,9,12,13].

L'approche génétique proposée possède alors un algorithme de génération des routes. Ce dernier établit des routes avec la contrainte de desservir tous les nœuds en ignorant la demande, avec des techniques de séparation. Différents opérateurs génétiques (croisement, fusion, rupture, etc.) sont présentés et sont appliquées sur les individus de la population avec des probabilités qui leur sont attribuées.

[Zhu, 95] présente un codage génétique similaire pour un problème de tournée des véhicules. Néanmoins, il n'effectue pas de séparation entre les routes puisqu'elle restreint la validité des solutions qui résultent des opérations de croisement. Cette séparation est déduite des chromosomes après un décodage spécifique.

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

[Deb & al, 98] présente une approche génétique de planification des horaires d'un réseau de bus. L'approche a pour objectif de minimiser la durée totale d'attente des passagers. Les variables de décision illustrées dans le codage correspondent aux temps de parcours et aux temps d'arrêt.

IV.3. Approche Evolutionniste de la Régulation Sans Reconfiguration, AERSR

IV.3.1. Objectif

Appliquée par les agents ZONEREG du SMAAD, nous présentons dans cette partie une approche évolutionniste de la régulation qui concerne la régulation avec seulement la réaffectation des horaires aux véhicules de $\mathcal{V}^{\mathcal{H}}$. Autrement dit, nous supposons que les graphes correspondants aux itinéraires des véhicules sont conformes aux déplacements associés aux TMT et ne peuvent pas être modifiés. Ainsi, selon la formulation décrite dans II.4.2 et pour cette première version de l'approche évolutionniste de régulation, nous ne nous intéressons pas au problème d'affectation des nœuds et des arcs du graphe de déplacement $G^{\mathcal{R} \times \mathcal{H}}$.

L'objectif de la régulation correspond alors à la recherche des meilleurs horaires de passage des véhicules au sens des critères de correspondance, de régularité et de ponctualité. Pour l'instant, les mesures de régulation concernent la modification des horaires à travers les durées des arrêts aux stations et les temps de parcours inter-stations.

IV.3.2. Codage

Un individu représente une solution de régulation pour l'horizon \mathcal{H} concerné. Si nous supposons que $\mathcal{S}^{\mathcal{H}}$ contient s arrêts et que $\mathcal{V}^{\mathcal{H}}$ contient ν véhicules, le chromosome de régulation est illustré par une matrice $s \times \nu$ dont chaque cellule correspond aux décisions prises pour un véhicule au niveau d'un arrêt. Ces décisions peuvent être : avancer, retarder, dévier, transborder, injecter, etc. La figure suivante illustre un codage générique des décisions pour l'horizon considéré.

Pour déterminer les nouveaux horaires de passage, il s'agit alors de fixer les modifications apportées sur les durées des arrêts et des parcours. La décision est alors exprimée à travers le couple $(\varepsilon_{ij}^{lm}, \delta_{ijk}^{lmr})$ pour V_i^l à S_j^m .

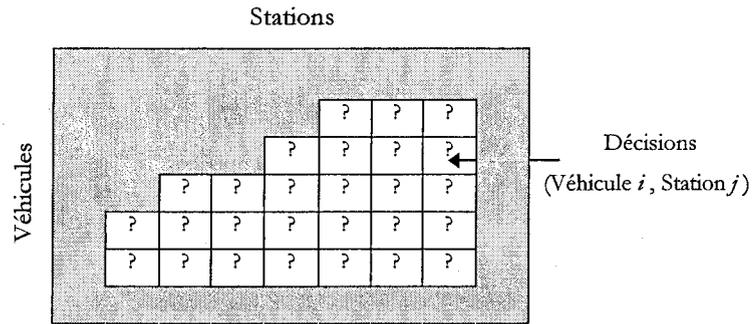


Figure IV.9: Codage générique des décisions pour l'horizon étudié.

Toutefois, dans la plupart des cas réels, il est très improbable que dans des conditions perturbées, les véhicules puissent accélérer. Nous considérons ainsi seulement les décisions de ralentissement des véhicules et par conséquent les valeurs positives de δ_{ijk}^{lmr} . D'autre part, la décision de ralentir V_i^l de x minutes lors de son parcours de S_j^m vers S_k^r est équivalente à celle de l'ajout de x minutes au temps d'arrêt initial à S_k^r . En effet, suite à la première décision, le temps d'arrivée de V_i^l à S_k^r est retardé de x minutes par rapport à celui résultant de la deuxième décision. Les temps de départ de S_k^r sont égaux pour les deux décisions. Néanmoins, pour la première décision, les passagers en attente de V_i^l à S_k^r doivent attendre x minutes supplémentaires dans la station alors qu'ils percevraient moins cette durée s'ils étaient à bord du véhicule comme pour la deuxième décision.

Par conséquent, nous ne traitons dans cette approche que la durée de l'arrêt aux stations. Il revient alors de ne chercher que les variables de décision ε_{ij}^{lm} , comprises entre 0 et ε_{max} . Nous construisons alors le chromosome illustré par la figure IV.10. Les lignes de la matrice du chromosome représentent les modifications des temps d'arrêts des ν véhicules et les colonnes représentent les s arrêts. Le codage considéré est appelé Codage des Horaires, CH.

Il est important de noter que puisque l'environnement étudié est dynamique, le codage qui le représente l'est aussi. En effet, les agents ZONEPERT peuvent étendre ou réduire la microsociété d'agents qu'ils gèrent, en ajoutant ou éliminant des véhicules ou stations de l'horizon, ce qui nécessite une modification du codage par les agents ZONEREG (cf. III.4.2.5).

Arrêts de \mathcal{S}^H

| | 1 | 2 | 3 | 4 | ... | s-1 | s |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | ... | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | ... | 1 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 2 | 0 | ... | 0 | 0 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| v-1 | 0 | 1 | 0 | 0 | ... | 3 | 0 |
| v | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 |

Véhicules de \mathcal{V}^H

Figure IV.10: Codage CH d'une solution de régulation des horaires.

Exemple IV.2 : Nous présentons à la figure IV.11 un exemple de petite taille illustrant la fonction des chromosomes dans le processus de régulation par la présente approche. Nous considérons alors une perturbation, détectée à $t_{dis} = 10:13$, qui se traduit par un retard de 3 minutes pour le véhicule 2 à la station 2. En se basant sur les horaires du Tableau de Marche Théorique (TMT), nous estimons les horaires perturbés afin de construire le Tableau de Marche Perturbé (TMP) pour un horizon spatio-temporel choisi (3 véhicules et 4 arrêts). Un exemple de chromosome associé à une solution de régulation est ensuite présenté ainsi que le Tableau de Marche Régulé (TMR) qui en résulte. Pour simplifier les représentations, nous ne considérons, pour l'instant, que les horaires de départ dans les différents tableaux de marche.

Remarque IV.1 : Il est à noter que la régulation ne concerne que les horaires qui sont supérieurs à celui de la détection de la perturbation, t_{dis} .

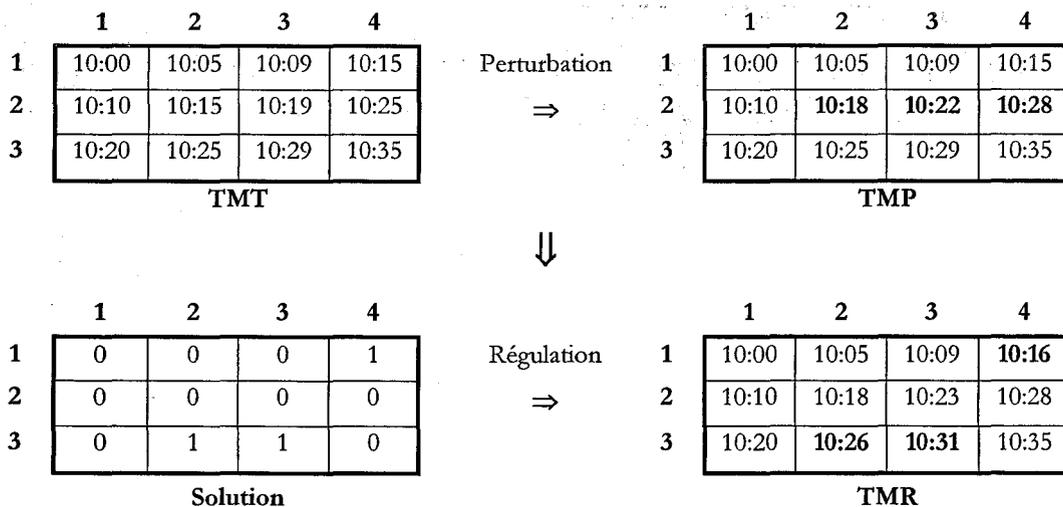


Figure IV.11: Exemple de régulation d'une perturbation par l'approche évolutionniste.

IV.3.3. Fonction d'évaluation

La fonction d'évaluation des individus est relative aux critères de régulation qui doivent être optimisés, notamment la régularité, la correspondance et la ponctualité. Cette fonction doit évaluer l'amélioration résultant de la régulation par rapport à l'état perturbé. Il s'agit alors de maximiser simultanément, selon la nature et l'importance de la perturbation, trois fonctions liées aux critères en question :

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

Calculées par les agents ZONEPERT pour le diagnostic, nous rappelons que AT_0 , TT_0 et RT_0 sont respectivement, dans l'état perturbé, l'attente totale, la durée totale des correspondances et la durée totale des trajets, alors que AT , TT et RT correspondent aux mêmes valeurs mais dans l'état régulé du trafic. La formulation mathématique des différents critères se trouve dans les paragraphes II.4.3 et III.4.2.4. Les fonctions sont exprimées en passagers-temps puisque toutes les durées sont pondérées par le nombre de passagers.

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

Les algorithmes évolutionnistes sont bien adaptés à l'optimisation multi-objectif [Deb, 99]. [Talbi & al, 01] et [Murata & al, 96] abordent l'application d'une approche évolutionniste multicritère d'optimisation aux problèmes de « Flow Shop ». [Talbi, 00] présente un algorithme génétique Pareto pour l'optimisation multicritère basée sur la notion de dominance dans la sélection des solutions générées. Cet algorithme utilise alors des opérateurs qui traitent séparément les différents objectifs. En fait, si nous considérons la dominance entre les individus dans notre problème, on constate, par définition, que :

x domine y lorsque $\forall 1 \leq c \leq 3, Cr_c(x) \geq Cr_c(y)$.

Une solution est alors non dominée quand elle n'est dominée par aucune autre. Ce genre de solution est favorisée par les opérateurs de sélection adaptés à l'algorithme génétique Pareto. Nous retrouvons à ce propos plusieurs méthodes basées sur la classification des individus selon leur dominance, « ranking » [Talbi, 00].

Il est toutefois possible de transformer le problème en monocritère par agrégation des fonctions à optimiser en une seule fonction objectif d'une manière linéaire. En effet, nous pouvons utiliser un poids pour chaque critère afin de représenter son importance relative dans la recherche des solutions. Ainsi, en supposant que α_1 , α_2 et α_3 sont les poids des critères de régularité, correspondance et ponctualité, nous pouvons maximiser :

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

$$\text{avec } \sum_{c=1}^3 \alpha_c = 1.$$

Les poids des critères sont déterminés selon les préférences du régulateur ou la nature de la perturbation. Dans les deux cas, ils sont transmis à l'agent ZONEREG par l'agent INCIDENT responsable de la gestion de la perturbation correspondante. Le régulateur peut attribuer des notes aux critères ou les classer par ordre de préférence.

Nous proposons de sauvegarder à chaque évaluation un certain nombre des meilleurs individus dans la population courante. En effet, pour adhérer au caractère « anytime » de l'algorithme de régulation, à chaque instant nous avons accès aux meilleurs individus trouvés pour les proposer au régulateur.

Remarque IV.2 : D'après les premières simulations de l'AERSR, nous avons remarquées que le nombre de décisions proposées au niveau des limites de l'horizon spatio-temporel est trop important. En effet, la fonction d'évaluation traite des intervalles de temps, représentant les trajets ou l'attente. Par conséquent, des effets « de bord » apparaissent sur les limites de l'horizon. Pour y remédier, nous ajoutons dans l'horizon des stations et des véhicules qui servent seulement dans le calcul des coûts des solutions. Nous n'autorisons pas de décisions sur ces éléments.

IV.3.4. Algorithme

L'AERSR commence par une étape d'initialisation dans laquelle il y a la construction de la population initiale P (étape 0), comme décrit par la figure IV.12. Cette dernière peut être formée, le cas échéant, à partir des décisions primaires recommandées par les agents ZONEPERT après le diagnostic et avec des mesures de duplication. Faute de solutions primaires, l'agent ZONEREG en effectue aléatoirement la genèse. Dans la même étape, les individus de la population initiale sont évalués pour commencer directement la sélection dans l'étape suivante (étape 1). Cette sélection conduit à une population intermédiaire, P^* , formée des meilleurs individus.

Dans les étapes 2 et 3, les individus de P^* subissent des croisements et des mutations avec des probabilités de p_{crois} et p_{mut} pour former une nouvelle population P . L'étape de l'évaluation est ensuite réalisée pour calculer les coûts des individus. Dans ce but, il est nécessaire de calculer, pour chaque solution, les horaires régulés et l'impact des décisions sur la charge des véhicules (nombre de personnes montant et descendant). L'étape 5 consiste en une comparaison partielle entre les parents et les enfants, pour en garder les meilleurs. Par exemple, si parent 1 et parent 2, de la population P^* , ont subi un croisement pour générer enfant 1 et enfant 2 dans P . Si le coût de parent 1 est meilleur que celui de enfant 1, parent 1 remplace enfant 1 dans P . De même, nous effectuons une comparaison entre parent 2 et enfant 2. Puisque c'est une comparaison partielle, nous ne prenons effectivement pas les deux meilleurs des quatre individus pour ne pas risquer de perdre la diversité des solutions. Aussi, nous prenons le meilleur parmi l'individu et sa réplique mutée. Le processus de comparaison partielle sert alors à contrôler l'évolution des individus tout en respectant la diversité des populations.

La dernière étape consiste en un test de la condition d'arrêt. Cette condition est pour l'instant liée au nombre de générations de l'algorithme. Elle peut cependant être liée à la durée d'exécution de l'algorithme, fixée par l'agent INCIDENT selon l'urgence de la régulation. Toutefois, l'algorithme peut être interrompu si l'agent ZONEREG reçoit un ordre de l'agent INCIDENT à ce propos. Dans ce cas, les meilleures solutions atteintes sont fournies à l'agent INCIDENT. Si le test n'aboutit pas, l'algorithme reprend, pour la génération suivante, à partir de l'étape de sélection.

Les opérateurs de sélection, croisement et mutation sont décrits dans les paragraphes suivants.

Etape 0 : Initialisation

Générer population initiale P à la génération $g=0$.
 Evaluer les individus de la population initiale.

Etape 1 : Sélection

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

Etape 2 : Croisement

Choisir aléatoirement deux parents de P^* .
 Effectuer croisement avec une probabilité de p_{crois} .
 Mettre les enfants et les parents non croisés dans P .

Etape 3 : Mutation

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

Etape 4 : Evaluation

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

- le Tableau de Marche Régulé résultant,
- les nombres de personnes montant et descendant de chaque véhicule à chaque arrêt,
- la charge résultante des véhicules au départ de chaque arrêt.

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

Etape 5 : Comparaison

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

Etape 6 : Test Arrêt

SI (le nombre spécifié de générations est atteint) OU (un ordre d'arrêt a été imposé à l'agent ZONEREG), terminer l'algorithme et donner les solutions atteintes.

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

Figure IV.12: Algorithme évolutionniste de régulation sans reconfiguration.

IV.3.5. Opérateur de sélection

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

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_j f_j}. \quad (\text{IV.2})$$

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

$$E_i = Np_i. \quad (\text{IV.3})$$

La population intermédiaire n'étant pas totalement complète, dans la deuxième phase de la sélection, la probabilité de sélection de l'individu i plus de $\text{ent}(E_i)$ fois est égale à la différence ou reste R_i :

$$R_i = E_i - \text{ent}(E_i) \quad (\text{IV.4})$$

où $\text{ent}(E_i)$ est la partie entière de E_i .

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

Exemple IV.3 : Supposons que l'individu 0 a une probabilité de sélection $p_0=0,046$. Dans une population de 100 individus, E_0 devient égal à 4,6. Nous faisons alors 4 copies de cet individu dans la population intermédiaire. Aussi, il peut être sélectionné plus que 4 fois avec une probabilité de $R_0=0,6$.

IV.3.6. Opérateurs de croisement et de mutation

IV.3.6.1. Croisement

Le chromosome de régulation étant sous la forme d'une matrice, nous pouvons effectuer un croisement sur les lignes ou sur les colonnes. En effet, puisque les lignes de la matrice représentent les décisions sur les véhicules, un croisement sur les lignes consiste à échanger ces décisions entre deux individus pour former deux enfants. De même, les colonnes du chromosome étant des décisions sur les arrêts, un croisement sur les colonnes représente l'échange de ces décisions entre les individus.

Nous pouvons toutefois effectuer des croisements des décisions sur des véhicules ou arrêts différents. Tous les véhicules ne pouvant pas passer par les mêmes arrêts, il est nécessaire dans ce cas de corriger les décisions inutiles. Puisque le résultat est le même, nous choisissons alors de faire des croisements entre décisions qui concernent les mêmes véhicules ou les mêmes stations.

Après plusieurs simulations avec différents types de croisement, nous avons choisi l'opérateur de croisement uniforme sur les lignes que nous présentons ci-dessus. Les masques relatifs à cet opérateur sont générés d'une manière aléatoire à chaque croisement entre deux individus (cf. IV.2.3.3). La figure IV.13 présente un exemple de croisement uniforme entre deux individus illustrant les décisions qui concernent 5 véhicules et 4 stations.

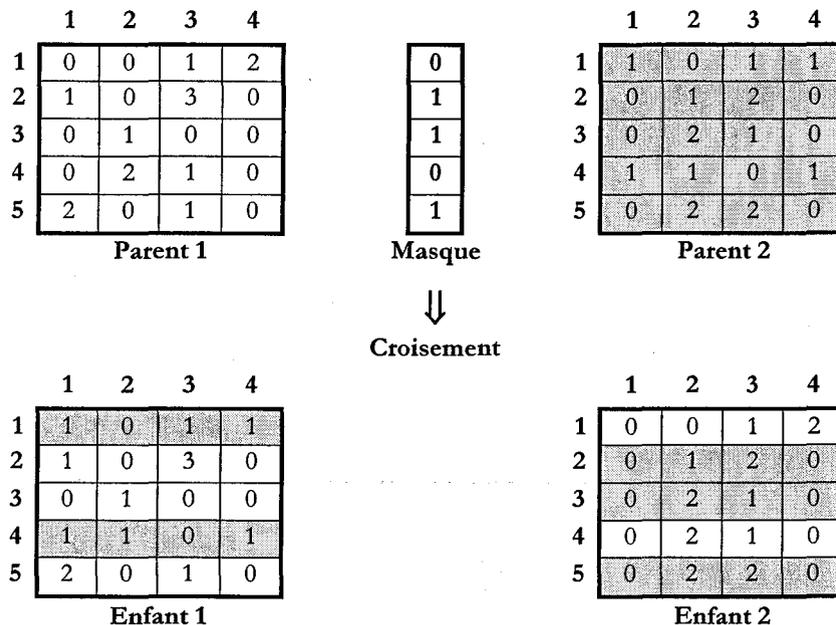


Figure IV.13: Exemple de croisement uniforme pour l'AERSR.

L'utilisation de l'opérateur stochastique de sélection par les restes implique une égalité entre certains individus adjacents dans la population, puisqu'un individu est sélectionné plusieurs fois à la suite. Ainsi, afin d'améliorer l'exploration de l'espace de recherche en évitant au maximum des croisements entre des individus égaux, nous essayons d'empêcher les croisements entre les individus adjacents. Nous proposons alors de les choisir aléatoirement ou de croiser le premier individu avec le dernier, le second avec l'avant-dernier, etc.

Par ailleurs, nous avons aussi imposé un contrôle à cet opérateur pour éviter les grands écarts provoqués par les décisions de retardement entre les horaires théoriques et les horaires régulés de passage des véhicules non perturbés. Nous transformons ainsi notre opérateur de croisement uniforme en un opérateur contrôlé qui ne peut qu'améliorer les coûts des individus, surtout par rapport au critère de ponctualité, en limitant le nombre de décisions sur les véhicules.

En effet, nous imposons une limite sur le retard cumulé des véhicules à la sortie de la zone perturbée, ou en dehors de l'horizon spatio-temporel. Pour chaque véhicule, si le retard cumulé atteint la limite, il faut réduire les décisions non nulles jusqu'à ce que leur somme soit tolérable.

Cet opérateur a pour but d'éviter que les décisions ne se transforment elles-mêmes en perturbations. L'algorithme de croisement uniforme contrôlé est illustré par la figure IV.14.

```

Choisir deux parents de  $P^*$ ,  $p_1$  et  $p_2$ ;
Choisir aléatoirement un masque de croisement  $M$ ;
Pour  $i=1$  jusqu'à  $v$ 
    Pour  $j=1$  jusqu'à  $s$ 
        Si  $M[j]=1$ , alors copier décision du véhicule  $i$  de  $p_1$  dans  $e_1$  et de  $p_2$  dans  $e_2$ ;
        Sinon, alors copier décision du véhicule  $i$  de  $p_2$  dans  $e_1$  de  $p_1$  dans  $e_2$ ;
    Fin pour;
Pour  $e_1$ , calculer pour véhicule  $i$  la somme des retards  $SR[j]$ ;
    Tant que  $SR[j]>$ limite retard pour  $i$ , alors
        Choisir aléatoirement une station  $j$ ;
        Si décision à  $j>0$ , la décrémenter de 1 et décrémenter  $SR[j]$ ;
    Fin tant que;
    Idem pour  $e_2$ ;
Fin pour.
  
```

Figure IV.14: Algorithme de croisement uniforme contrôlé pour l'AERSR.

IV.3.6.2. Mutation

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

IV.4. Approche Evolutionniste de la Régulation Avec Reconfiguration, AERAR

IV.4.1. Objectif

Afin de pallier à certains incidents qui affectent sérieusement le trafic d'un réseau multimodal, d'éventuelles modifications des itinéraires des véhicules de \mathcal{V}^M peuvent s'avérer nécessaires. Par exemple, dans le cas d'une panne de métro, certains bus sont souvent détournés de leurs parcours

initiaux afin de desservir les arrêts du métro et assurer le service, surtout en absence de véhicules de réserve. Nous procédons par conséquent à une reconfiguration partielle du réseau initial. Ce processus est en fait réalisé par une approche évolutionniste de régulation qui contient une étape de « rerouting » qu'on appellera reconfiguration [Fayech & al, 02d].

Par rapport à l'AERSR, l'AERAR ne concerne pas seulement les horaires mais aussi les itinéraires. Il s'agit d'une approche plus générale qui englobe la plupart des décisions possibles à travers une reconfiguration partielle du réseau. L'étendue de la reconfiguration sur l'horizon étudié dépend de l'incident et de la flexibilité des déplacements des véhicules. L'AERSR n'est en fait qu'un cas particulier de la présente approche dans un réseau à flexibilité nulle.

En adoptant l'hypothèse citée ci-dessous, l'AERAR consiste en une réaffectation des horaires et itinéraires aux véhicules. Autrement dit, il est nécessaire de résoudre le problème d'affectation des arcs et des nœuds du graphe de déplacement $G^{\mathcal{R} \cdot \mathcal{H}}$ afin de fixer les nouveaux itinéraires des véhicules. Le but de l'approche est alors de chercher pour les différents véhicules et arrêts de $\mathcal{V}^{\mathcal{H}}$ et $\mathcal{S}^{\mathcal{H}}$:

- les variables de passage, a_{ij}^{lm} , pour l'affectation des nœuds ;
- les variables de destination, x_{ijk}^{lmr} , pour l'affectation des arcs ;
- les décisions de modification des durées des arrêts, ε_{ij}^{lm} , pour l'affectation des horaires.

Hypothèse IV.1 : Afin de réduire les désagréments causés par une reconfiguration partielle du réseau pour les voyageurs, nous supposons que ces derniers disposent d'un système d'information voyageur fiable au niveau des stations pour connaître en temps réel le parcours et les horaires de passage des véhicules.

La reconfiguration partielle d'un réseau de transport multimodal implique une étude au préalable de la flexibilité des itinéraires des véhicules du réseau. Nous présentons dans le paragraphe suivant une caractérisation de cette flexibilité et dans les autres, nous décrivons l'approche évolutionniste de régulation avec reconfiguration.

IV.4.2. Flexibilité du réseau

IV.4.2.1. Graphe de déplacement des véhicules

Le graphe $G^{\mathcal{R}}$ du réseau multimodal, que nous avons présenté au chapitre II, modélise la totalité des déplacements possibles des véhicules entre les différentes stations (cf. II.3). Pour résorber les perturbations, nous considérons le graphe $G^{\mathcal{R} \bullet \mathcal{H}}$ qui traduit les déplacements des véhicules de $\mathcal{V}^{\mathcal{H}}$ entre les arrêts de $\mathcal{S}^{\mathcal{H}}$. Chaque arc de ce graphe représente un déplacement possible direct d'un véhicule entre deux stations. Supposons que pour un véhicule donné, V_i^l , de $\mathcal{V}^{\mathcal{H}}$, le graphe $G(V_i^l)$ illustre les déplacements possibles de V_i^l par rapport à \mathcal{H} . Nous avons alors, $\mathcal{N}(G(V_i^l)) \subset \mathcal{N}^{\mathcal{H}}$ et $\mathcal{A}(G(V_i^l)) \subset \mathcal{A}^{\mathcal{H}}$, puisque ce graphe n'est qu'un sous-graphe de $G^{\mathcal{R} \bullet \mathcal{H}}$. Il inclut :

- un seul mode de transport correspondant à celui de V_i^l ;
- les arrêts de $\mathcal{S}^{\mathcal{H}}$ par lesquels V_i^l peut passer ;
- les déplacements possibles relatifs à V_i^l entre ces arrêts.

$G(V_i^l)$ illustre alors la flexibilité maximale accordée aux déplacements de V_i^l . Puisque nous opérons sur un horizon spatio-temporel, il est nécessaire que les véhicules reprennent leurs itinéraires initiaux au delà des limites de l'horizon. Ainsi, pour chaque véhicule, les nœuds de début et de fin dans le cas théorique doivent être les mêmes que dans la situation régulée. En effet, l'affectation des itinéraires a été établie pour les véhicules et arrêts non inclus dans l'horizon. Pour V_i^l , considérons d et f comme le premier et dernier arrêt de son itinéraire.

Hypothèse IV.2 : Dans le chapitre II, nous avons présenté le réseau sous la forme d'un graphe orienté. Sachant que tout graphe orienté peut être transformé en un graphe non orienté, nous considérons que des graphes de déplacement non orientés afin de simplifier les illustrations [Vandegriend, 98].

Exemple IV.3 : Selon l'hypothèse IV.2, la figure suivante illustre un graphe de déplacement de V_i^l selon l'horizon \mathcal{H} . Nous supposons que $\mathcal{S}^{\mathcal{H}}$ contient 16 stations. Les arrêts par lesquels V_i^l ne peut pas passer ne sont bien sûr pas représentés dans le graphe.

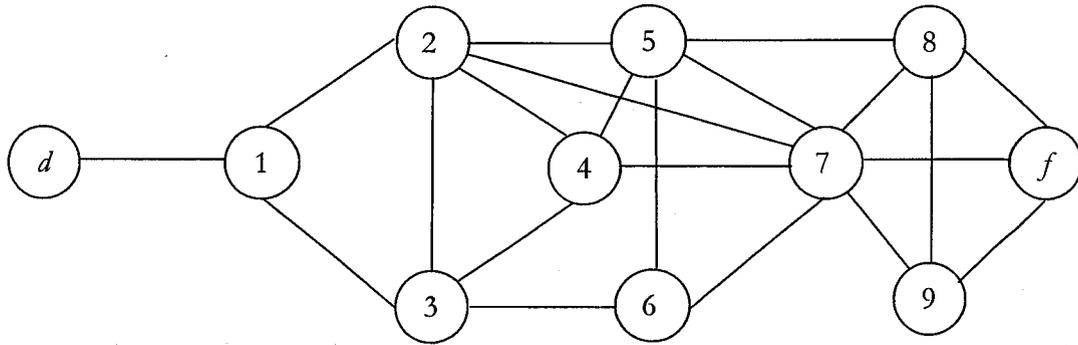


Figure IV.15: Exemple de graphe de déplacement de V_i^l dans l'horizon \mathcal{H} .

IV.4.2.2. Différentiation des itinéraires directs

Afin de distinguer les différents itinéraires directs possibles d'un point a à un point b (passage par une rue différente par exemple), nous pouvons considérer un point qui représente une station fictive illustrant un itinéraire différent. Nous supposons que les véhicules sont localisables par le SAE au niveau de ce type de station.

Prenons l'arête (a,b) comme l'itinéraire direct qui fait partie de la configuration initiale du réseau. Dans la figure IV.16, les nœuds x , y et z représentent des stations fictives. S'il y a un changement d'itinéraire, le véhicule ne peut passer que par un seul nœud parmi $\{x, y, z\}$, en allant de a à b . Il y a alors 4 itinéraires directs de a à b .

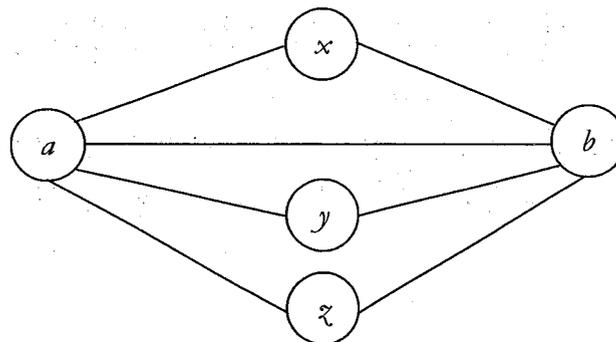


Figure IV.16: Considération des stations fictives.

IV.4.2.3. Schéma d'affectation des nœuds

Selon l'horizon étudié, la nature du véhicule et de la perturbation, les véhicules peuvent être autorisés ou non à passer par certaines stations. Ils peuvent aussi être autorisés ou non à changer

leurs itinéraires initiaux en annulant ou pas leurs passages aux arrêts habituels. Nous illustrons la possibilité de passage de V_i^l à la station S_j^m de S^H par le paramètre $a(V_i^l, S_j^m)$ [Fayech & al, 02c]. Ce paramètre est égal à :

- 1 si S_j^m fait partie de l'itinéraire initial de V_i^l ;
- 0,5 si V_i^l peut passer par S_j^m ;
- 0 si V_i^l ne peut pas passer par S_j^m .

Le paramètre de flexibilité, $u(V_i^l, S_j^m)$, concerne l'annulation du passage de V_i^l par S_j^m . Il est égal à :

- 0 quand V_i^l doit absolument passer par S_j^m ;
- 1 quand V_i^l peut ne pas passer, comme prévu, par S_j^m .

Comme présenté dans le tableau suivant, nous pouvons distinguer des relations entre les paramètres et les variables de passage. Il est évident que si $a(V_i^l, S_j^m)=0$ alors $a_{ij}^{lm}=0$. En effet, si le véhicule ne peut jamais passer par cette station, alors il est impossible d'insérer cette dernière dans son itinéraire. Aussi, si $a(V_i^l, S_j^m)=1$ et $u(V_i^l, S_j^m)=0$, alors $a_{ij}^{lm}=1$. Autrement dit, si le véhicule n'est pas autorisé à sauter cet arrêt, la variable de passage correspondante doit être égale à 1 dans toutes les solutions. Dans les autres cas, le véhicule peut passer ou pas par la station concernée, d'où le symbole (*) signifiant 0 ou 1.

Tableau IV.1: Relation entre les paramètres et les variables de passage.

| $a(V_i^l, S_j^m)$ | $u(V_i^l, S_j^m)$ | a_{ij}^{lm} |
|-------------------|-------------------|---------------|
| 0 | * | 0 |
| 0,5 | * | * |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | * |

Remarque IV.3 : Dorénavant, nous allons considérer que les paramètres de flexibilité sont nuls dans le cas d'une variable de passage égale à 0,5.

Selon les conditions d'exploitation du réseau, les paramètres de possibilité de passage ou de flexibilité peuvent changer. Ils sont néanmoins nécessaires pour la réduction de la complexité de notre problème, puisqu'ils sont utilisés pour distinguer les stations auxquelles le véhicule doit s'arrêter impérativement ou non. Nous présentons dans le tableau suivant un exemple de paramètres relatifs au graphe $G(V_i^l)$ de la figure IV.14. Nous y illustrons $a(V_i^l, S_j^m)$ et $u(V_i^l, S_j^m)$ pour tout arrêt S_j^m de S^H .

Tableau IV.2: Exemple de paramètres de passage et de flexibilité.

| Arrêt | d | f | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|-------------------|-----|-----|---|---|---|---|---|-----|---|-----|-----|----|----|----|----|----|
| $A(V_i^l, S_j^m)$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,5 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $u(V_i^l, S_j^m)$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Nous décelons alors à travers ces paramètres les nœuds où les passages sont flexibles. Nous pouvons construire un schéma d'affectation des nœuds traduisant l'ensemble des possibilités de passage de V_i^l , à travers les variables a_{ij}^{lm} pour tout arrêt S_j^m de S^H . Toute solution générée doit être conforme à ce schéma (tableau IV.3).

Nous proposons de considérer ce schéma d'affectation dans le graphe de déplacement $G(V_i^l)$. En effet, nous illustrons les nœuds à passage flexible par des cercles pointillés afin de les distinguer des nœuds à passage ferme (figure IV.17). Le problème qui se pose maintenant réside dans le choix de l'itinéraire affecté à V_i^l selon le schéma d'affectation qui lui correspond. Notons que tout itinéraire doit absolument comporter les arrêts $d, 1, 2, 3, 7$ et f . Nous appelons $S^*(V_i^l)$ l'ensemble des arrêts par lesquels V_i^l doit absolument passer.

Tableau IV.3: Schéma d'affectation des arrêts au véhicule V_i^l .

| Arrêt | d | f | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---------------|-----|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|
| a_{ij}^{lm} | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | * | * | * | 1 | * | * | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

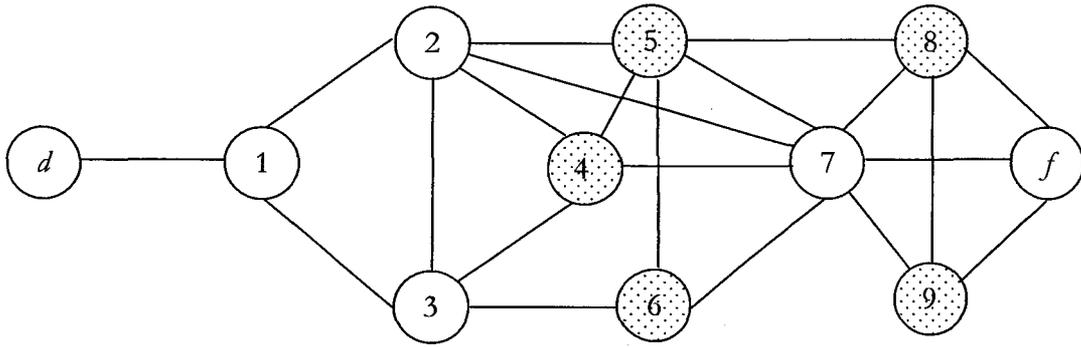


Figure IV.17: Considération du schéma d'affectation des nœuds dans $G(V_i^l)$.

IV.4.3. Codage

A travers la régulation spatio-temporelle, nous cherchons à réaffecter des itinéraires et des horaires de passage aux véhicules de l'horizon. Le but de l'affectation des itinéraires est de trouver pour chaque V_i^l , selon les conditions d'exploitation et les critères de régulation, un itinéraire qui relie les arrêts d'extrémités correspondant aux limites de l'horizon (d et f). Tel que nous en avons déjà parlé dans le chapitre II, le problème d'affectation des itinéraires aux véhicules comporte deux sous problèmes qui peuvent être résolus simultanément ou séparément :

- affectation des nœuds,
- affectation des arêtes.

La résolution simultanée de ces deux sous problèmes consiste à chercher directement un itinéraire pour chaque véhicule représenté par la séquence de nœuds qui lui est associée. Autrement dit, une solution peut être représentée par un chemin reliant les nœuds d'extrémités et respectant le schéma d'affectation.

Un codage possible pourrait directement illustrer cette séquence en tenant compte des modifications des durées des arrêts dans les stations. Nous considérons ainsi un Codage des Itinéraires et des Horaires, CIH, qui comprend pour chaque véhicule V_k^r , une séquence ordonnée de couples $(S_j^m, \varepsilon_{kj}^{rm})$ traduisant la station à laquelle il s'arrête et la modification du temps d'arrêt. Les variables x_{ijk}^{lmr} , liées à l'affectation des arcs, sont implicitement représentées à travers la séquence des arrêts.

A titre d'exemple, suivant $G(V_i^l)$ et le schéma d'affectation correspondant, nous supposons que les différents véhicules de \mathcal{V}^H appartiennent à une même ligne et que leurs itinéraires

possèdent les même extrémités que V_i^l , ainsi que le même schéma d'affectation présenté par tableau IV.2. Nous présentons alors sur la figure suivante un exemple du CIH.

| | |
|-------------|---|
| V_0^l | $(d,0), (1,1), (3,3), (2,1), (5,0), (8,2), (7,0), (f,0)$ |
| V_1^l | $(d,0), (1,0), (2,3), (3,0), (4,1), (5,1), (7,1), (9,2), (f,0)$ |
| | |
| V_i^l | $(d,0), (1,0), (2,2), (3,1), (6,3), (7,1), (f,0)$ |
| V_{i+1}^l | $(d,0), (1,0), (2,1), (3,2), (6,0), (5,1), (7,0), (f,0)$ |

Figure IV.18: Codage des itinéraires et des horaires (CIH).

Un autre codage peut être utilisé en séparant la résolution de l'affectation des nœuds et des arêtes. En effet, le Codage des Nœuds et des Horaires, CNH, propose les arrêts par lesquels chaque véhicule va passer. Pour un V_k^r une station S_j^m , il s'agit de fixer le couple $(\alpha_{kj}^{rm}, \epsilon_{kj}^{rm})$ représentant la variable de passage et la modification du temps d'arrêt. L'affectation des arêtes où la recherche de l'itinéraire adéquat à chaque ensemble de nœuds choisis est effectuée dans une étape suivante dans l'algorithme de l'AERAR. La figure IV.19 présente ce type de codage pour l'exemple illustré par IV.17. Nous pouvons noter qu'il s'agit d'une extension du codage des horaires (cf. IV.3.2).

| Arrêt | d | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | f |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| V_0^l | (1,0) | (1,1) | (1,1) | (1,3) | (0,0) | (1,0) | (0,0) | (1,0) | (1,2) | (0,0) | (1,0) |
| V_1^l | (1,0) | (1,0) | (1,3) | (1,0) | (1,1) | (1,1) | (0,0) | (1,1) | (0,0) | (1,2) | (1,0) |
| | | | | | | | | | | | |
| V_i^l | (1,0) | (1,1) | (1,2) | (1,1) | (0,0) | (0,0) | (1,3) | (1,1) | (0,0) | (0,0) | (1,0) |
| V_{i+1}^l | (1,0) | (1,1) | (1,1) | (1,2) | (0,0) | (1,1) | (1,0) | (1,0) | (0,0) | (0,0) | (1,0) |

Figure IV.19: Codage des nœuds et des horaires (CNH).

Pour les deux codages, notons C_i le vecteur des itinéraires ou chemins affectés aux véhicules de \mathcal{V}^H , pour tout individu i . Pour tout V_k^r de \mathcal{V}^H , $C_i(V_k^r)$ est le chemin correspondant à V_k^r pour l'individu i . Par exemple, $C_i(V_i^l) = (d, 1, 2, 3, 6, 7, f)$, selon les deux figures précédentes.

Nous remarquons à travers le premier codage proposé une légère similitude avec les problèmes de tournée de véhicules. Cependant, dans notre problème, un itinéraire peut être attribué à plusieurs véhicules en même temps, alors que dans les tournées de véhicules, chaque itinéraire est affecté à un seul véhicule et les distances parcourues sont à diminuer.

Le premier codage implique une difficulté dans la construction d'itinéraires faisables après la reproduction, ce qui nécessite des opérateurs de croisement et de mutation spécifiques. Ces opérateurs doivent en effet tenir compte des arêtes existantes reliant les nœuds, ce qui n'est pas une tâche facile à réaliser. Dans ce but, ils doivent être assistés par des algorithmes de recherche de chemins faisables afin d'adhérer aux schémas d'affectation des véhicules.

Le deuxième codage ne nécessite pas d'opérateurs compliqués de reproduction. Par contre, la recherche d'un itinéraire faisable, qui passe par l'ensemble des nœuds définis pour chaque véhicule, n'est pas une tâche facile, d'autant plus que son existence n'est pas garantie.

En fait, le problème de construction d'un itinéraire pour un véhicule à partir du CNH ressemble à un problème de voyageurs de commerce (PVC) mais les critères sont différents. En effet, il s'agit de trouver un chemin qui relie d et f et qui passe une seule fois par les nœuds auxquels un arrêt est proposé. Autrement dit, nous devons trouver un chemin hamiltonien entre d et f , ce qui constitue un problème NP-Complet. Cependant, notre problème diffère du PVC par rapport à la nature du graphe de déplacement qui n'est pas nécessairement complet. De ce fait, l'existence du chemin hamiltonien n'est pas toujours assurée.

IV.4.4. Algorithme proposé

Après avoir choisi un des codages à utiliser, l'approche évolutionniste de régulation avec reconfiguration sur l'horizon \mathcal{H} concerné commence par une étape d'initialisation dans laquelle la population initiale est construite aléatoirement et ensuite évaluée. Pour les deux codages CNH et CIH, une phase de recherche des itinéraires est nécessaire afin de construire des chemins faisables. Cette phase sera détaillée plus tard. L'algorithme de l'AERAR est représenté par la figure suivante.

Comme dans l'AERSR, la sélection des meilleurs individus est réalisée selon l'opérateur stochastique par les restes. Aussi, l'évaluation des solutions est basée sur une agrégation des trois

critères de régulation avec différents poids traduisant leur importance relative et tenant compte de leur ordre de grandeur.

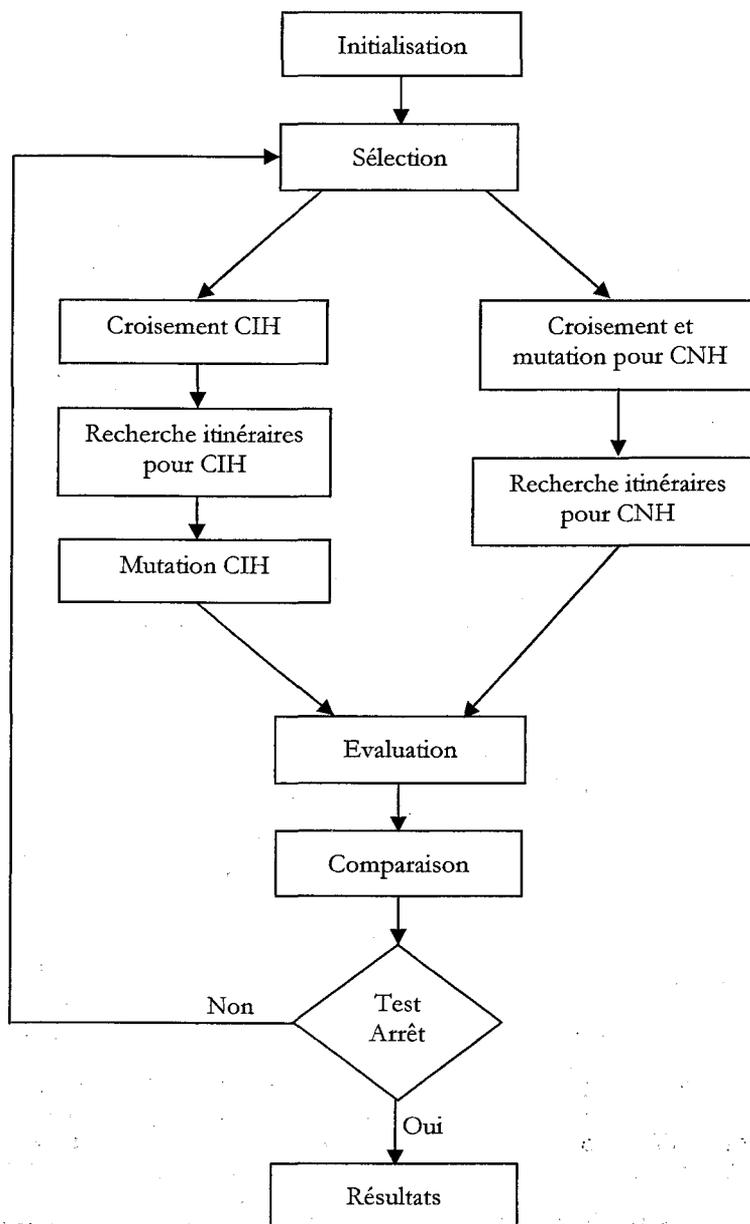


Figure IV.20: Algorithme évolutionniste de régulation avec reconfiguration.

Une fois sélectionnés, les individus codés selon CNH subissent des croisements et des mutations et les itinéraires qui leur correspondent sont fixés, si nécessaire, par un Algorithme de Recherche d'Itinéraire, ARI. Pour le cas du CIH, les croisements peuvent entraîner des itinéraires non faisables, ce qui nécessite l'utilisation d'un ARI. Nous proposons pour le CIH un opérateur de mutation spécifique qui génère des solutions faisables. Les individus, CNH ou CIH, sont ensuite évalués pour finalement subir une phase de comparaison partielle avec leurs parents ;

cette étape a été déjà présentée dans le paragraphe IV.3.4 pour l'AERSR. Nous avons aussi décrit dans ce même paragraphe la condition d'arrêt de l'algorithme.

IV.4.5. Opérateurs de croisement

IV.4.5.1. Croisement pour le CNH

a- Croisement uniforme sur les lignes

Le croisement pour le CNH ne se soucie pas des liaisons entre les nœuds et des chemins faisables. Il peut se baser sur celui du CH (cf. IV.3.6.1). Il serait ainsi réalisé à travers les échanges entre les individus de l'ensemble des décisions sur les véhicules. De cette manière, les enfants respectent dans tous les cas les schémas d'affectation. Aussi, puisque les individus parents viennent d'être évalués et sélectionnés, les itinéraires qui leur correspondent sont donc déjà établis. Par conséquent, le résultat du croisement est cohérent et ne nécessite pas de recherche d'itinéraire, mais avec l'échange des lignes de décision, l'échange des itinéraires est nécessaire pour éviter de les recalculer. Un exemple de ce croisement uniforme sur les lignes est illustré ci-dessus, toujours selon le graphe de déplacement de la figure IV.17.

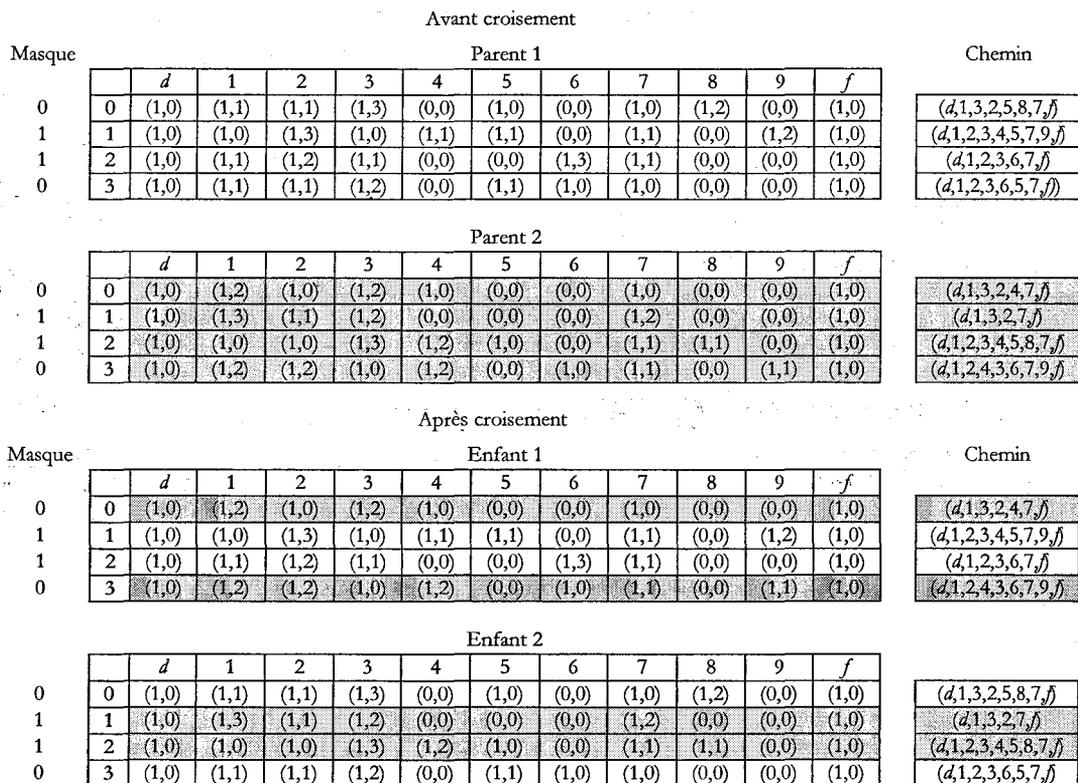


Figure IV.21: Exemple de croisement uniforme sur les lignes pour le CNH.

b- Croisement à deux-points sur les colonnes

Nous proposons un autre croisement qui ne conserve pas les itinéraires, auquel cas l'utilisation d'un ARI est nécessaire. C'est en effet le croisement à deux-points sur les colonnes. Toutefois, le respect des schémas d'affectation est toujours assuré par cet opérateur. Deux points de croisement sont choisis au hasard, l'échange concerne les colonnes qui se trouvent entre ces deux points.

La figure ci-dessous illustre le fonctionnement de ce croisement. La zone qui subit l'échange est composé par les décisions sur les arrêts 4, 5, 6, 7. Les zones externes du parent 1 (respectivement 2) sont transmises à l'enfant 1 (respectivement 2) et la zone interne du parent 2 (respectivement 1) est copiée dans celle de l'enfant 1 (respectivement 2).

Cet échange a modifié les décisions de passage et par conséquent les itinéraires. Les enfants doivent ensuite subir un ARI pour que les solutions qui leur correspondent puissent fixer toutes les variables de décision. Par exemple, dans enfant 1, pour le véhicule 0, il s'agit de trouver un chemin qui relie *d* à *f* et qui passe par 1, 2, 3, 5 et 7.

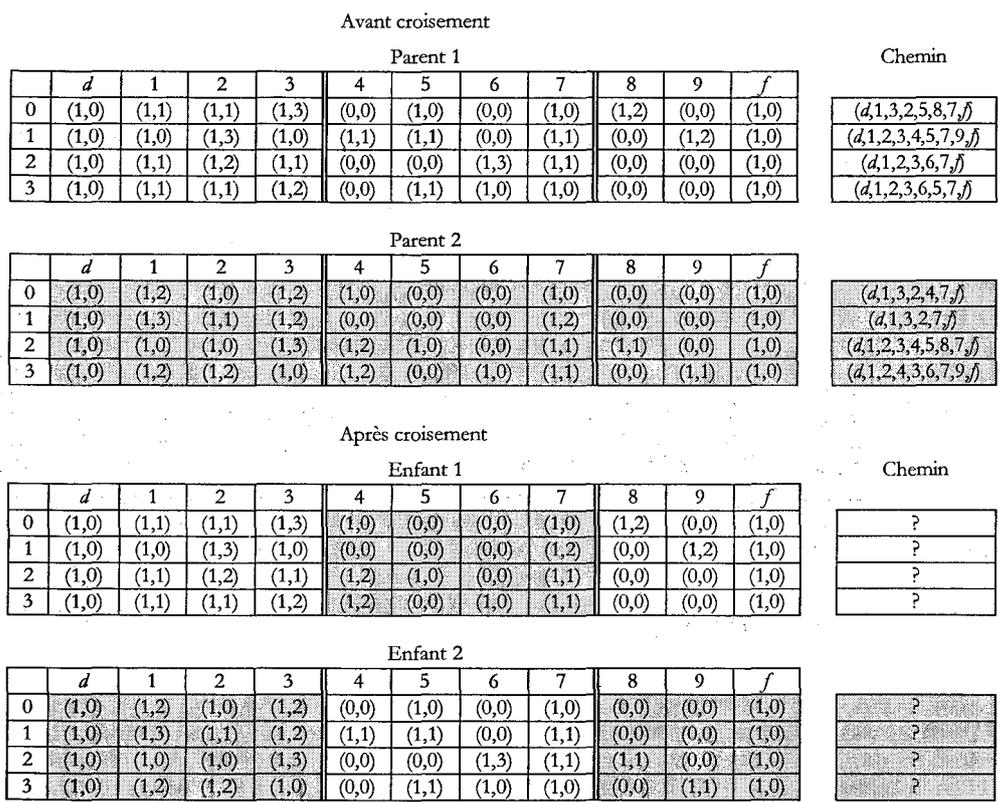


Figure IV.22: Exemple de croisement à deux-points sur les colonnes pour le CNH.

IV.4.5.1. Croisement pour le CIH

a- Croisement uniforme sur les lignes

Comme pour le CNH, un opérateur de croisement uniforme sur les lignes est proposé pour le CIH. En effet, cet opérateur a l'avantage d'échanger les décisions et les itinéraires. Il ne pose ainsi pas de problèmes de non respect des schémas d'affectation ou de non faisabilité des chemins résultant.

La figure ci-dessous montre un exemple de fonctionnement de cet opérateur. Selon le masque généré, seules les décisions concernant le véhicule 1 ont fait l'objet de l'échange. Les séquences sont alors échangées et la solution est tout à fait complète.

| Avant croisement | | | | | | | | | | | |
|------------------|---|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------|
| | | Parent 1 | | | | | | | | | Chemin |
| Masque | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | (d,0) | (1,1) | (3,3) | (2,1) | (5,0) | (8,2) | (7,0) | (f,0) | | (d,1,3,2,5,8,7,f) |
| 0 | 1 | (d,0) | (1,0) | (2,3) | (3,0) | (4,1) | (5,1) | (7,1) | (9,2) | (f,0) | (d,1,2,3,4,5,7,9,f) |
| 1 | 2 | (d,0) | (1,0) | (2,2) | (3,1) | (6,3) | (7,1) | (f,0) | | | (d,1,2,3,6,7,f) |
| 1 | 3 | (d,0) | (1,0) | (2,1) | (3,2) | (6,0) | (5,1) | (7,0) | (f,0) | | (d,1,2,3,6,5,7,f) |
| Parent 2 | | | | | | | | | | | |
| | 0 | (d,0) | (1,2) | (3,2) | (2,0) | (4,0) | (7,0) | (f,0) | | | (d,1,3,2,4,7,f) |
| 0 | 1 | (d,0) | (1,3) | (3,2) | (2,1) | (7,0) | (f,0) | | | | (d,1,3,2,7,f) |
| 1 | 2 | (d,0) | (1,0) | (2,0) | (3,3) | (4,2) | (5,0) | (8,1) | (7,1) | (f,0) | (d,1,2,3,4,5,8,7,f) |
| 1 | 3 | (d,0) | (1,2) | (2,2) | (4,2) | (3,0) | (6,0) | (7,1) | (9,1) | (f,0) | (d,1,2,4,3,6,7,9,f) |
| Après croisement | | | | | | | | | | | |
| | | Enfant 1 | | | | | | | | | Chemin |
| Masque | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | (d,0) | (1,1) | (3,3) | (2,1) | (5,0) | (8,2) | (7,0) | (f,0) | | (d,1,3,2,5,8,7,f) |
| 0 | 1 | (d,0) | (1,3) | (3,2) | (2,1) | (7,0) | (f,0) | | | | (d,1,3,2,7,f) |
| 1 | 2 | (d,0) | (1,0) | (2,2) | (3,1) | (6,3) | (7,1) | (f,0) | | | (d,1,2,3,6,7,f) |
| 1 | 3 | (d,0) | (1,0) | (2,1) | (3,2) | (6,0) | (5,1) | (7,0) | (f,0) | | (d,1,2,3,6,5,7,f) |
| Enfant 2 | | | | | | | | | | | |
| | 0 | (d,0) | (1,2) | (3,2) | (2,0) | (4,0) | (7,0) | (f,0) | | | (d,1,3,2,4,7,f) |
| 0 | 1 | (d,0) | (1,0) | (2,3) | (3,0) | (4,1) | (5,1) | (7,1) | (9,2) | (f,0) | (d,1,2,3,4,5,7,9,f) |
| 1 | 2 | (d,0) | (1,0) | (2,0) | (3,3) | (4,2) | (5,0) | (8,1) | (7,1) | (f,0) | (d,1,2,3,4,5,8,7,f) |
| 1 | 3 | (d,0) | (1,2) | (2,2) | (4,2) | (3,0) | (6,0) | (7,1) | (9,1) | (f,0) | (d,1,2,4,3,6,7,9,f) |

Figure IV.23: Exemple de croisement uniforme sur les lignes pour le CIH.

b- Croisement PMX sur les colonnes avec insertion

Le croisement PMX (« Partially Mapped Crossover ») a été conçu par Goldberg principalement pour résoudre le problème du voyageur de commerce [Goldberg & al, 85]. Il a également été utilisé dans la résolution des problèmes du type job shop. Il est en fait un type de croisement à deux points qui consiste à échanger une portion d'une séquence avec une autre séquence et le reste est échangé après d'éventuels remplacements appropriés.

Par rapport à notre problème et le codage CIH, nous décelons cependant des différences avec les applications rencontrées de cet opérateur :

- (i) Le nombre d'éléments dans les lignes (d'arrêts dans l'itinéraire) du CIH n'est pas fixe. Il varie d'un individu à un autre et d'une ligne à une autre.
- (ii) L'ensemble des nœuds contenus dans les chemins varie également.
- (iii) Dans tout individu, tout itinéraire d'un véhicule V_k^r doit absolument contenir au moins l'ensemble $S^*(V_k^r)$ des nœuds à passage non flexible.
- (iv) Même après des remplacements éventuels, le résultat du croisement peut ne pas être faisable.

Nous proposons d'adapter ce type de croisement au codage CIH à travers ces différentes étapes (voir l'exemple dans la figure IV.24) :

- Etape 1 : Choix des deux points de coupure

Ce choix est aléatoire mais nous imposons qu'il soit dépendant des tailles des itinéraires qui comportent le moins de nœuds à cause du problème décrit dans (i). En effet, ayant deux individus i et j si nous choisissons les deux points y et z , alors le premier point doit se trouver après le premier nœud des itinéraires puisque ce nœud de début est fixe, $y > 1$. Aussi, il faut que $y < z$.

Par ailleurs, le deuxième point doit être inférieur au minimum de la longueur des itinéraires des véhicules dans les deux individus et le dernier nœud est toujours fixe :

$$z < \underset{i,j}{\text{Min}} \left[\underset{V_k^r \in V^H}{\text{Min}} \left[\text{Card}(C_i(V_k^r)) \right], \underset{V_k^r \in V^H}{\text{Min}} \left[\text{Card}(C_j(V_k^r)) \right] \right] \quad (\text{IV.5})$$

sachant que d'après la remarque (iii) :

$$\begin{aligned} \underset{i,j}{\text{Min}} \left[\underset{V_k^r \in V^H}{\text{Min}} \left[\text{Card}(C_i(V_k^r)) \right], \underset{V_k^r \in V^H}{\text{Min}} \left[\text{Card}(C_j(V_k^r)) \right] \right] \\ \geq \underset{V_k^r \in V^H}{\text{Min}} \left[\text{card}(S^*(V_k^r)) \right] \end{aligned} \quad (\text{IV.6})$$

Dans l'exemple associé à ce croisement, nous avons choisi une zone de coupure contenant les colonnes 4 et 5.

- Etape 2 : Inversion des zones comprises entre les points de coupure

Il s'agit d'échanger des décisions comprises entre y et z pour construire les enfants. Cette zone interne du parent 1 (respectivement 2) est copiée dans celle de l'enfant 2 (respectivement 1). Les zones externes de parent 1 et parent 2 sont copiées respectivement dans celles d'enfant 1 et enfant 2.

- Etape 3 : Détection des doubles des nœuds

Tout chemin faisable ne passe qu'une seule fois par chaque nœud. Il faut ainsi vérifier si les nœuds à l'intérieur de la zone de croisement ne se trouvent pas déjà dans les zones extérieures. Dans l'exemple considéré, d'après les décisions en gras, nous remarquons que enfant 1 contient des doubles des nœuds 2 et 7 dans l'itinéraire de véhicule 1. Dans l'enfant 2, le nœud 3 apparaît deux fois dans la ligne 1, ainsi que le nœud 6 dans la séquence du véhicule 3.

- Etape 4 : Elimination des doubles

Pour éviter l'apparition de ces doubles, il est nécessaire de corriger les enfants en remplaçant les doubles qui se trouvent dans les zones externes. Si un nœud, se trouvant dans la zone de croisement de l'enfant 1 à la position x de la séquence, a un double dans la zone externe à la position x' , alors il faut remplacer ce dernier par le nœud qui se trouve à la position x dans parent 1.

Par exemple, dans enfant 1, le nœud 2 apparaît deux fois, dans la zone de croisement à la position 4 et dans la zone externe à la position 3. Il faut alors mettre à cette dernière position, le nœud qui se trouve à la position 4 de parent 1, c'est-à-dire le nœud 3.

Quand un duplicata est à remplacer par un nœud qui existe déjà dans la séquence de V_k^r dans enfant i , deux cas se présentent pour notre problème :

- si tous les nœuds de $S^*(V_k^r)$ se trouvent dans la séquence de V_k^r , alors éliminer le nœud (voir véhicule 3 dans enfant 2) ;
- sinon, éliminer le duplicata et insérer éventuellement les nœuds de $S^*(V_k^r)$ qui manquent dans la séquence par la procédure d'insertion suivante.

Dans les applications classiques du PMX, le premier cas ne se présente pas et pour le deuxième, le nœud manquant est inséré directement à la position considérée.

- Etape 5 : Procédure d'insertion de PMX

En effet, selon la remarque (iv), à la fin de la procédure de remplacement, certaines séquences peuvent ne pas contenir tous les nœuds $S^*(V_k^r)$. Les nœuds manquants doivent alors y être insérés de la manière la plus cohérente possible.

Dans ce but, nous proposons une procédure d'insertion d'un nœud dans un itinéraire, même si ce dernier n'est pas faisable. Cette procédure tient compte des arêtes existantes entre les nœuds. Son objectif est de :

- insérer un nœud dans une séquence, qui ne représente pas un itinéraire faisable, entre deux nœuds non liés mais avec lesquels il possède des liaisons dans le graphe de déplacement, pour améliorer la cohérence de la séquence ;
- insérer un nœud dans un chemin faisable entre deux nœuds avec lesquels il possède des liaisons dans le graphe de déplacement pour garder la cohérence du chemin.

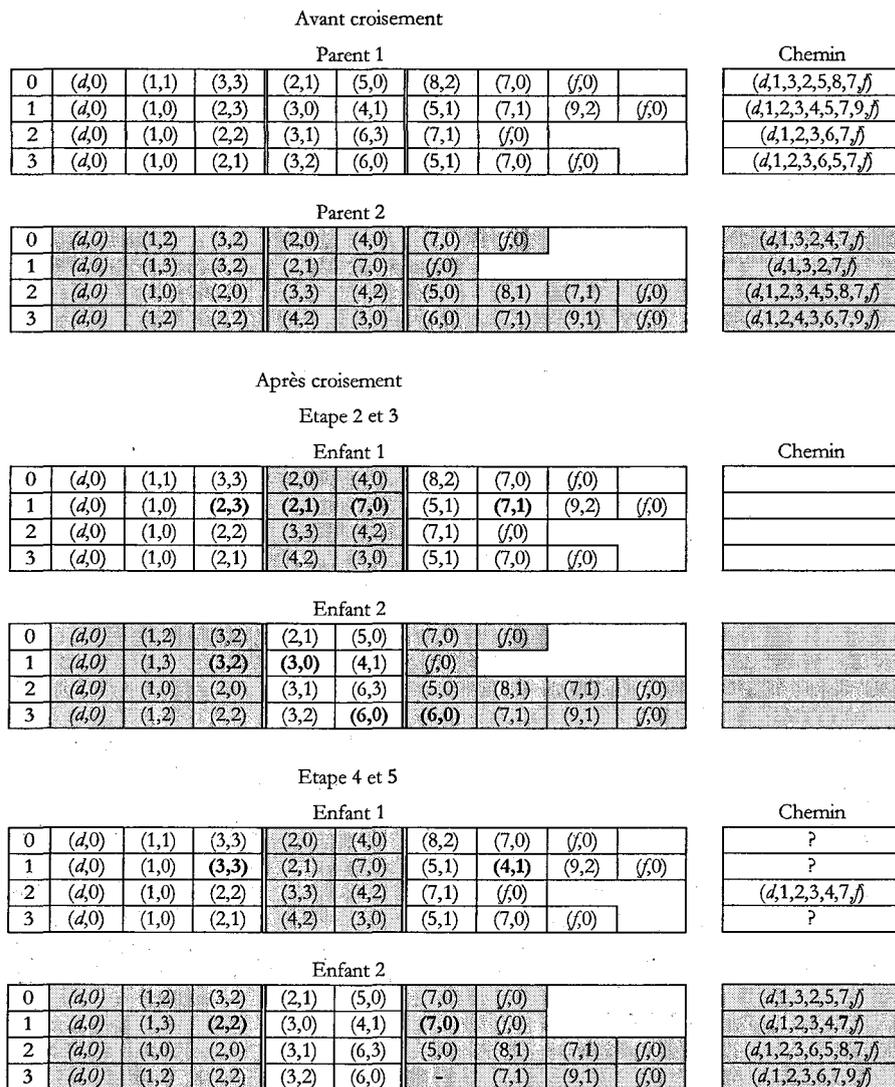


Figure IV.24: Exemple de croisement PMX avec insertion adapté pour le CIH.

Il est ainsi nécessaire de vérifier avant l'insertion la cohérence de la solution. La figure suivante illustre l'algorithme d'insertion. Par exemple, le nœud 7, après remplacement, n'existe pas dans la séquence du véhicule 1 dans enfant 2. Il est nécessaire alors de l'insérer puisque le passage par ce nœud est non flexible. La séquence après remplacement est la suivante (d, 1, 2, 3, 4, f). Elle n'est

pas associée à un chemin puisque l'arête $(4, f)$ n'existe pas dans le graphe de déplacement du véhicule 1. Nous savons cependant que les arêtes $(4,7)$ et $(7, f)$ existent. Nous insérons ainsi 7 entre 4 et f . La séquence devient finalement un chemin faisable : $(d,1,2,3,4,7,f)$. La variable de modification de la durée d'arrêt au nœud insérée est choisie d'une manière aléatoire.

Il faut noter que cet algorithme peut ne pas réussir à insérer un nœud. Dans ce cas, l'insertion se fait d'une manière aléatoire et l'ARI va trouver l'itinéraire adapté à la séquence.

Pour la séquence $Seq = (d, s_1, s_2, \dots, s_p, f)$ de V_k^r dans un individu résultant du PMX

Insérer s dans Seq avec $s \in \mathcal{N}(G(V_k^r))$ et $s \neq s_i \forall i \in [1, p]$;

Si Seq est un chemin, alors

Si il existe $q \in [1, p-1]$ tel que (s_q, s) et $(s, s_{q+1}) \in \mathcal{A}(G(V_k^r))$,

alors $Seq = (d, s_1, s_2, \dots, s_q, s, s_{q+1}, \dots, s_p, f)$ et Insertion réussie ;

Sinon, Insertion impossible ;

Si Seq n'est pas un chemin, alors

Si il existe $q \in [1, p-1]$ tel que (s_q, s) et $(s, s_{q+1}) \in \mathcal{A}(G(V_k^r))$

et que $(s_q, s_{q+1}) \notin \mathcal{A}(G(V_k^r))$,

alors $Seq = (d, s_1, s_2, \dots, s_q, s, s_{q+1}, \dots, s_p, f)$ et Insertion réussie ;

Sinon, Insertion impossible.

Fin pour.

Figure IV.25: Algorithme d'insertion pour croisement PMX adapté au codage CIH.

IV.4.6. Algorithme de Recherche d'Itinéraires, ARI

IV.4.6.1. Objectif

Que ce soit pour le CIH ou le CNH, que la solution représentée par un individu soit complète ou pas, le problème de réaffectation des arrêts est déjà résolu. L'objectif du ARI est de trouver pour un ensemble de nœuds donné, un chemin qui lie les extrémités fixes de l'itinéraire recherché et qui passe une seule fois par chaque nœud. Il s'agit en fait d'un problème de recherche d'un chemin hamiltonien qui est NP-Complet [Vandegriend, 98].

Cet algorithme s'applique aux véhicules qui n'ont pas d'itinéraire cohérent dans les individus :

- qui sont créés aléatoirement dans la population initiale ;

- CNH après le croisement et la mutation que nous allons présenter dans IV.4.7 ;
- CIH après le croisement.

Pour un individu CIH ou CNH, les arrêts à desservir sont fixés conformément aux schémas d'affectation. Nous pouvons alors construire pour V_i^l le graphe extrait de $G(V_i^l)$ adapté à ce nouvel ensemble d'arrêts qui lui est affecté. Nous appelons ce nouveau graphe de déplacement $G'(V_i^l)$ avec $\mathcal{N}(G'(V_i^l)) \subset \mathcal{N}(G(V_i^l))$ et $\mathcal{A}(G'(V_i^l)) \subset \mathcal{A}(G(V_i^l))$. Nous savons aussi que les opérateurs de reproduction que nous avons proposés conservent les nœuds à passage non flexible. Par conséquent, $S^*(V_i^l) \subset \mathcal{N}(G'(V_i^l))$.

Hypothèse IV.3 : Le graphe $G'(V_i^l)$ est supposé pour l'instant connexe. Nous supposons de ce fait que le schéma d'affectation est établi pour que toutes les possibilités aboutissent à un graphe connexe.

Sachant que d et f sont les extrémités de l'itinéraire recherché, un chemin C les reliant et égal à la séquence $(d, s_1, s_2, \dots, s_p, f)$ est hamiltonien si :

- $\forall i$ et $j \in [1, p]$, si $i \neq j$ alors $s_i \neq s_j$ pour s_i et $s_j \in \mathcal{N}(G'(V_i^l))$;
- $\forall i \in [1, p]$, $(s_i, s_{i+1}) \in \mathcal{A}(G'(V_i^l))$;
- $(d, s_1) \in \mathcal{A}(G'(V_i^l))$;
- $(s_p, f) \in \mathcal{A}(G'(V_i^l))$.

Exemple IV.4 : Pour le graphe $G(V_i^l)$ de la figure IV.17, nous proposons un exemple de graphe $G'(V_i^l)$ qui en est extrait et qui représente une solution affectant les nœud $d, 1, 2, 3, 6, 7$ et f . La figure suivante illustre le chemin hamiltonien entre les extrémités d et f qui est égal à $(d, 1, 2, 3, 6, 7, f)$.

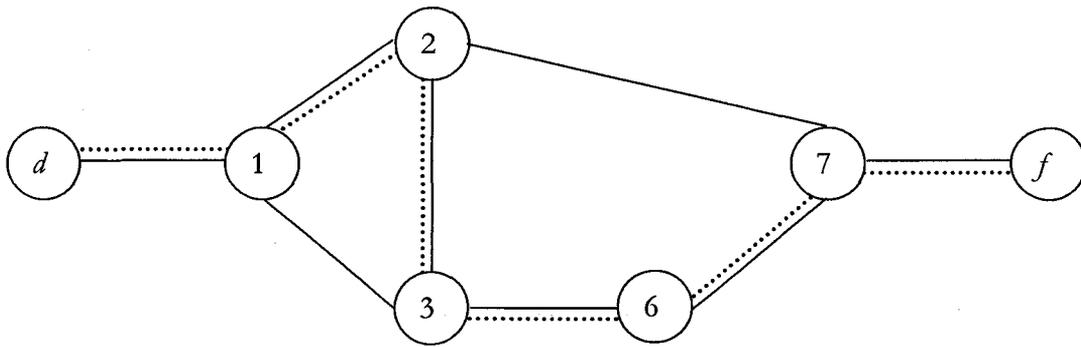


Figure IV.26: Exemple d'un chemin hamiltonien.

Il est à noter, que pour un cas plus général, un graphe connexe peut avoir un ou plusieurs chemins hamiltoniens comme il peut n'en avoir aucun, ce qui constitue la difficulté de l'ARI.

IV.4.6.2. Techniques de recherche du chemin Hamiltonien

Ce problème est en fait bien connu dans les PVC. Nous parlons aussi de cycle hamiltonien quand les deux extrémités du chemin se rejoignent. Si un graphe a un cycle hamiltonien alors il possède au moins un chemin hamiltonien. Dans ce qui suit, nous utilisons le terme degré d'un nœud qui est attribué au nombre d'arêtes liées à un nœud.

Avant de présenter les techniques qui aident à la recherche des chemins hamiltoniens, quelques propriétés peuvent être notées :

- (i) Un graphe complet a toujours au moins un cycle Hamiltonien (cas général des PVC).
- (ii) Dans un graphe avec un cycle Hamiltonien, le degré de chaque nœud doit être ≥ 2 . Si un nœud a exactement un degré 2, alors ses deux arcs incidents doivent être inclus dans le cycle.
- (iii) Si un nœud a un degré égal à 1, alors il doit être absolument l'une des extrémités de tout chemin hamiltonien possible.
- (iv) Si un nœud a 3 voisins de degré 2, alors le graphe ne peut pas avoir de cycle Hamiltonien.
- (v) Si un nœud v a deux voisins a et b qui ont des degrés 2, alors tous les arcs (v,x) , $x \neq \{a,b\}$, ne peuvent être inclus dans aucun cycle Hamiltonien possible. Donc, tout circuit Hamiltonien possible doit contenir la séquence (a,v,b) ou (b,v,a) .

En s'appuyant sur des propriétés de ce type afin de parcourir efficacement les différents chemins possibles, les algorithmes heuristiques de recherche des chemins ou cycles hamiltoniens ont la même structure générale (figure IV.27). Ils commencent par une étude du graphe pour vérifier l'existence d'un chemin hamiltonien selon par exemple la propriété (ii). L'initialisation de la recherche est réalisée à travers le choix d'un nœud qui est susceptible de démarrer un chemin (propriété (iii)). Ensuite, l'extension du chemin se fait par le choix d'un autre nœud qui lui est voisin. Cette extension doit vérifier qu'elle peut aboutir à un chemin hamiltonien (par exemple à l'aide de propriété (v)). Si aucun nœud ne peut être ajouté au chemin, il faut transformer ce dernier pour modifier son nœud de fin. Si la transformation n'est pas possible ou s'il a été déjà transformé plusieurs fois en vain, alors l'algorithme indique un échec. Chaque chemin doit être étudié pour vérifier s'il est hamiltonien ou pas [Vandegriend, 98].

```

EtudeGraphe
InitChemin : choisir un nœud initial de début d'un chemin.
Faire
{
  ChercheNoeud : chercher un nœud qui peut être ajouté au chemin.
  Si ce nœud existe alors,
    Etendre : ajouter le nœud au chemin et vérifier que ce choix peut conduire à un
    chemin hamiltonien. Si c'est le cas, refaire ChercheNoeud. Sinon, enlever le nœud de
    la séquence et refaire ChercheNoeud.
  Sinon {
    Transformer : transformer le chemin en modifiant son nœud de fin. S'il ne peut pas
    être transformé, retourner Echec. Si le chemin a été déjà transformé plusieurs fois,
    sans pouvoir être étendu, retourner Echec.
  }
  FormerChemin : si le chemin trouvé contient tous les nœuds du graphe, vérifier s'il est
  bien hamiltonien. Si c'est le cas, retourner Succès. Sinon, retourner Echec.
}
} Fin faire.

```

Figure IV.27: Structure d'un algorithme heuristique de recherche d'un chemin hamiltonien.

Un autre type d'algorithme, basé sur la technique du « backtracking » ou de retour en arrière, est aussi utilisé. Cette technique consiste en effet à insérer, de manière récursive, un nœud juste avant la fin du chemin.

Pour la transformation des chemins, plusieurs techniques sont citées dans [Vandegriend, 98]. Les chemins peuvent être transformés par extension, par croisement, par transformation rotationnelle avec retour en arrière ou pas, etc. La plus utilisée est d'ailleurs celle de la

transformation rotationnelle que nous retrouvons dans un algorithme connu de recherche des cycles hamiltoniens, l'algorithme de Pósa [Pósa, 76] [Shields & al, 99] [Vandegriend, 98].

Le concept de transformation rotationnelle est illustré par la figure IV.28. Pour un graphe G et un chemin $C = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ dans G . S'il y a une arête (x_i, x_j) , $1 < j < k$, alors le chemin C peut être transformé en un chemin $C' = (x_{j-1}, x_{j-2}, \dots, x_2, x_1, x_j, x_{j+1}, \dots, x_k)$, avec l'ordre des premiers $(j-1)$ nœuds qui est inversé.

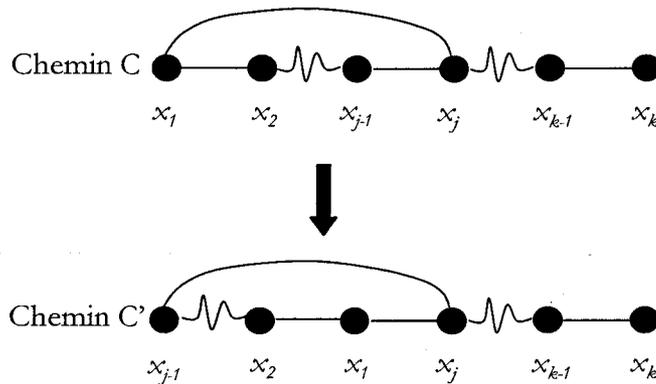


Figure IV.28: Exemple de transformation rotationnelle.

IV.4.6.3. Algorithme de recherche d'itinéraire proposé

La difficulté qui s'ajoute à la résolution de notre problème de recherche d'itinéraire réside dans les extrémités fixées des chemins. Le choix du début de chaque chemin est réduit et les itinéraires faisables doivent absolument finir dans un même nœud.

Afin de nous assurer du respect des extrémités dans chaque chemin hamiltonien, nous proposons d'utiliser la propriété (iii) de ces chemins. En effet, puisque tout nœud de degré 1 doit correspondre à une extrémité d'un chemin hamiltonien éventuel, nous imposons ce degré aux nœuds de début et de fin dans les graphes. De ce fait, nous sommes amenés à ajouter des nœuds fictifs pour respecter cette condition. Ces nœuds fictifs ajoutés doivent alors être à passage non flexible dans le schéma d'affectation.

Exemple IV.5 : Pour $G(V_i^l)$, nous remarquons que le nœud f a plusieurs arêtes incidentes. Il ne possède pas de degré égal à 1 comme le nœud d . Nous ajoutons ainsi le nœud f' entre f et

les nœuds qui sont liés à ce dernier, comme décrit par la figure IV.29. Le nœud f a finalement un degré de 1 et l'arête (f',f) doit faire partie de tout chemin hamiltonien possible.

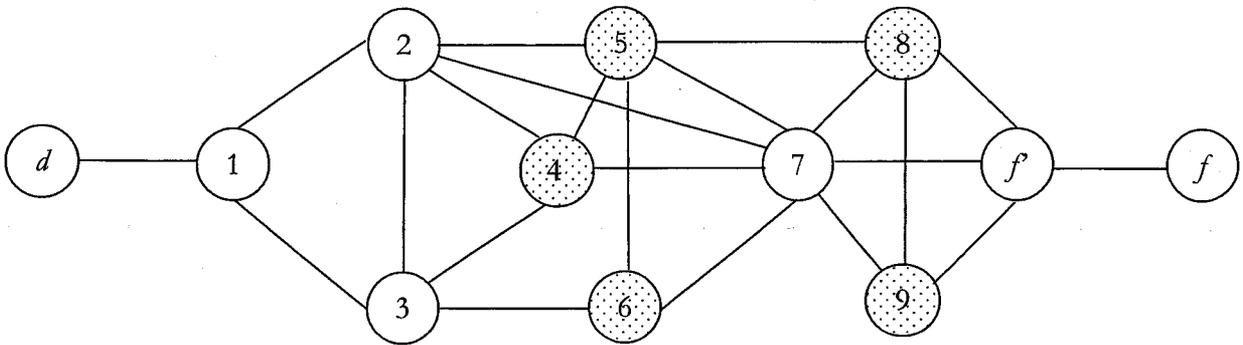


Figure IV.29: Respect des extrémités dans la recherche d'un chemin hamiltonien.

Nous utilisons dans ce qui suit le terme degré courant d'un nœud x , afin de désigner, au cours de l'extension d'un chemin, le nombre d'arêtes incidentes décrétementé du nombre des nœuds qui sont voisins de x et qui sont inclus dans le chemin. Autrement dit, le degré courant de x est le nombre d'arêtes actives dans le graphe (incidentes liées à des nœuds non inclus dans le chemin).

L'algorithme que nous proposons s'appuie sur une technique d'extension de la longueur d'un chemin partiel jusqu'à ce qu'un chemin hamiltonien soit atteint. Le nœud ajouté à un chemin est choisi selon son degré courant. Afin d'avoir un chemin de longueur maximale, il faut éviter de s'arrêter très tôt à un nœud qui ne possède plus d'arêtes actives. Pour remédier à ce problème, nous proposons de choisir à chaque fois le nœud qui a le minimum d'arêtes actives. Cette technique a été utilisée dans la recombinaison génétique des arêtes dans l'extension d'un chemin hamiltonien pour le PVC [Potvin, 96] [Whitley & al, 90]. Elle permet de diminuer les chances d'être bloqué dans un nœud sans issue.

Cependant, cette technique ne peut malheureusement pas assurer l'arrivée à un chemin hamiltonien, puisque le risque de tomber sur un nœud, avec un degré courant nul, existe toujours. En effet, la recherche s'arrête lorsqu'elle a traité tout le voisinage du nœud extrême en-cours en tant qu'extrêmes. Il est ainsi nécessaire d'utiliser une technique de transformation pour changer le nœud final du chemin courant. Nous avons choisi la transformation rotationnelle. Cette transformation est utilisée quand nous n'arrivons pas à étendre un chemin, si le nœud de fin n'est pas égal à f . En fait, si le nœud de fin est f , nous ne pouvons pas effectuer de transformation puisqu'il n'a que f' pour voisin. Donc, si aucune transformation ne peut être effectuée, il faut éliminer le nœud de fin et en choisir un autre qui n'a pas déjà été choisi, etc. Cette élimination des

arêtes d'un chemin correspond alors à un retour en arrière ou à un « backtracking », pour diminuer la longueur du chemin et essayer de l'étendre ensuite d'une autre manière. Les différentes étapes de l'algorithme de recherche d'itinéraire sont illustrées par la figure suivante.

```

EtudeGraphe : si Recherche Impossible, retourner Echec, Sinon :
InitChemin : choisir le nœud initial de début de l'itinéraire.
Faire
{
  ChercheNoeuds :
  {
    Chercher les nœuds qui peuvent être ajoutés au chemin courant.
    Si il y a plus d'un nœud choisir celui qui a le degré courant minimum.
    Si le choix se fait entre différents nœuds avec un même degré courant, en choisir
    un aléatoirement.
    Si ce nœud a été déjà choisi comme extrémité du chemin,
      Alors en choisir un autre.
  }
  Si un noeud a pu être choisi alors,
    Etendre :
    {
      Sinon, ajouter le nœud au chemin et vérifier que ce choix peut conduire à un
      chemin hamiltonien. Si c'est le cas, faire ChercheNoeud. Sinon, enlever le nœud
      de la séquence et faire ChercheNoeud.
    }
  Sinon
  {
    Si le chemin trouvé est hamiltonien, retourner Succès.
    Sinon, le chemin ne contient pas tous les nœuds et il ne peut plus être étendu,
    alors,
      Transformer :
      {
        Si le nœud de fin est f, alors l'enlever et faire ChercheNoeuds.
        Sinon, réaliser une transformation rotationnelle du chemin courant pour avoir
        un nouveau nœud de fin et faire ChercheNoeuds.
        Si le chemin courant ne peut pas être transformé, enlever le nœud de fin et
        faire ChercheNoeuds.
        Si le chemin a été déjà transformé plusieurs fois, sans pouvoir être
        étendu, retourner Echec.
      }
  }
  FormerChemin : si le chemin trouvé contient tous les nœuds du graphe, vérifier s'il est
  bien hamiltonien. Si c'est le cas, retourner Succès. Sinon, retourner Echec.
} Fin faire.

```

Figure IV.30: Algorithme de recherche d'un itinéraire pour CIH et CNH.

Exemple IV.6 : Nous proposons de suivre les étapes d'application de l'ARI considéré à travers l'exemple du graphe de la figure IV.27, en y ajoutant bien sûr le nœud f . Le graphe contient les nœuds $d, 1, 2, 3, 6, 7, f$ et f' (figure IV.31). Le plan de ses arêtes spécifiant les voisins et les degrés des nœuds est présenté dans le tableau suivant.

Tableau IV.4: Plan des arêtes du graphe.

| Noeud | Voisins | Degré |
|-------|----------|-------|
| d | 1 | 1 |
| 1 | $d 2 3$ | 3 |
| 2 | 1 3 7 | 3 |
| 3 | 1 2 6 | 3 |
| 6 | 3 7 | 2 |
| 7 | 2 6 f' | 3 |
| f' | 7 f | 2 |
| f | f' | 1 |

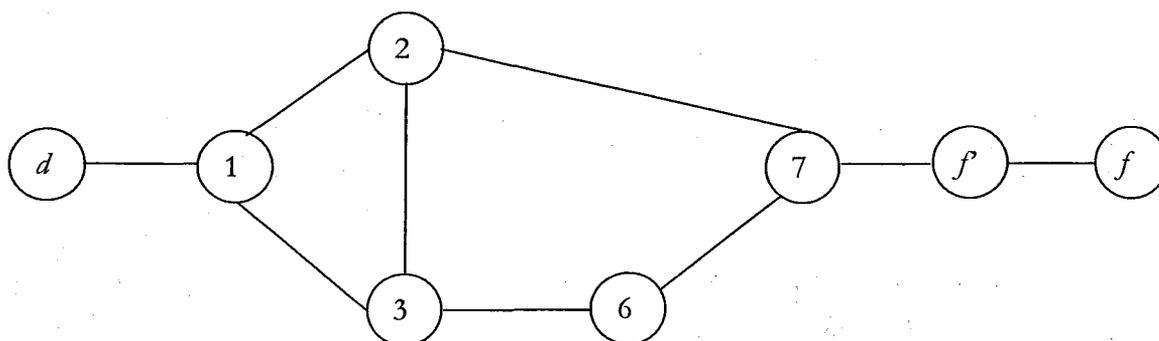


Figure IV.31: Exemple d'un graphe pour la recherche d'itinéraire.

Nous remarquons d'abord que :

- nous n'avons que deux nœuds avec des degrés égaux à 1, d et f ;
- le nœud 7 a deux voisins avec des degrés égaux à 2, donc la séquence $(6, 7, f)$ ou $(f', 7, 6)$ doit être absolument dans tout chemin hamiltonien éventuel.

Nous commençons par le nœud d . Nous n'avons qu'un seul choix pour l'extension du nœud. Le chemin courant est alors $C = (d, 1)$.

Le nœud 1 a les voisins 2 et 3. Le nœud 2 a un degré courant de 2 et le nœud 3 aussi. Nous choisissons par exemple le nœud 3 pour l'ajouter au chemin qui devient $(d, 1, 3)$.

Ce dernier nœud a deux voisins 2 et 6 avec des degrés courants égaux à 1. Nous choisissons le nœud 2 et $C = (d, 1, 3, 2)$.

Nous ne pouvons ajouter que le nœud 7 à ce chemin. Or, nous savons que la séquence $(6, 7, f)$ doit être dans le chemin hamiltonien. Donc, étendre le chemin par l'ajout du nœud 7 à ce niveau ne conduit à rien. Nous essayons alors d'étendre C par un autre nœud, ce qui est impossible et nécessite une transformation rotationnelle. Nous avons alors $C = (d, 1, 2, 3)$ puisque 1 et 2 sont adjacents.

A partir du nœud 3, nous ne pouvons ajouter que 6 et $C = (d, 1, 2, 3, 6)$. Ensuite nous ne pouvons ajouter que 7 et $C = (d, 1, 2, 3, 6, 7)$.

Finalement, nous arrivons à un chemin hamiltonien égal à $(d, 1, 2, 3, 6, 7, f, f)$.

Après l'application de cet ARI, les solutions associées aux individus CNH ou CIH deviennent cohérentes et faisables. Toutefois, l'existence d'un chemin hamiltonien dépend fortement de la nature du graphe. Nous imposons au véhicule de suivre son itinéraire théorique, dans le cas où l'ARI ne trouve pas de chemin hamiltonien.

Nous pouvons cependant nous inspirer des applications d'apprentissage des algorithmes évolutionnistes afin d'exécuter le moins possible l'ARI pour limiter les durées de traitement des perturbations. En effet, à travers l'exécution en temps réel ou en temps anticipé de l'AERAR, nous pouvons construire une base de données des différents itinéraires possibles ou chemins hamiltoniens associés à chaque ensemble de nœuds. De ce fait, l'ARI n'a qu'à prendre directement l'itinéraire recherché à partir de cette base.

Cette mesure a beaucoup d'avantages :

- la réduction de la durée d'exécution totale de l'algorithme de l'AERAR ;
- la connaissance de la totalité des itinéraires possibles pour un même ensemble de nœuds ;
- l'attribution de paramètres de préférence aux différents itinéraires possibles pour un même ensemble d'arrêts ;
- la possibilité du choix de l'un de ces itinéraires suivant leurs durées de parcours totales.

IV.4.7. Opérateurs de mutation

IV.4.7.1. Mutation pour CNH

La mutation des individus CNH correspond à des changements aléatoires des variables de passage et de modification des temps d'arrêt. Cependant, ces changements doivent respecter les

schémas d'affectation des véhicules. La mutation n'a pas à se soucier des itinéraires ou des arêtes entre les nœuds puisque les individus subissent l'ARI dans l'étape qui suit. L'algorithme de mutation est présenté par la figure ci-dessous.

Choisir le nombre de mutations dans l'individu et leurs positions ;

Pour chaque position de mutation (V_k^r, S_j^m)

{

 Si $S_j^m \notin S^*(V_k^r)$, alors

 {

 Si $a_{kj}^{rm} = 0$, alors la mettre à 1 et changer ε_{kj}^{rm} ;

 Sinon, la mettre à 0 et mettre ε_{kj}^{rm} à 0.

 }

 Sinon, changer ε_{kj}^{rm} .

}

Fin pour.

Figure IV.32: Algorithme de mutation pour CNH dans l'AERAR.

IV.4.7.2. Mutation pour CIH

La mutation pour le CIH opère différemment puisque les solutions sont déjà complètes et doivent être mutées de façon cohérente. Autrement dit, les itinéraires issus de la mutation doivent être faisables. Dans ce but, tout opérateur de mutation doit tenir compte des arêtes dans le graphe dans la transformation des itinéraires. Cette transformation peut être réalisée par :

- **L'insertion d'un nœud dans le chemin** : L'insertion d'un nœud x dans un itinéraire est réalisée quand il existe une arête (a,b) telle que (a,x) et (x,b) . Le chemin est alors rallongé de 1. Cet opérateur a été déjà détaillé dans le paragraphe IV.4.5.1 pour le croisement PMX.
- **L'élimination d'un nœud** : Cet opérateur choisit un nœud x inclus dans un chemin associé à V_k^r mais qui n'appartient pas à $S^*(V_k^r)$. Si nous avons la séquence (a,x,b) incluse dans le chemin et si l'arête (a,b) existe dans le graphe $G(V_k^r)$, alors nous éliminons le nœud x .
- **La permutation des positions de deux nœuds** : Si un chemin contient la séquence (u,a,b,v) et si les arêtes (u,b) et (a,v) existent, alors cette séquence peut être transformée en (u,b,a,v) .

La figure ci-dessous montre des exemples d'application de ces différents opérateurs. Une mutation aléatoire des variables de modification des temps d'arrêts seulement accompagne chaque mutation des itinéraires. La mutation est appliquée sur les individus, mais sur chaque ligne d'un même individu, nous pouvons appliquer un opérateur différent selon les conditions d'application. Aussi, chaque opérateur peut être appliqué avec une probabilité spécifique et la somme des probabilités est égale à p_{mut}

Mutation par insertion



Mutation par élimination



Mutation par permutation

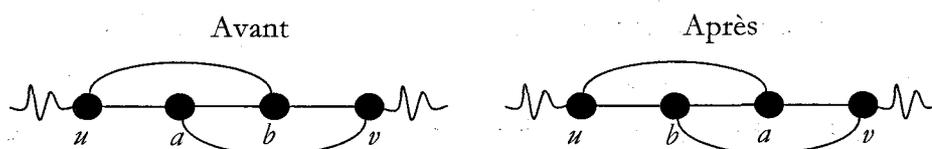


Figure IV.33: Les opérateurs de mutation pour le CIH.

IV.5. Conclusion

La première version de l'approche évolutionniste de régulation que nous avons présentée s'intéresse au seul problème de réaffectation des horaires aux véhicules. A travers cette régulation horaire, nous pouvons noter que les décisions sont très simples et peuvent être facilement interprétées et directement appliquées par les régulateurs.

Cette première version n'est en fait qu'un cas particulier de la deuxième approche évolutionniste de régulation avec reconfiguration, dans le cas d'un réseau à flexibilité nulle. La

deuxième version que nous avons détaillée s'appuie sur les schémas d'affectation des arrêts aux véhicules qui modélisent les flexibilités de leurs itinéraires.

Un autre problème se pose ainsi dans la manipulation génétique des individus à travers les opérateurs de reproduction spécifiques que nous avons illustrés. En effet, il est impératif que les solutions soient cohérentes quant au choix des nouveaux itinéraires. A partir d'un ensemble de nœuds donné, il s'agit alors de trouver un circuit hamiltonien entre deux extrémités fixées. Ce problème NP-Complet de recherche des chemins hamiltoniens a été traité dans la littérature par différents outils et algorithmes heuristiques.

Dans ce but, nous avons présenté un algorithme de recherche d'itinéraire qui s'appuie sur l'extension des chemin par l'ajout d'un nœud avec un degré courant minimum afin d'éviter de finir dans un nœud sans issue. Dans le cas où l'extension de la longueur d'un chemin n'est plus possible, nous appliquons dessus une transformation rotationnelle pour changer son extrémité. Aussi, un retour en arrière est nécessaire quand cette transformation n'aboutit à rien.

Cet algorithme peut cependant être réalisé en « off line » afin de réduire le temps de calcul. Le même algorithme évolutionniste pourrait également servir à l'apprentissage des différents itinéraires possibles avec différents paramètres de flexibilité.

Chapitre V : Applications et Résultats

V.1. Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous présentons les différents résultats des simulations que nous avons réalisées. En effet, comme suite logique du chapitre précédent, nous commençons par présenter des applications de l'AERSR (Approche Evolutionniste de Régulation Sans Reconfiguration) et l'AERAR (Approche Evolutionniste de Régulation Avec Reconfiguration) afin de valider notre méthode de résolution. Dans ce but, nous nous intéressons à plusieurs scénarios de perturbations qui affectent le trafic au sein d'un réseau multimodal. Ces scénarios sont décrits par les tableaux de marche, les fréquences des lignes concernées, les flux de passagers, les retards causés par les incidents et les horizons de régulation. Différents résultats de régulation sont alors proposés à travers l'approche évolutionniste exécutée par les agents ZONEREG.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous exposons le fonctionnement global du SMAAD que nous avons proposé dans le chapitre III. Pour valider le système que nous avons conçu, nous avons effectivement simulé l'exploitation d'une partie d'un réseau de transport afin d'illustrer le comportement des différents agents des modules de surveillance et de régulation du SMAAD que nous avons développé avec le langage de programmation Java.

V.2. Applications de l'approche évolutionniste de la régulation

V.2.1. Scénario 0

V.2.1.1. Description du scénario

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

L'horizon spatio-temporel adapté au problème est construit selon la stratégie de l'agent ZONEPERT décrite dans le chapitre III (cf. III.4.2.4). Comme le montre la figure ci-dessous par rapport à la position des véhicules à l'instant t_{pert} , \mathcal{H} est composé de :

- $\{V_2^0, V_3^0, V_4^0\} \subset \mathcal{V}^{\mathcal{H}}$ et nous prenons $\mathcal{V}^{\mathcal{H}} = \{V_0^0, V_1^0, V_2^0, V_3^0, V_4^0, V_5^0, V_6^0\}$;
- $\mathcal{S}^{\mathcal{H}} = \{S_0^0, S_1^0, S_2^0, S_3^0, S_4^0, S_5^0, S_6^0, S_7^0\}$.

Nous avons considéré V_0^0, V_6^0, S_0^0 et S_7^0 pour traiter les effets de bord dans le calcul des critères (cf. remarque IV.2). Puisqu'il ne s'agit que d'une seule ligne et pour simplifier les figures, nous désignons les stations et les véhicules par des numéros.

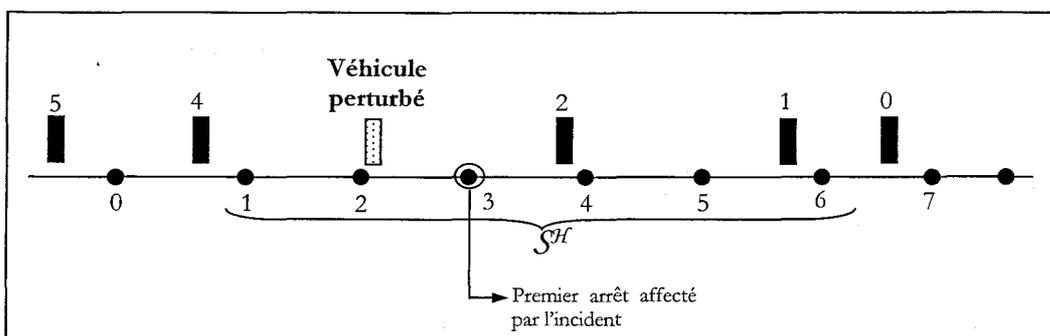


Figure V.1: Construction de l'horizon spatio-temporel.

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

Tableau V.1: Les horaires de passage théoriques pour la ligne l .

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

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

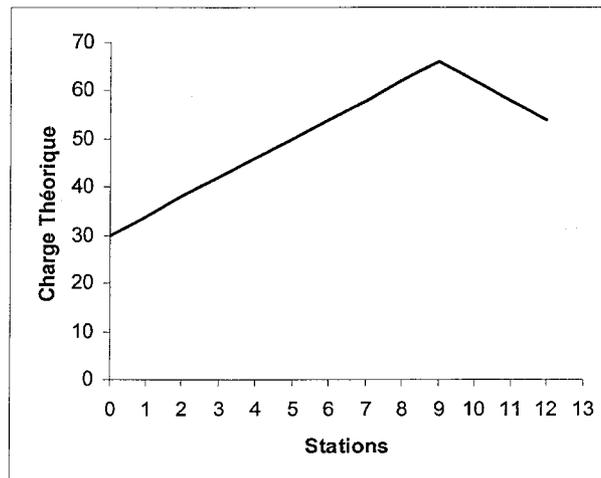


Figure V.2: Courbe des charges théoriques des véhicules de la ligne 0.

V.2.1.2 Résultats proposés par ZONEREG via l'AERSR

Afin de résorber la perturbation que nous venons de décrire, nous avons utilisé l'approche évolutionniste de régulation sans reconfiguration. Nous avons effectué différents tests de simulation pour fixer les paramètres de l'algorithme évolutionniste. Nous avons travaillé avec une population de 100 individus et une condition d'arrêt qui concerne un nombre de générations de 5000. Ce dernier est atteint au bout de 18 secondes dans le pire des cas⁶. Les probabilités de croisement et de mutation sont fixées à 0,8 et 0,005.

Nous autorisons 5 décisions pour un retard de 0 à 4 minutes. Nous présentons dans la figure V.3 les résultats obtenus pour quatre cas de simulation avec différents poids pour les critères de régularité et de ponctualité. Les cellules des matrices représentent les décisions de retard appliquées sur les véhicules. Rappelons que les poids α_1 , α_2 et α_3 représentent respectivement les critères de régularité, correspondance et ponctualité. Les deux premiers exemples traitent une résolution monocritère et les deux autres tiennent compte des deux critères en même temps :

⁶ Les simulations sont réalisées sur un ordinateur Pentium 4

- **Exemple 1 : $\alpha_1=0$, $\alpha_2=0$ et $\alpha_3=1$**

Nous ne considérons dans ce cas que le critère de ponctualité. Or, comme les décisions sont restreintes à l'augmentation des durées des arrêts aux stations, les durées des trajets ne peuvent qu'augmenter par rapport à l'état perturbé. Par conséquent, la solution optimale pour le respect absolu de la ponctualité ne peut correspondre qu'à des décisions nulles dans toutes les cases de la matrice correspondant au chromosome de régulation. Cette solution est atteinte bien rapidement et l'algorithme ne prend que 12 secondes pour effectuer 5000 générations.

- **Exemple 2 : $\alpha_1=1$, $\alpha_2=0$ et $\alpha_3=0$**

Dans ce cas, seul le critère de régularité est considéré. L'allongement des durées des parcours est alors complètement négligé. L'algorithme peut ainsi se permettre de retarder les véhicules en vue d'ajuster les intervalles qui les séparent. Nous remarquons que V_2^0 et V_4^0 ont été retardés de 3 minutes chacun et que V_1^0 et V_5^0 ont été retardés de 2 minutes chacun. Les intervalles ont été ainsi ajustés avec une diminution de 51% de la moyenne des coefficients d'irrégularité, *IREG*, sur les stations de l'horizon considéré (cf. III.4.2.4).

- **Exemple 3 : $\alpha_1=0,9$, $\alpha_2=0$ et $\alpha_3=0,1$**

Ce cas favorise le critère de ponctualité par rapport à celui de régularité, bien que nous ayons $\alpha_3 < \alpha_1$. En effet, les durées des trajets pondérées par les charges des véhicules dépassent largement les durées des attentes pondérées par le nombre de personnes dans les stations, ce qui provoque un déséquilibre entre les ordres de grandeur des critères. Faute de bornes supérieures pour les critères, les ramener à une même échelle est très difficile. Pour l'instant, nous supposons que les poids eux-mêmes tiennent compte d'une manière empirique du problème des ordres de grandeur, ce qui peut être possible grâce à plusieurs simulations anticipées avec différentes tailles de l'horizon.

Le critère de ponctualité étant dominant, nous remarquons une nette différence avec l'exemple 2 quant au nombre de décisions traitées. En effet, seuls les véhicules V_2^0 et V_4^0 sont à retarder de 1 minute. La moyenne des coefficients d'irrégularité a diminué de seulement 29% par rapport à l'état perturbé.

- Exemple 4 : $\alpha_1=0,98$, $\alpha_2=0$ et $\alpha_3=0,02$

Le résultat obtenu dans ce cas est très semblable à celui de l'exemple 2. En effet, V_2^0 et V_4^0 ont été retardés de 3 minutes chacun comme dans l'exemple 2, mais les décisions sont plus distribuées. V_1^0 et V_5^0 ont été retardés de 1 minute chacun au lieu de 2. Le critère de ponctualité a ainsi joué un rôle d'une part dans la distribution des retards en faveur de la diminution des durées des trajets et d'autre part, dans la réduction de l'importance des décisions qui concernent les véhicules plus éloignés de V_3^0 . Par ailleurs, les intervalles semblent un peu plus équilibrés que dans l'exemple 2 grâce à cette distribution des décisions. Nous avons en effet une baisse de 52% du coefficient moyen d'irrégularité.

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

Exemple 1

| | S_0^0 | S_1^0 | S_2^0 | S_3^0 | S_4^0 | S_5^0 | S_6^0 | S_7^0 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| V_0^0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| V_2^0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 |
| V_3^0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_4^0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_5^0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_6^0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Exemple 2

| | S_0^0 | S_1^0 | S_2^0 | S_3^0 | S_4^0 | S_5^0 | S_6^0 | S_7^0 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| V_0^0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_2^0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| V_3^0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_4^0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_5^0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_6^0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Exemple 3

| | S_0^0 | S_1^0 | S_2^0 | S_3^0 | S_4^0 | S_5^0 | S_6^0 | S_7^0 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| V_0^0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| V_2^0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 |
| V_3^0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_4^0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| V_5^0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| V_6^0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Exemple 4

Figure V.3: Résultats de la régulation d'une ligne avec l'AERSR.

La figure suivante montre le schéma de la régulation de l'exemple 4 basé sur le graphique des horaires, en ignorant les véhicules et les stations situés aux limites de l'horizon (cf. I.3.1). Rappelons que les droites diagonales illustrent le déplacement des véhicules entre les stations. Pour mieux distinguer les décisions, nous ne tenons pas compte des temps d'arrêt initiaux. Nous présentons alors TMT, TMP et TMR en fonction de la perturbation et des décisions proposées.

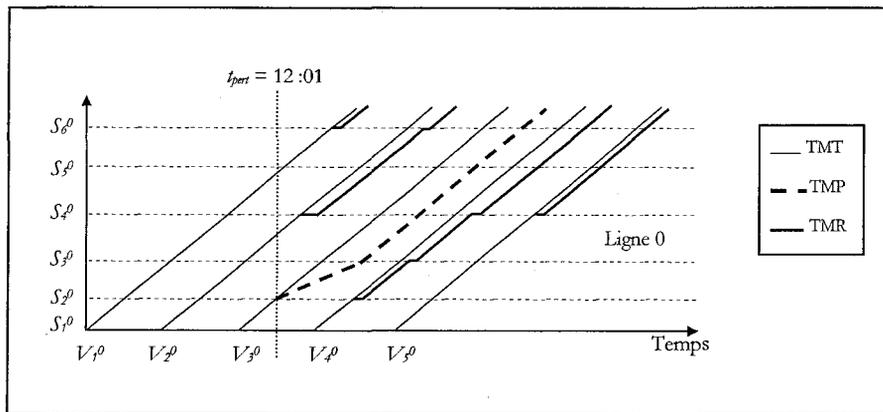


Figure V.4: Schéma de régulation de l'exemple 4.

V.2.2. Scénario 1

V.2.2.1. Description de l'incident

Considérons deux lignes du réseau, 1 et 2, ayant une fréquence de 1 véhicule/10 minutes, qui se croisent au niveau d'un nœud de correspondance. A $t_{pert} = 13:00$, le véhicule V_3^I , en route vers la station S_2^I , rencontre une congestion imprévue dans la circulation et son conducteur estime un retard de 7 minutes à la prochaine station. Ce retard est saisi dans le SAE, directement par le conducteur ou via le régulateur qui prend connaissance de l'évènement par voie radio. L'agent VEHICULE correspondant envoie alors cette estimation à l'agent ARRET associé à S_2^I qui déclenche la création d'un agent INCIDENT.

L'agent ZONEPERT correspondant à la perturbation doit ainsi être créé afin de former un groupe d'agents susceptibles d'être concernés par l'incident et par la régulation. La figure V.5 présente la situation du réseau à t_{pert} . L'ensemble \mathcal{V}^H doit contenir au moins le véhicule perturbé V_3^I , le véhicule qui le précède V_2^I et celui qui le suit V_4^I . L'agent ZONEPERT élargit l'ensemble des véhicules concernés en ajoutant un véhicule en amont de V_4^I et un autre en aval de V_2^I . Pour \mathcal{S}^H , les stations se trouvant entre les positions de V_4^I et V_2^I doivent y être incluses, c'est-à-dire S_0^I , S_1^I et S_2^I . La perturbation se propageant sur les stations suivantes, ZONEPERT ajoute 4 autres stations à \mathcal{S}^H . L'horizon est composé alors de 7 véhicules et 7 stations.

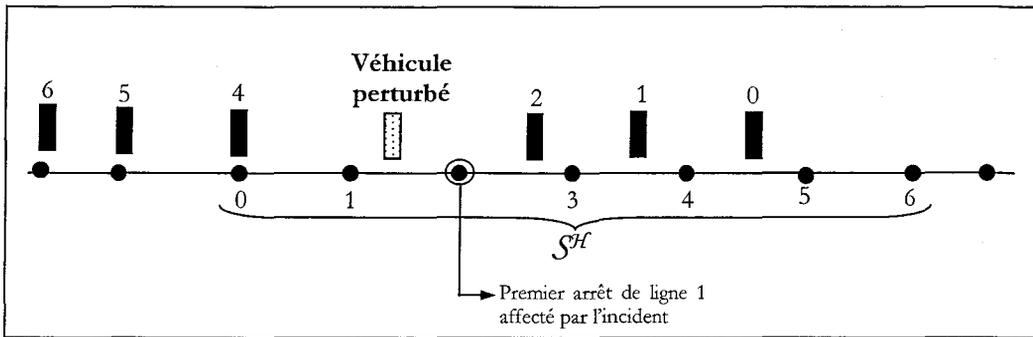


Figure V.5: construction de l'horizon spatio-temporel pour le scénario 1.

ZONEPERT remarque cependant que S^H contient un nœud de correspondance représenté par S_4^1 et qu'on appelle N. Il reconsidère alors l'horizon spatio-temporel qui a été construit en tenant compte des véhicules de la ligne 2 qui vont effectuer une correspondance avec ceux de la ligne 1 après t_{pert} . Les arrêts de la ligne 2 qui sont concernés doivent être à proximité du nœud. ZONEPERT ajoute alors deux stations, une en amont et une autre en aval de ce nœud. Nous proposons aussi d'ajouter deux autres stations en aval afin de mesurer l'impact des mesures de régulation du point de vue ponctualité.

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

Nous remarquons, d'après la figure V.7 illustrant les charges théoriques, que pour les deux lignes, le nœud de correspondance constitue un point critique.

Remarque V.1 : Nous supposons, pour ce scénario ainsi que pour les trois suivants, que la flexibilité des déplacements des véhicules est nulle. Les agents ZONEREG n'utilisent alors que l'AERSR pour déterminer les décisions appropriées au régulateur. Il est alors plus facile de déterminer le critère de ponctualité. En effet, ce dernier calcule la différence des temps de parcours (multipliés par les charges) entre la situation perturbée et la situation régulée. Il suffit alors de calculer la somme des charges des véhicules multipliées par les retards cumulés

aux arrêts et non par les temps de parcours [Fayech, 00][Fayech & al, 01]. L'agent ZONEPERT ne calcule alors que les valeurs initiales de l'attente totale des voyageurs aux arrêts et la durée totale de correspondance.

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

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

Figure V.6: TMP construit par l'agent ZONEPERT pour le scénario 1.

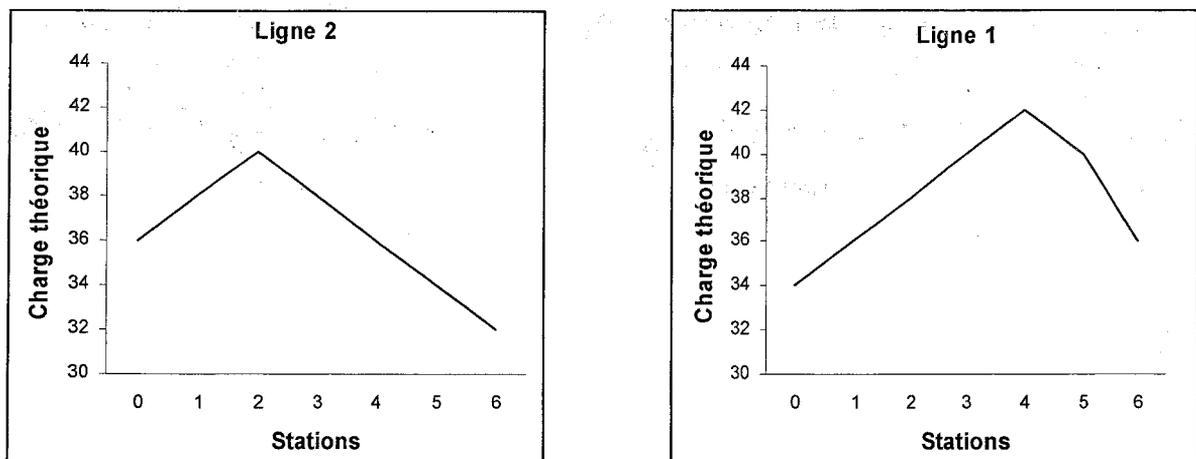


Figure V.7: Charges théoriques des véhicules aux arrêts de l'horizon.

Pour ce scénario, l'agent ZONEPERT trouve des valeurs initiales des critères égales à :

- $AT_0 = 17780$ passagers-minute ;
- $TT_0 = 570$ passagers-minute (ce qui équivaut à une attente de 10 minutes pour 57 personnes).

V.2.2.2. Résultats proposés

Une fois l'agent ZONEREG créé, il récupère les données collectées par ZONEPERT en vue de construire le codage CH et exécuter l'algorithme. Nous présentons dans ce qui suit des résultats issus de différentes simulations. Pour 5000 générations, le temps d'exécution est compris entre 26 et 29 secondes.

Nous supposons que les flux au niveau des différentes stations des deux lignes sont égaux à 2 passagers par minute et que les taux de correspondance entre les véhicules sont de 20%. Autrement dit, 20% des personnes à bord d'un véhicule à son arrivée au nœud vont effectuer une correspondance vers l'autre ligne. Nous limitons le nombre de décisions à 4 (retarder de 0, 1, 2 ou 3 minutes).

La figure V.8 illustre deux exemples de régulation monocritère. L'exemple 5 tient compte du critère de régularité seulement et le deuxième du critère de correspondance. Nous remarquons d'abord le nombre important des décisions non nulles dans les deux exemples et surtout dans le 6. En effet, en l'absence du critère de ponctualité qui minimise les modifications des durées de parcours, l'algorithme se permet de retarder le plus possible les véhicules afin de satisfaire les deux autres critères. Pour l'exemple 5, la valeur maximale de la fonction coût atteinte est égale à 278 passagers-minute, ce qui équivaut par exemple à la réduction de 10 minutes de l'attente aux stations de plus de 27 personnes. Pour l'exemple 6, la valeur maximale de la réduction des durées de correspondance est égale à 139. Autrement dit, près de 28 personnes vont gagner 5 minutes sur la durée de leur transfert entre les lignes.

L'exemple 7 de la figure V.9 représente un résultat pour une régulation multicritère avec les poids suivants : $\alpha_1 = 0.25$ pour la régularité, $\alpha_2 = 0.74$ pour la correspondance et $\alpha_3 = 0.01$ pour la ponctualité. Nous considérons l'ordre de grandeur des différents critères dans le choix de leurs poids. Cet exemple a pour objectif de favoriser la correspondance.

Ligne 1

| | S_0^1 | S_1^1 | S_2^1 | S_3^1 | N | S_5^1 | S_6^1 |
|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|
| V_0^1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| V_2^1 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 1 | 0 |
| V_3^1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_4^1 | 0 | 1 | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| V_5^1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_6^1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Ligne 1

| | S_0^1 | S_1^1 | S_2^1 | S_3^1 | N | S_5^1 | S_6^1 |
|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|
| V_0^1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 0 |
| V_2^1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 3 | 3 | 0 |
| V_3^1 | 0 | 0 | 3 | 3 | 1 | 0 | 0 |
| V_4^1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 3 | 0 | 0 |
| V_5^1 | 0 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 0 |
| V_6^1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Ligne 2

| | S_0^2 | S_1^2 | N | S_3^2 | S_4^2 | S_5^2 | S_6^2 |
|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| V_0^2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_2^2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_3^2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_4^2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_5^2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_6^2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Ligne 2

| | S_0^2 | S_1^2 | N | S_3^2 | S_4^2 | S_5^2 | S_6^2 |
|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| V_0^2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_2^2 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 2 | 0 |
| V_3^2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 |
| V_4^2 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 2 | 0 |
| V_5^2 | 0 | 3 | 3 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| V_6^2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

$\alpha_1=1, \alpha_2=0$ et $\alpha_3=0$

$\alpha_1=0, \alpha_2=1$ et $\alpha_3=0$

Exemple 5

Exemple 6

Figure V.8: Exemples de régulation monocritère pour scénario 1.

Ligne 1

| | S_0^1 | S_1^1 | S_2^1 | S_3^1 | N | S_5^1 | S_6^1 |
|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|
| V_0^1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| V_2^1 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 |
| V_3^1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_4^1 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| V_5^1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| V_6^1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Ligne 2

| | S_0^2 | S_1^2 | N | S_3^2 | S_4^2 | S_5^2 | S_6^2 |
|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| V_0^2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_2^2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| V_3^2 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_4^2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_5^2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_6^2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

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

Exemple 7

Figure V.9: Exemple de régulation multicritère pour scénario 1.

La figure V.10 présente le graphique des horaires associés à la situation théorique, perturbée et régulée selon l'exemple 7. Les décisions proposées pour les véhicules de la ligne 1 tendent à améliorer la régularité en minimisant les lacunes et trains de bus. La solution fournie résulte en une réduction de la moyenne des coefficients d'irrégularité, $IREG$, aux arrêts de 38%. En effet, cette moyenne est égale à 0.07 pour la situation perturbée et à 0.043 pour la situation régulée.

Par ailleurs, la décision prise sur V_3^2 a pour but d'améliorer la durée de la correspondance. En effet, les passagers en correspondance de V_3^1 vers la ligne 2 n'ont plus à attendre 8 minutes puisque la correspondance vers V_3^2 aura finalement lieu.

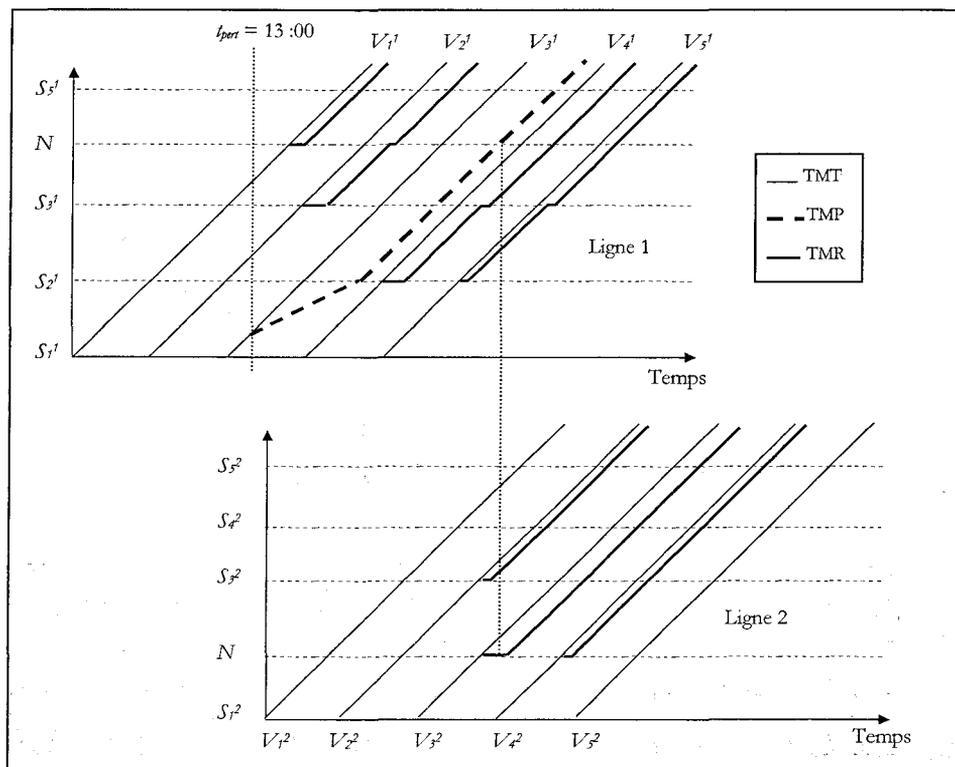


Figure V.10: Schéma de régulation de l'exemple 7.

La figure V.11 illustre l'évolution de la moyenne des coûts de la population avant la sélection des individus qui vont subir le croisement et la mutation. Nous remarquons que l'algorithme converge avant d'atteindre les 2500 générations, autrement dit, au bout de 14 secondes de temps d'exécution, ce qui est bien raisonnable pour une application en temps réel. Nous opérons avec une population de 100 individus et des probabilités de croisement et de mutation utilisées égales respectivement à 0.8 et 0.05. Nous avons fixé ces paramètres après plusieurs simulations pour avoir un meilleur compromis entre l'exploitation des solutions et l'exploration de l'espace de recherche. Ils sont maintenus pour toutes les prochaines simulations et pour les autres scénarios.

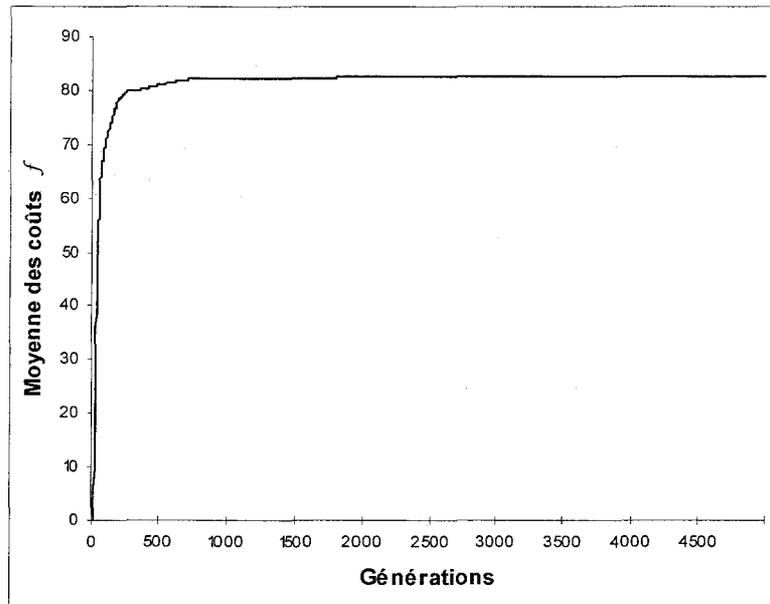


Figure V.11: Courbe de convergence pour l'exemple 7.

V.2.3. Scénario 2

V.2.3.1. Description de l'incident

Pour ce scénario, nous considérons deux lignes, 3 et 4, d'un réseau multimodal avec une fréquence de 1 véhicule toutes les 20 minutes. A $t_{pert} = 11:55$, le véhicule V_2^3 est attendu à la station S_2^3 avec un retard de 12 minutes. Il arrivera à 12:14 au lieu de 12:02 à cette station.

De même que pour le scénario précédent, l'agent ZONEPERT réunit une société d'agents formée de 7 agents VEHICULE et 6 agents ARRET associés à la ligne 3. A cette société contenant un nœud de correspondance, ZONEPERT ajoute d'autres agents liés à la ligne 4. Au total, l'horizon est composé de 14 véhicules et 13 stations. Pour ce scénario, les valeurs initiales des critères de régularité et de ponctualité, calculées par l'agent ZONEPERT, sont égales à 35040 pour AT_0 et à 1129 pour TT_0 .

Hormis le problème d'irrégularité des intervalles de passage, la perturbation considérée agit sur les durées des correspondances puisque V_2^3 va arriver au nœud après le passage de V_2^4 . Les passagers en transfert devront alors attendre encore 18 minutes pour rejoindre la ligne 4 et poursuivre leurs parcours. Le retard total engendré pour ces personnes est alors de 30 minutes, ce qui nécessite des mesures de régulation.

Nous prenons des flux égaux à 1 passager par minute. Les modèles des charges théoriques des véhicules des deux lignes sont triangulaires et ont donc la même allure que ceux présentés précédemment.

V.2.3.2. Résultats proposés

L'agent ZONEREG utilise l'approche AERSR afin de résorber la perturbation en cours. Nous présentons plusieurs cas de régulation proposés avec différents poids pour les critères considérés. Comme pour le scénario précédent, les exemples 8 et 9 de la figure V.12 concernent une régulation monocritère, où le nombre de décisions non nulles est important puisque le critère de ponctualité n'est pas considéré.

Les deux exemples de la figure V.13 illustrent l'amélioration des résultats précédents en tenant compte du critère de ponctualité afin de diminuer les modifications des horaires. Pour l'exemple 10, nous voyons que seuls les véhicules V_1^3 et V_3^3 ont été retardés en vue d'améliorer la régularité. La moyenne des coefficients *IREG* des stations a diminué de 17%. Pour l'exemple 11, V_2^4 doit être retardé de 3 minutes pour que la correspondance puisse finalement avoir lieu.

| Ligne 1 | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|
| | S_0^3 | S_1^3 | S_2^3 | S_3^3 | N | S_5^3 | S_6^3 |
| V_0^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | 0 |
| V_2^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_3^3 | 0 | 3 | 3 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| V_4^3 | 0 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| V_5^3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| V_6^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Ligne 2 | | | | | | | |
|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| | S_0^4 | S_1^4 | N | S_3^4 | S_4^4 | S_5^4 | S_6^4 |
| V_0^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_2^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_3^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_4^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_5^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_6^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

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

Exemple 8

| Ligne 1 | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|
| | S_0^4 | S_1^4 | S_2^4 | S_3^4 | N | S_5^4 | S_6^4 |
| V_0^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | 0 |
| V_2^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| V_3^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 |
| V_4^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| V_5^4 | 0 | 3 | 3 | 3 | 3 | 0 | 0 |
| V_6^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Ligne 2 | | | | | | | |
|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| | S_0^4 | S_1^4 | N | S_3^4 | S_4^4 | S_5^4 | S_6^4 |
| V_0^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 |
| V_2^4 | 0 | 0 | 3 | 3 | 1 | 0 | 0 |
| V_3^4 | 0 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 0 |
| V_4^4 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| V_5^4 | 0 | 0 | 3 | 2 | 2 | 2 | 0 |
| V_6^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

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

Exemple 9

Figure V.12: Exemples de régulation monocritère pour le scénario 2.

| Ligne 1 | | | | | | | |
|---------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|---------|
| | S_0^3 | S_1^3 | S_2^3 | S_3^3 | N | S_5^3 | S_6^3 |
| V_0^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| V_2^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_3^3 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| V_4^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_5^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_6^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Ligne 2 | | | | | | | |
|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| | S_0^4 | S_1^4 | N | S_3^4 | S_4^4 | S_5^4 | S_6^4 |
| V_0^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_2^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_3^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_4^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_5^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_6^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

$\alpha_1=0.8, \alpha_2=0$ et $\alpha_3=0.2$

Exemple 10

| Ligne 1 | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|
| | S_0^3 | S_1^3 | S_2^3 | S_3^3 | N | S_5^3 | S_6^3 |
| V_0^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_2^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_3^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_4^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_5^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_6^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Ligne 2 | | | | | | | |
|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| | S_0^4 | S_1^4 | N | S_3^4 | S_4^4 | S_5^4 | S_6^4 |
| V_0^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_2^4 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_3^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_4^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_5^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_6^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

$\alpha_1=0, \alpha_2=0.95$ et $\alpha_3=0.05$

Exemple 11

Figure V.13: Amélioration des solutions avec prise en compte du critère de ponctualité.

Nous avons aussi réalisé des simulations en tenant compte des trois critères simultanément. En effet, la figure suivante présente la solution trouvée pour les poids suivants : $\alpha_1 = 0.25, \alpha_2 = 0.71$ et $\alpha_3 = 0.04$. Les décisions proposées pour V_1^3 et V_3^3 tendent à améliorer la régularité des intervalles. En effet, la moyenne des coefficients *IREG* a diminué de 25%. La mesure imposée sur V_2^4 favorise la correspondance comme dans l'exemple 11. Nous remarquons alors que la solution considérée est proche d'une combinaison des deux précédentes.

| Ligne 1 | | | | | | | |
|---------|---------|---------|----------|---------|----------|---------|---------|
| | S_0^3 | S_1^3 | S_2^3 | S_3^3 | N | S_5^3 | S_6^3 |
| V_0^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 |
| V_2^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_3^3 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_4^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_5^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_6^3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Ligne 2 | | | | | | | |
|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| | S_0^4 | S_1^4 | N | S_3^4 | S_4^4 | S_5^4 | S_6^4 |
| V_0^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_2^4 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_3^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_4^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_5^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_6^4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

$$\alpha_1 = 0.25, \alpha_2 = 0.71 \text{ et } \alpha_3 = 0.04$$

Exemple 12

Figure V.14: Exemple de régulation multicritère pour le scénario 2.

V.2.4. Scénario 3

V.2.4.1. Description de l'incident

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

⁷ [Transpole] www.transpole.fr

L'agent ARRET correspondant à S_2^T crée, à t_{pert} , un agent INCIDENT qui, par la suite, crée un agent ZONEPERT relatif à la zone de perturbation concernée. Ce dernier commence d'abord par réunir les agents de la ligne T qui correspondent à quelques arrêts en amont et aval de S_2^T et aussi à quelques trams en amont et en aval du tram perturbé. Quand il s'aperçoit qu'il y a un nœud de correspondance dans la zone de perturbation et que des correspondances sont prévues, il réunit de la même manière les agents relatifs à la ligne B impliqués dans la perturbation. Nous prenons une zone perturbée qui regroupe, par exemple, 8 trams et 5 bus ainsi que 8 stations pour la ligne de tram, 8 pour la ligne de bus et le nœud N . Nous considérons plus de trams que de bus à cause de la fréquence des lignes. L'agent ZONEPERT calcule alors le TMP afin de voir l'impact de la perturbation sur le trafic du réseau.

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

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

Figure V.15: TMP construits par l'agent ZONEPERT pour scénario 3.

Sachant que le flux de passagers pour les trams est de 2 passagers/minute et que celui des bus est de 1 passager/minute, lors du diagnostic de l'incident, l'agent ZONEPERT calcule les valeurs initiales des critères de régularité : $AT_0 = 29531$ et $TT_0 = 911$.

V.2.4.2. Résultats proposés

L'agent ZONEREG, créé par l'agent INCIDENT, tient compte de toutes les informations collectées par ZONEPERT pour démarrer son AERSR. Les exemples monocritères sont présentés dans la figure suivante. Pour la régularité dans l'exemple 13, la solution présentée propose de combler les lacunes qui résultent de l'incident en retardant les trams qui précèdent celui qui est perturbé. Toutefois, des décisions ont été prises sur la ligne de bus aussi. Les horaires étant effectivement issus d'un réseau réel, les intervalles théoriques de passage entre les bus ne sont pas exactement égaux à 10 minutes, ce qui justifie les mesures proposées pour les ajuster.

Nous avons remarqué que pour le cas de l'optimisation du critère de correspondance, les décisions qui s'appliquent sur les véhicules après le nœud sont insignifiantes puisqu'elles n'influent pas sur la correspondance, ce qui explique leur nombre important. Pour l'exemple 14, nous avons alors essayé de contrôler leurs nombres à travers les opérateurs de croisement, de mutation et même dans la construction de la population initiale. En fait, nous avons imposé un retard cumulé, provoqué par les décisions, inférieur à 5 minutes pour chaque véhicule afin de conserver au mieux leur ponctualité.

| Ligne T | | | | | | | | | |
|---------|-------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| | S_0 | S_1^T | S_2^T | S_3^T | N | S_5^T | S_6^T | S_7^T | S_8^T |
| V_0^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| V_2^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| V_3^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_4^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_5^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_6^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| V_7^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Ligne B | | | | | | | | | |
|---------|-------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| | S_0 | S_1^B | S_2^B | S_3^B | N | S_5^B | S_6^B | S_7^B | S_8^B |
| V_0^B | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^B | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| V_2^B | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_3^B | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_4^B | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

$\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0$ et $\alpha_3 = 0$

Exemple 13

| Ligne T | | | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| | S_0^T | S_1^T | S_2^T | S_3^T | N | S_5^T | S_6^T | S_7^T | S_8^T |
| V_0^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| V_2^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_3^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_4^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 1 | 0 |
| V_5^T | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_6^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| V_7^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Ligne B | | | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| | S_0^B | S_1^B | S_2^B | S_3^B | N | S_5^B | S_6^B | S_7^B | S_8^B |
| V_0^B | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^B | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| V_2^B | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_3^B | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 |
| V_4^B | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

$\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 1$ et $\alpha_3 = 0$

Exemple 14

Figure V.16: Exemples de régulation monocritère pour scénario 3.

Pour la régulation multicritère, la figure suivante illustre deux solutions résultant de l'PAERSR. L'exemple 15 ne résout pas le problème de la correspondance puisque le poids du critère qui lui est relatif n'est pas assez élevé par rapport à celui de la régularité. La seule décision prise pour un des bus est issue de la légère irrégularité des intervalles théoriques de passage.

Pour l'exemple 16, nous accordons un peu moins d'importance à la ponctualité, ce qui explique un plus grand nombre de décisions non nulles par rapport à l'exemple 15. Ces décisions ont pour but de minimiser l'attente des voyageurs pour la ligne du tramway. Par ailleurs, le retard cumulé au nœud imposé sur le bus V_2^B et égal à 4 minutes assure finalement la correspondance qui devait être ratée à cause de la perturbation. Les autres décisions sur les bus se rapportent à la régularité des intervalles suite au retard au nœud.

| Ligne T | | | | | | | | | |
|---------|-------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|
| | S_0 | S_1^T | S_2^T | S_3^T | N | S_5^T | S_6^T | S_7^T | S_8^T |
| V_0^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_2^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| V_3^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_4^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_5^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_6^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_7^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Ligne T | | | | | | | | | |
|---------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|
| | S_0 | S_1^T | S_2^T | S_3^T | N | S_5^T | S_6^T | S_7^T | S_8^T |
| V_0^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_2^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 1 | 0 |
| V_3^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_4^T | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 |
| V_5^T | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_6^T | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 |
| V_7^T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Ligne B | | | | | | | | | |
|---------|-------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|
| | S_0 | S_1^B | S_2^B | S_3^B | N | S_5^B | S_6^B | S_7^B | S_8^B |
| V_0^B | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^B | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| V_2^B | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_3^B | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_4^B | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Ligne B | | | | | | | | | |
|---------|-------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|
| | S_0 | S_1^B | S_2^B | S_3^B | N | S_5^B | S_6^B | S_7^B | S_8^B |
| V_0^B | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1^B | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_2^B | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_3^B | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 |
| V_4^B | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

$\alpha_1 = 0.4, \alpha_2 = 0.58$ et $\alpha_3 = 0.02$

Exemple 15

$\alpha_1 = 0.14, \alpha_2 = 0.85$ et $\alpha_3 = 0.01$

Exemple 16

Figure V.17: Exemples de régulation multicritère pour le scénario 3.

Pour ce scénario, nous notons que pour que la correspondance menacée soit assurée, il est nécessaire de retarder V_2^B d'au moins 4 minutes. Il faut alors tenir moins compte du critère de ponctualité, puisqu'une telle décision va défavoriser la durée totale des trajets par au moins 4 fois la charge du bus.

Pour ce qui concerne la population de l'algorithme évolutionniste, la figure suivante illustre l'évolution de la moyenne des coûts des individus au cours des générations, lors de l'application de l'AERSR à l'exemple 16.

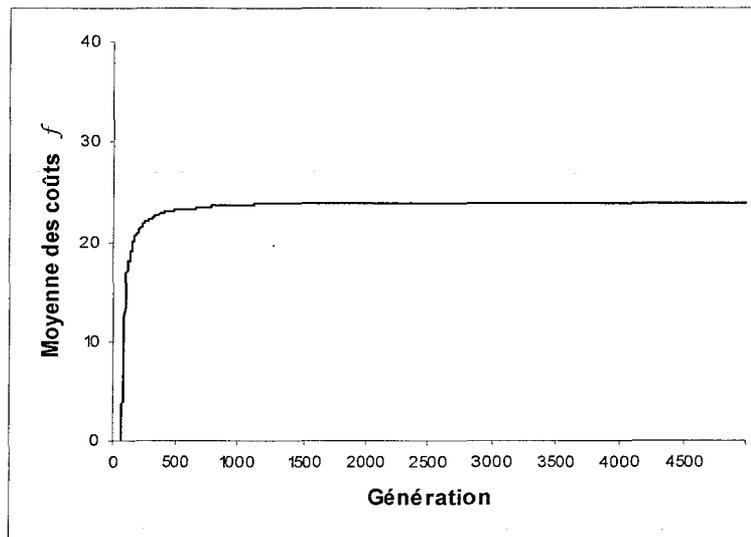


Figure V.18: Courbe de convergence pour l'exemple 15.

V.2.5. Scénario 4

V.2.5.1. Description de l'incident

Nous considérons trois lignes de bus, 6, 12 et 13, du réseau multimodal de Transpole qui ont pour terminus la gare principale de la ville de Lille, Gare Lille Flandres [Transpole]. Cette station constitue aussi un nœud de correspondance entre les différentes lignes. A $t_{pert} = 18:00$, en sortant de la station Danel, S_2^6 , V_2^6 rencontre un problème de circulation qui va lui causer un retard d'au moins 8 minutes. Aussi, le véhicule V_3^6 qui le suit va rencontrer le même problème mais avec moins d'intensité puisqu'il commencera à se dissiper. Ce véhicule aura alors un retard de 4 minutes à toutes les stations qui se trouvent après Danel.

L'agent associé à cet arrêt doit créer un agent INCIDENT quand il s'aperçoit du retard estimé de V_2^6 . Cette estimation se base sur le coefficient de fluidité de la circulation (cf. III.4.2.1). Lorsque ce même arrêt reçoit une estimation de l'arrivée de V_3^6 , il la considère comme une autre perturbation. Cette dernière étant liée aux mêmes causes du retard de V_2^6 . L'agent INCIDENT, qui surveille l'arrivée des nouveaux incidents, doit mettre à jour ses connaissances afin de

résorber simultanément les deux retards. Il se trouve que ce véhicule est représenté dans la société d'agents gérée par l'agent ZONEPERT qui est créé par INCIDENT. Cet agent doit aussi, le cas échéant, effectuer une mise à jour de ses connaissances afin de saisir les données relatives aux deux perturbations.

L'agent ZONEPERT doit en fait réunir les agents ARRET associés à la ligne 6 et qui vont être affectés par l'incident. Nous choisissons de considérer 5 arrêts après la station S_2^6 et 2 arrêts avant. Comme le nœud de correspondance est inclus dans cet ensemble d'arrêts, ZONEPERT doit considérer aussi des arrêts et véhicules des lignes 12 et 13.

Pour l'ensemble \mathcal{V}^H , il contient les deux véhicules perturbés, les deux autres qui les suivent et les deux qui les précèdent. ZONEPERT y inclut aussi 6 véhicules de la ligne 12 puisqu'elle a la même fréquence que la ligne 6. La ligne 13 n'est pas gérée en fréquence, les intervalles de passages successifs de ses véhicules varient à peu près entre 15 et 20 minutes. Nous considérons 5 véhicules de cette ligne.

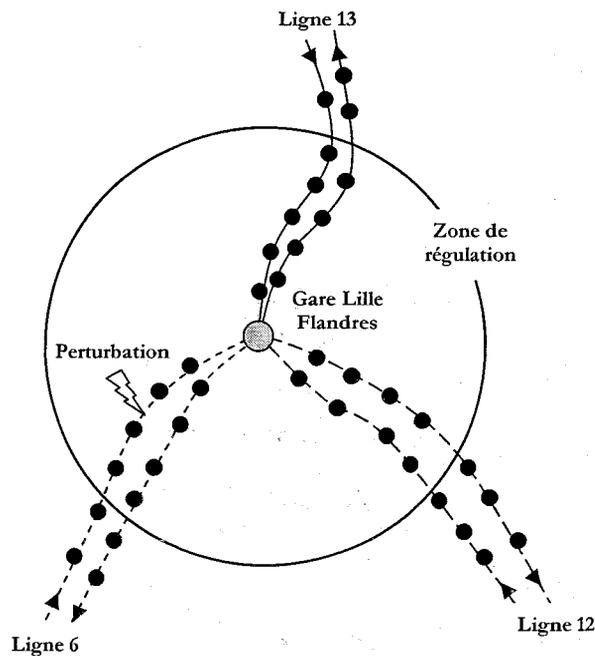


Figure V.19: Construction de l'horizon de régulation pour scénario 4.

En dehors de l'irrégularité provoquée par l'incident en question, les horaires de correspondance risquent d'être altérés. En effet, dans l'état théorique, V_2^6 arrive au nœud à 18:14 et certains des passagers vont emprunter le véhicule V_2^{13} ligne 13, qui rappelons-le a une fréquence moins importante, à 18:21. Dans l'état perturbé, ces passagers vont rater V_2^{13}

puisqu'ils arrivent au nœud à 18 :22 et ils doivent attendre V_3^{13} qui part à 18 :48 de la gare. Ces passagers sont donc retardés de 27 minutes. La figure suivante présente les différents horaires de départ (D) et d'arrivée (A) à la gare dans les situations théorique et perturbée. Le temps d'arrêt au terminus est appelé temps de battement. Nous supposons qu'il correspond à une pause pour les conducteurs ou une relève, ce qui ne nous autorise pas à le modifier. Les horaires perturbés sont calculés par l'agent ZONEPERT. Les valeurs initiales des critères sont égales à 57016 pour AT_0 et 2436 pour TT_0 .

| Horaires théoriques au nœud | | | | Horaires perturbés au nœud | | | |
|-----------------------------|--------|--------|---------|----------------------------|--------|--------|---------|
| Ligne | Numéro | A ou D | Horaire | Ligne | Numéro | A ou D | Horaire |
| 13 | 0 | A | 17:33 | 13 | 0 | A | 17:33 |
| 13 | 0 | D | 17:41 | 13 | 0 | D | 17:41 |
| 13 | 1 | A | 17:47 | 13 | 1 | A | 17:47 |
| 6 | 0 | A | 17:55 | 6 | 0 | A | 17:55 |
| 13 | 1 | D | 17:55 | 13 | 1 | D | 17:55 |
| 12 | 0 | A | 17:56 | 12 | 0 | A | 17:56 |
| 6 | 0 | D | 17:59 | 6 | 0 | D | 17:59 |
| 6 | 1 | A | 18:05 | 6 | 1 | A | 18:05 |
| 12 | 0 | D | 18:08 | 12 | 0 | D | 18:08 |
| 12 | 1 | A | 18:10 | 12 | 1 | A | 18:10 |
| 6 | 1 | D | 18:11 | 6 | 1 | D | 18:11 |
| 6 | 2 | A | 18:14 | 13 | 2 | A | 18:14 |
| 13 | 2 | A | 18:14 | 12 | 1 | D | 18:18 |
| 12 | 1 | D | 18:18 | 13 | 2 | D | 18:21 |
| 6 | 2 | D | 18:20 | 12 | 2 | A | 18:21 |
| 13 | 2 | D | 18:21 | 6 | 2 | A | 18:22 |
| 12 | 2 | A | 18:21 | 6 | 3 | A | 18:27 |
| 6 | 3 | A | 18:23 | 6 | 2 | D | 18:28 |
| 6 | 3 | D | 18:28 | 12 | 2 | D | 18:28 |
| 12 | 2 | D | 18:28 | 12 | 3 | A | 18:30 |
| 12 | 3 | A | 18:30 | 6 | 3 | D | 18:32 |
| 12 | 3 | D | 18:37 | 12 | 3 | D | 18:37 |
| 12 | 4 | A | 18:38 | 12 | 4 | A | 18:38 |
| 6 | 4 | A | 18:39 | 6 | 4 | A | 18:39 |
| 6 | 4 | D | 18:44 | 6 | 4 | D | 18:44 |
| 6 | 5 | A | 18:45 | 6 | 5 | A | 18:45 |
| 13 | 3 | A | 18:45 | 13 | 3 | A | 18:45 |
| 12 | 4 | D | 18:47 | 12 | 4 | D | 18:47 |
| 13 | 3 | D | 18:48 | 13 | 3 | D | 18:48 |
| 12 | 5 | A | 18:49 | 12 | 5 | A | 18:49 |
| 6 | 5 | D | 18:51 | 6 | 5 | D | 18:51 |
| 12 | 5 | D | 18:57 | 12 | 5 | D | 18:57 |
| 13 | 4 | A | 18:58 | 13 | 4 | A | 18:58 |
| 13 | 4 | D | 19:05 | 13 | 4 | D | 19:05 |

Figure V.20: Horaires d'arrivée et de départ des bus au nœud de correspondance.

V.2.5.2. Résultats proposés

L'agent ZONEREG applique l'AERSR sur ce scénario afin de résorber la perturbation en respectant les trois critères considérés. Nous commençons par présenter les exemples

imparfaite des horaires théoriques. De même, les décisions sur les véhicules de la ligne 13 après le nœud ont pour but d'améliorer la régularité.

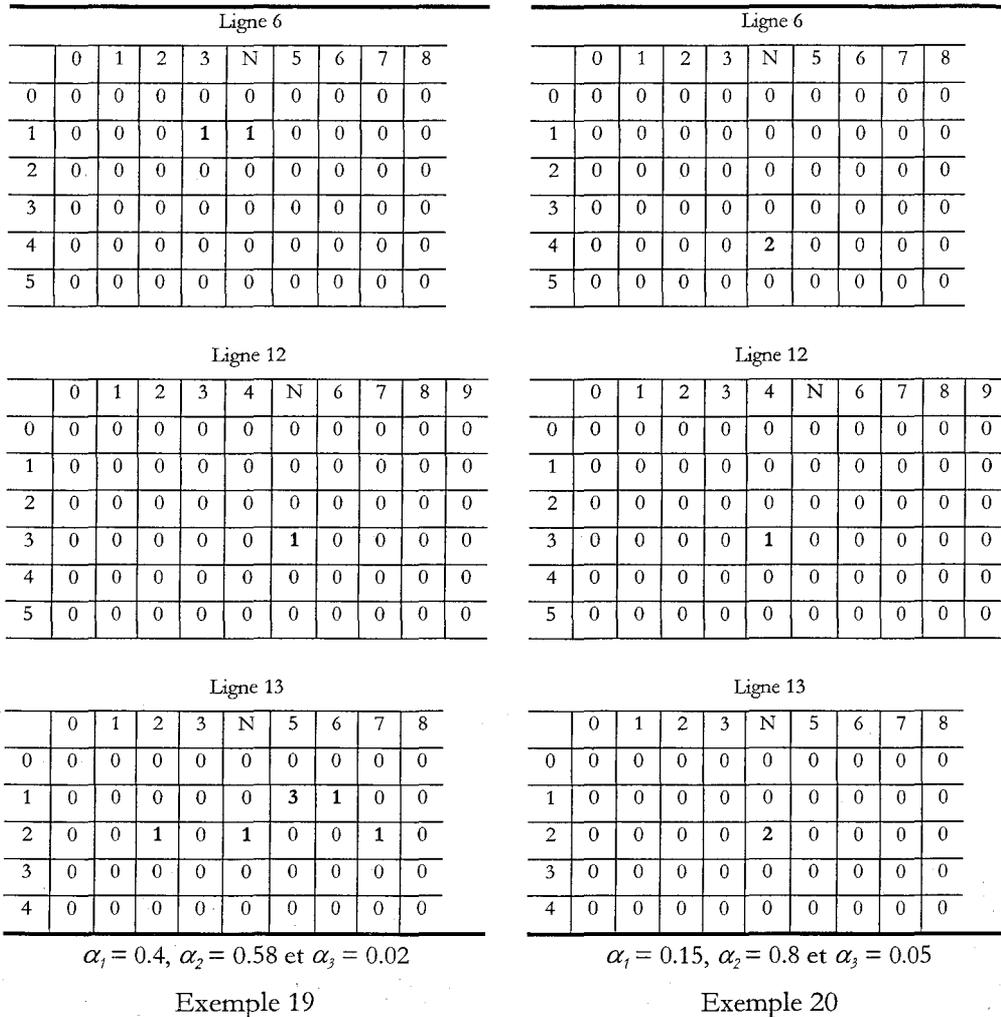


Figure V.22: Exemples de régulation multicritère pour le scénario 4.

V.2.6. Scénario 5

V.2.6.1. Description de l'incident

Nous prenons le cas de deux lignes de bus, 5 et 7, qui se croisent en un nœud de correspondance. Elles ont des fréquences de 1bus/20 minutes et de 1bus/10 minutes respectivement. Considérons une perturbation associée à un agent ZONEPERT qui réunit 12 véhicules dont 5 de la ligne 5 et 7 de ligne 7 ; et 16 stations dont le nœud, 7 stations de la ligne 5 et 8 de la ligne 7.

Pour simplifier, nous numérotions les véhicules de ligne 5 de 0 à 4 et ceux de ligne 7 de 5 à 11. De même, les stations de la ligne 5 sont numérotées de 0 à 7, le nœud est la station 4 et nous illustrons les stations de la ligne 7 par des numéros de 8 à 15 (figure V.23).

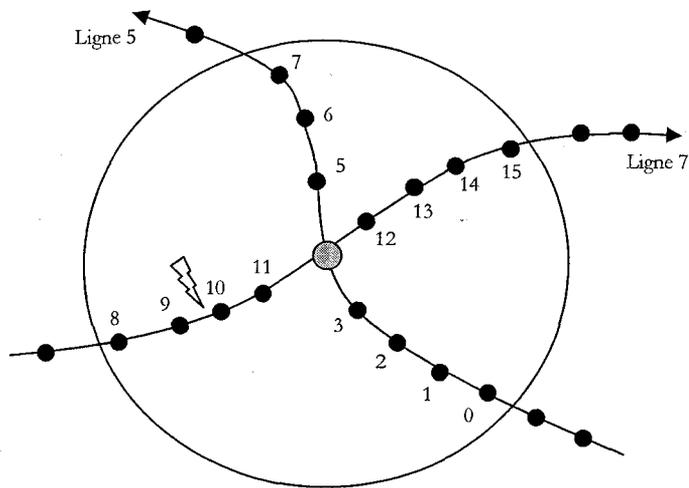


Figure V.23: Représentation des itinéraires théoriques des véhicules des lignes 5 et 7.

En fait, l'incident traité affecte directement le véhicule 8 de la ligne 7. Il est causé par une manifestation imprévue qui se déroule entre la station 9 de la ligne 7 et le nœud, et qui ralentit la circulation. A sa sortie de la station 9 à 12 :54, le véhicule 8 rencontre la manifestation et son conducteur estime un retard de 7 minutes et le communique au régulateur. La correspondance vers le véhicule 2, qui part à 13 :15 du nœud, ne va finalement pas avoir lieu puisque le véhicule 8 n'arrive qu'à 13 :18. Ainsi, une régulation est nécessaire comme pour les autres scénarios.

Par contre, nous allons accorder une certaine flexibilité aux déplacements des véhicules afin que l'agent ZONEREG concerné puisse appliquer l'AERSR. Dans ce but, nous avons utilisé le codage CNH et construit l'ARI afin de retrouver des solutions qui peuvent éventuellement reconfigurer partiellement le réseau.

V.2.6.2. Simulation de l'ARI

Supposons que le véhicule 8 ait le graphe de déplacement illustré par la figure V.24. Nous remarquons alors que le nœud 5 a été ajouté à l'ensemble des nœuds formant son itinéraire théorique (8,9,10,11,4,13,14,15). La variable liée à la possibilité d'arrêt du véhicule 8 à la station 5 est alors égale à 0.5, et ce nœud est à passage flexible. Par rapport à la configuration initiale de la ligne, notons les arêtes (10,12), (10,4), (10,5), (11,13), (4,5), (5,12).

Supposons qu'un des chromosomes CIH ou CNH puisse inclure tous les nœuds de ce graphe. La question qui se pose est : quel est l'itinéraire entre 8 et 15 qui pourrait passer une fois par tous ces nœuds ?

Comme nous l'avons déjà signalé, la résolution de ce problème est réalisée à travers l'ARI que nous avons simulé afin de définir les itinéraires des véhicules. En effet, la figure V.25 présente le résultat de cette simulation en détaillant les différentes itérations pour suivre l'évolution du chemin hamiltonien à construire. L'itinéraire final est (8,9,10,11,4,5,12,13,14,15).

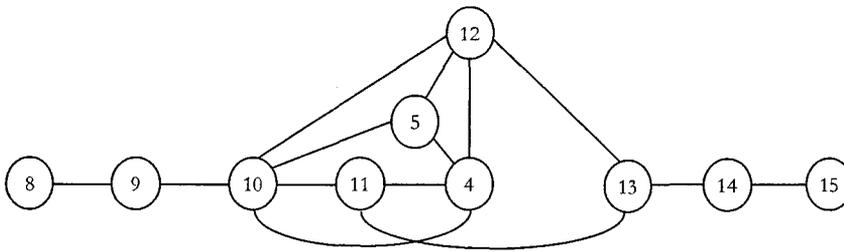


Figure V.24: Exemple de graphe de déplacement pour le véhicule 8.

```

L'ensemble des noeuds a traiter: 4 5 8 9 10 11 12 13 14 15
Le chemin courant est : 8
Extension
Le chemin courant est : 8 9
Extension
Le chemin courant est : 8 9 10
Extension
Le chemin courant est : 8 9 10 5
Extension
Le chemin courant est : 8 9 10 5 4
Extension
Le chemin courant est : 8 9 10 5 4 11
Extension
Le chemin courant est : 8 9 10 5 4 11 13
Extension
Le chemin courant est : 8 9 10 5 4 11 13 14
Echec Extension
Transformation
Echec Transformation, Eliminer extremité
Le chemin courant est : 8 9 10 5 4 11 13
Eliminer extrémité du chemin
Extension
Deja étendu avec le voisin 13, essayer voisin suivant
Echec Extension
Transformation
Le chemin courant est : 8 9 10 11 4 5
Extension
Le chemin courant est : 8 9 10 11 4 5 12
Extension
Le chemin courant est : 8 9 10 11 4 5 12 13
Extension
Le chemin courant est : 8 9 10 11 4 5 12 13 14
Extension
Le chemin resultatant est: 8 9 10 11 4 5 12 13 14 15
temps = 0.000000
Press any key to continue...
  
```

Figure V.25: Exemple d'application de l'algorithme de recherche d'itinéraire.

V.2.6.3. Résultats proposés par ZONEREG via l'AERAR

Nous proposons d'appliquer l'AERAR pour résorber la perturbation traitée avec un codage CNH. Nous prenons cependant un exemple simple pour la flexibilité du réseau afin de mieux saisir la pertinence de la solution proposée. En effet, la figure V.26 illustre un graphe de déplacement pour le véhicule 8, qui découle de l'itinéraire théorique en ajoutant une flexibilité de passage au niveau des stations 10 et 11 et une arête entre 9 et 4.

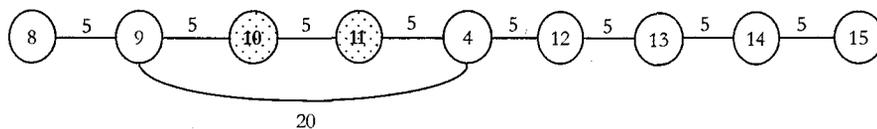


Figure V.26: Exemple de graphe de déplacement pour le scénario 5.

Il est évident, d'après ce graphe, que deux itinéraires sont possibles pour le véhicule 8 :

- l'itinéraire théorique, (8,9,10,11,4,12,13,14,15) ;
- l'itinéraire reconfiguré, (8,9,4,12,13,14,15).

Pour reprendre le vocabulaire utilisé par les régulateurs, le nouvel itinéraire correspond à une déviation du parcours initial avec un sautage de deux stations. Nous avons lancé alors des simulations pour l'AERAR. La figure suivante présente trois exemples de régulation monocritère. Nous avons commencé par le critère de ponctualité dont la valeur optimale est nulle dans le cas de l'AERSR. Nous trouvons alors une solution qui reconfigure le réseau avec le nouvel itinéraire pour le véhicule 8. En effet, dans l'exemple 21, nous avons un coût final de 76 et non de 0 grâce à la reconfiguration du parcours du véhicule 8 et à la diminution de son trajet entre 9 et 4 en évitant la zone où la manifestation a lieu. Nous remarquons que les modifications des temps d'arrêts sont nulles dans toutes les stations pour préserver au maximum la ponctualité des véhicules.

Pour l'exemple 22, nous avons un nombre plus important de décisions non nulles sur les temps d'arrêt. De même, le nouvel itinéraire a été affecté au véhicule 8. Le meilleur coût relatif au critère de régularité est égal à 354 passagers-minute, alors que dans le cas sans reconfiguration, nous obtenons un coût de 292. Les différentes décisions ont pour but d'ajuster les intervalles de passage, surtout que la ligne 5 contient quelques intervalles irréguliers.

L'exemple 19 concerne le critère de correspondance. Sans tenir compte de la ponctualité, les différentes décisions tendent à diminuer le plus possible les durées d'attente des passagers en transfert. Le parcours du véhicule 8 n'a pas été modifié, mais plusieurs décisions sur les temps d'arrêt sont proposées.

Pour le cas multicritère traité dans l'exemple 24 de la figure V.28, nous remarquons aussi que l'itinéraire du véhicule 8 n'a pas été altéré mais que les véhicules 2 et 3 ont été retardés avant le nœud afin d'améliorer les correspondances et la régularité. En effet, ces décisions peuvent aussi témoigner de l'irrégularité des intervalles dans les TMT.

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|----|-------|--------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) |
| 1 | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) |
| 2 | (1,0) | (1,0) | (1,3) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) |
| 3 | (1,0) | (1,3) | (1,3) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) |
| 4 | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) |
| 5 | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (1,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) |
| 6 | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (1,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) |
| 7 | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (1,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) |
| 8 | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (1,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) |
| 9 | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (1,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) |
| 10 | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (1,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) |
| 11 | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (1,0) | (0,0) | (0,0) | (0,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) | (1,0) |

$$\alpha_1 = 0.1, \alpha_2 = 85 \text{ et } \alpha_3 = 0.05$$

Exemple 24

Figure V.28: Exemple de régulation multicritère pour le scénario 5.

V.2.7. Remarques récapitulatives

Pour résumer, le tableau suivant présente les différents résultats que nous avons proposés en notant : le scénario concerné, le ou les retards traités, la fréquence des lignes en véhicule/minute, le nombre des véhicules (V) et stations (S) de l'horizon, le numéro de l'exemple, la durée de traitement pour 5000 générations, les poids des critères et les valeurs qui leurs sont associées dans chaque solution.

D'abord, en ce qui concerne le temps de traitement, le tableau V.2 montre que pour les scénarios 0, 1, 2, 3 et 4, cette durée augmente en fonction du nombre de stations et de véhicules concernés. Nous pouvons tout de même proposer, pour des cas semblables aux scénarios 0, 1, 2 et 3, que l'agent ZONEREG puisse lancer son AERSR autant de fois que possible selon la limite de traitement tolérée. Il pourra ainsi fournir plusieurs solutions à l'agent INCIDENT.

Pour le scénario 5, la durée de traitement est élevée par rapport au nombre de stations et véhicules traités. Ce phénomène est du à :

- Un temps de calcul de la fonction coût plus important à cause de la détermination des différents nombres de montées et descentes en fonction des flux. En effet, pour l'AERSR, le calcul des charges est réalisé avec l'ajustage des charges théoriques des véhicules en fonction des décisions alors que dans le cas de l'AERAR, le modèle de ces charges n'est pas utilisé, ce qui augmente le nombre de données à traiter.
- Une perte supplémentaire de temps dans l'exécution après chaque croisement et mutation de l'algorithme ARI. Même si les itinéraires possibles sont connus dès le début, nous avons justement préféré exécuter l'ARI afin de détecter son impact sur la rapidité d'exécution. Cet impact appuie ainsi la proposition qu'on a faite dans la fin du chapitre III et qui concerne l'exécution de l'ARI en temps anticipé pour tous les ensembles d'arrêts afin de construire une base d'itinéraires possibles.

Tableau V.2: Tableau récapitulatif des résultats.

| Scénario | Retard | Fréquence | V | S | Exemple | α_1 | α_2 | α_3 | Temps | Cr ₁ | Cr ₂ | Cr ₃ |
|----------|--------|-----------|----|----|---------|------------|------------|------------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0 | 5 | 1/10 | 7 | 8 | 1 | 0 | 0 | 1 | 18s | 0 | 0 | 0 |
| | | | | | 2 | 1 | 0 | 0 | | 136 | 0 | -2040 |
| | | | | | 3 | 0.9 | 0 | 0.1 | | 72 | 0 | -396 |
| | | | | | 4 | 0.98 | 0 | 0.02 | | 134 | 0 | -1512 |
| 1 | 7 | 1/10 | 14 | 13 | 5 | 1 | 0 | 0 | 29s | 278 | 29 | -2204 |
| | | 1/10 | | | 6 | 0 | 1 | 0 | | -1506 | 136 | -9772 |
| | | 7 | | | 0.25 | 0.74 | 0.01 | 222 | | 74 | -2826 | |
| 2 | 12 | 1/20 | 14 | 13 | 8 | 1 | 0 | 0 | 29s | 357 | 66 | -3891 |
| | | 1/20 | | | 9 | 0 | 1 | 0 | | -849 | 183 | -8743 |
| | | 10 | | | 0.8 | 0 | 0.2 | 124 | | 12 | -382 | |
| | | 11 | | | 0 | 0.95 | 0.05 | -45 | | 139 | -601 | |
| | | 12 | | | 0.25 | 0.71 | 0.04 | 171 | | 137 | -1465 | |
| 3 | 7 | 1/10 | 13 | 17 | 13 | 1 | 0 | 0 | 32s | 308 | -19 | -3102 |
| | | 1/20 | | | 14 | 0 | 1 | 0 | | 117 | 162 | -7165 |
| | | 15 | | | 0.4 | 0.58 | 0.02 | 112 | | 0 | -1047 | |
| | | 16 | | | 0.14 | 0.85 | 0.01 | 142 | | 161 | -7432 | |
| 4 | 8 et 4 | 1/10 | 17 | 26 | 17 | 1 | 0 | 0 | 200s | 195 | -50 | -2425 |
| | | 1/10 | | | 18 | 0 | 1 | 0 | | -345 | 343 | -4262 |
| | | 1/15 | | | 19 | 0.4 | 0.58 | 0.02 | | 177 | 225 | -1743 |
| | | 20 | | | 0.15 | 0.8 | 0.05 | -52 | | 259 | -950 | |
| 5 | 7 | 1/10 | 12 | 16 | 21 | 0 | 0 | 1 | 190s | 114 | 20 | 76 |
| | | 1/20 | | | 22 | 1 | 0 | 0 | | 354 | 29 | -8528 |
| | | 23 | | | 0 | 1 | 0 | 21 | | 193 | -6061 | |
| | | 24 | | | 0.1 | 0.85 | 0.05 | -5 | | 138 | -647 | |

Notons aussi que pour chaque scénario, les solutions trouvées avec les différents critères sont non dominées. En effet, ces solutions sont issues d'un algorithme qui a convergé selon les poids qui ont été attribués aux trois critères. Toutefois, nous pouvons effectuer d'autres simulations qui

utilisent d'autres techniques d'optimisation multicritère sans l'agrégation des différents critères (Paréto, etc.).

Les valeurs négatives des critères montrent que ces derniers sont meilleurs dans le cas perturbé que dans le cas régulé. Ce phénomène ne facilite pas la tâche de l'algorithme pour trouver un compromis entre les trois critères qui sont souvent contradictoires.

V.3. Fonctionnement global du SMAAD

V.3.1. Présentation de l'application

Rappelons que l'agent ZONEREG qui fournit les décisions de régulation, dont nous avons présenté des exemples, est inclus dans le SAD décrit dans ces travaux. Le SMAAD considéré est en cours de développement avec l'aide d'un stagiaire à l'université de Lille 1, Pierre Denaison [Denaison, 03]. Il s'agit d'une application java qui inclut, en plus des agents du SMAAD, d'autres agents que nous avons jugé nécessaire de considérer. En effet, la validation de notre système n'étant pas réalisée sur un site réel, il a fallu simuler le comportement du réseau pour que le SMAAD reste dynamique. Dans ce but, nous utilisons une horloge virtuelle basée sur le principe de synchronisation. A chaque unité de temps, l'horloge ne peut être incrémentée par les agents que s'ils ont tous pu terminer d'exécuter leurs tâches associées à l'heure courante. Cette condition est symbolisée par une ressource commune appelée Verrou. Selon le langage Java, cette application s'appuie sur le « multi-thread » afin de conserver le parallélisme de l'exécution des tâches puisque les agents sont autonomes.

Nous avons d'abord implémenté notre application sur une structure monoposte, ce qui limite les ressources et réduit la rapidité d'exécution. Par conséquent, nous avons opté pour une architecture répartie afin d'assurer une réelle distributivité et une exécution asynchrone des agents. La plateforme multi-agent devient alors un ensemble de sous-systèmes spécialisés qui communiquent via Intranet. Nous retrouvons un système lié au données statiques et dynamiques sur une base de données (Oracle), un système qui gère la communication et les flux de données (serveur) entre les autres unités, un système qui simule le fonctionnement du SAE (agent ARRET et VEHICULE) et un dernier pour le module de régulation du SMAAD (INCIDENT, ZONEPERT et ZONEREG).

Les bases de connaissances des agents VEHICULE et ARRET sont initialisées par un agent appelé agent FICHER à travers la base de données statiques. Cet agent charge par exemple, dans chaque véhicule, les horaires de passage, les références des arrêts de l'itinéraire et les distances inter-stations et dans chaque arrêt les références des véhicules qui s'y arrêtent et leurs horaires de passage. Comme présenté par la figure V.29, l'agent FICHER lance l'application et le premier

véhicule qui doit entrer dans la zone d'étude doit commencer à exécuter ses tâches décrites dans III.4.2.1.

Pour la communication entre les agents, nous avons conçu un agent COMMUNICATION qui gère les différents messages entre les agents (voir Annexes 2). Cet agent sert en fait d'intermédiaire entre les modules de communication des différents agents du SMAAD. Ces derniers possèdent aussi une base de stratégie qui contient les différentes actions qu'ils doivent réaliser.

Nous avons effectué des simulations du SMAAD pour le scénario 0 représentant une perturbation qui ne concerne qu'une seule ligne (cf. V.2.1). Des simulations ont été aussi réalisées pour le scénario 1. Pour une première application, le système ne gère qu'un nombre réduit d'agents VEHICULE et ARRET. La version présente du SMAAD référence ces agents par des lettres majuscules pour les véhicules (I, J, K, L, M, N) et minuscules pour les arrêts (a, b, c, d, e, f, g).

The screenshot shows the JBuilder 7 IDE with the following components:

- Project Explorer:** Shows the project structure for SMA1_2, including source files like CAgent_Arrêt.java, CAgent_Vehicule.java, and CAgent_Communication.java.
- Source Editor:** Displays the code for Application.java, which includes package declarations, imports, and the main method.
- Console Window:** Shows the output of the application, including process initialization messages for various agents and their buffers.

```

package sma1_2;
import java.io.*;

public class Application {
    private static By_ex;

    public Application() throws IOException {
        this.By_ex=new By_ex();
    }

    public static void main(String[] args) throws IOException {
        Application application = new Application();
    }
}

```

```

AGENT.1 PROCESSUS INITIALISATION :DATA_FILE SEND TO AGENT indice:J
AGENT.1 PROCESSUS INITIALISATION :DATA_FILE SEND TO AGENT indice:K
AGENT.1 PROCESSUS INITIALISATION :DATA_FILE SEND TO AGENT indice:H
AGENT.1 PROCESSUS INITIALISATION :DATA_FILE SEND TO AGENT indice:M
AGENT.1 PROCESSUS INITIALISATION :DATA_FILE SEND TO AGENT indice:N
AGENT.1 PROCESSUS INITIALISATION :DATA_FILE SEND TO AGENT indice:I
Copie d'informations vers: premier_buffer.agent.d
Copie d'informations vers: second_buffer.agent.i
Copie d'informations vers: premier_buffer.agent.j
Copie d'informations vers: premier_buffer.agent.k
Copie d'informations vers: premier_buffer.agent.l
Copie d'informations vers: second_buffer.agent.m
Copie d'informations vers: premier_buffer.agent.n
Copie d'informations vers: second_buffer.agent.o
Copie d'informations vers: premier_buffer.agent.p
Copie d'informations vers: second_buffer.agent.q
Agent.vehicule.i time:0 vehicule hors horizon
Agent.vehicule.l time:0 vehicule hors horizon
Agent.vehicule.k time:0 vehicule hors horizon

```

Figure V.29: Processus d'initialisation du système.

V.3.2. Module de surveillance

Le module de surveillance composé des agents VEHICULE et ARRET opère en conditions normales d'exploitation. Nous avons affiché les principales actions exécutées par ces agents dans le fichier de sortie de l'application (figure V.30).

Nous notons que l'agent VEHICULE n'est actif que quand il entre dans la zone étudiée, autrement dit, dans l'horizon. Dans le cas contraire, nous affichons son état comme « véhicule hors horizon ». Pour les autres, ils ont à réaliser les tâches de déplacement et d'arrêt aux stations. Lors du déplacement entre les stations, la distance inter-stations ainsi que le retard sont indiqués. Nous marquons aussi le passage des véhicules par les stations par « déclaration arrivée ». Les informations décrivant une estimation de l'horaire de passage d'un véhicule au prochain arrêt sont ensuite transmises à l'agent ARRET correspondant.

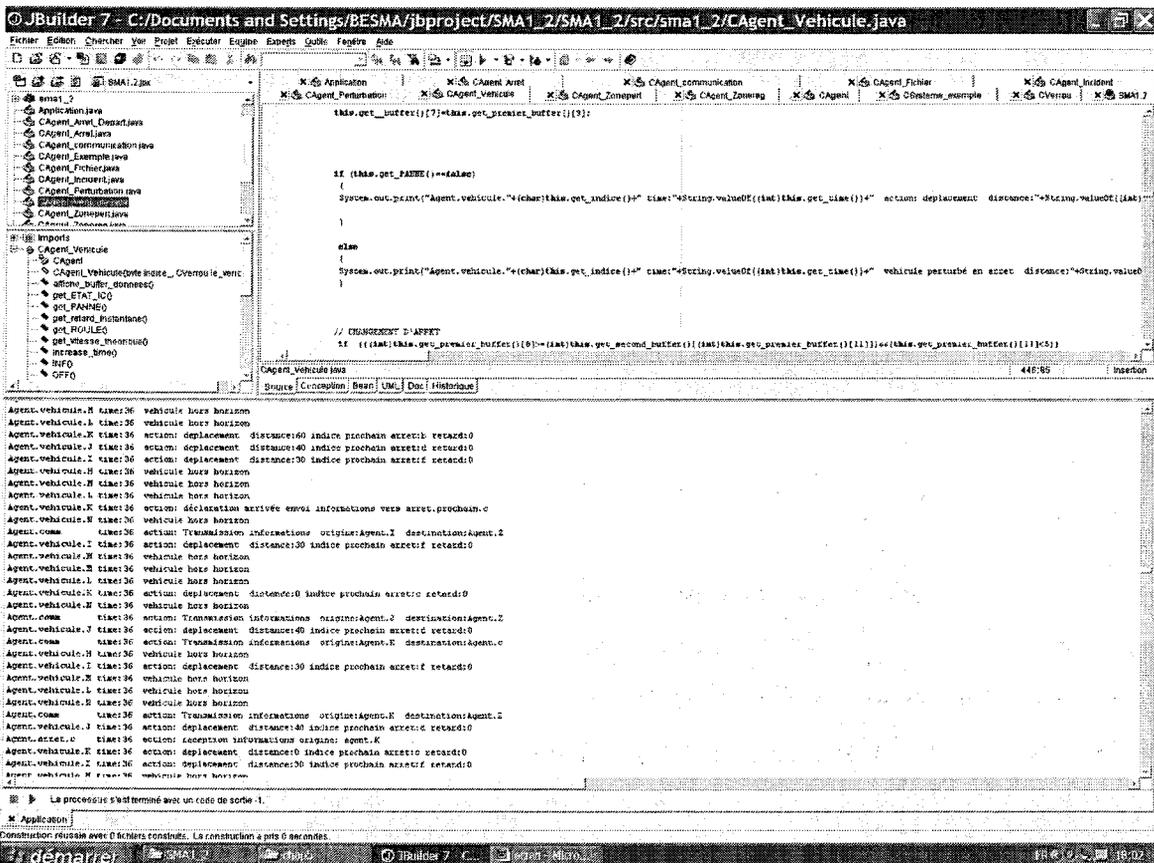


Figure V.30: Comportement du module de surveillance.

L'horloge exprimée en minutes et illustrée par « time » représente l'heure courante. Par exemple, l'heure de détection de la perturbation, 12 :01, correspond à 42. La figure précédente décrit alors l'état des agents 3 minutes avant la détection de l'incident.

V.3.3. Module de régulation

Afin de simuler l'apparition d'un évènement affectant le réseau, nous avons créé un agent PERTURBATION qui agit sur la vitesse d'un véhicule pour provoquer un retard. Nous avons ainsi recréé le scénario correspondant à l'exemple du chapitre IV en mettant à zéro la vitesse du véhicule K pendant 5 minutes. Rappelons que selon le scénario traité, K a un retard estimé de 5 minutes, nous affichons en sortie le retard courant qui s'incrémente alors de 1 à chaque incrémentation de l'horloge, à partir de 0 jusqu'à 5.

Une fois la perturbation détectée par l'agent ARRET, ce dernier crée un agent INCIDENT qui active de lui-même un agent ZONEPERT (figures V.31). La figure V.32 illustre la construction de l'horizon spatio-temporel et le calcul des TMP.

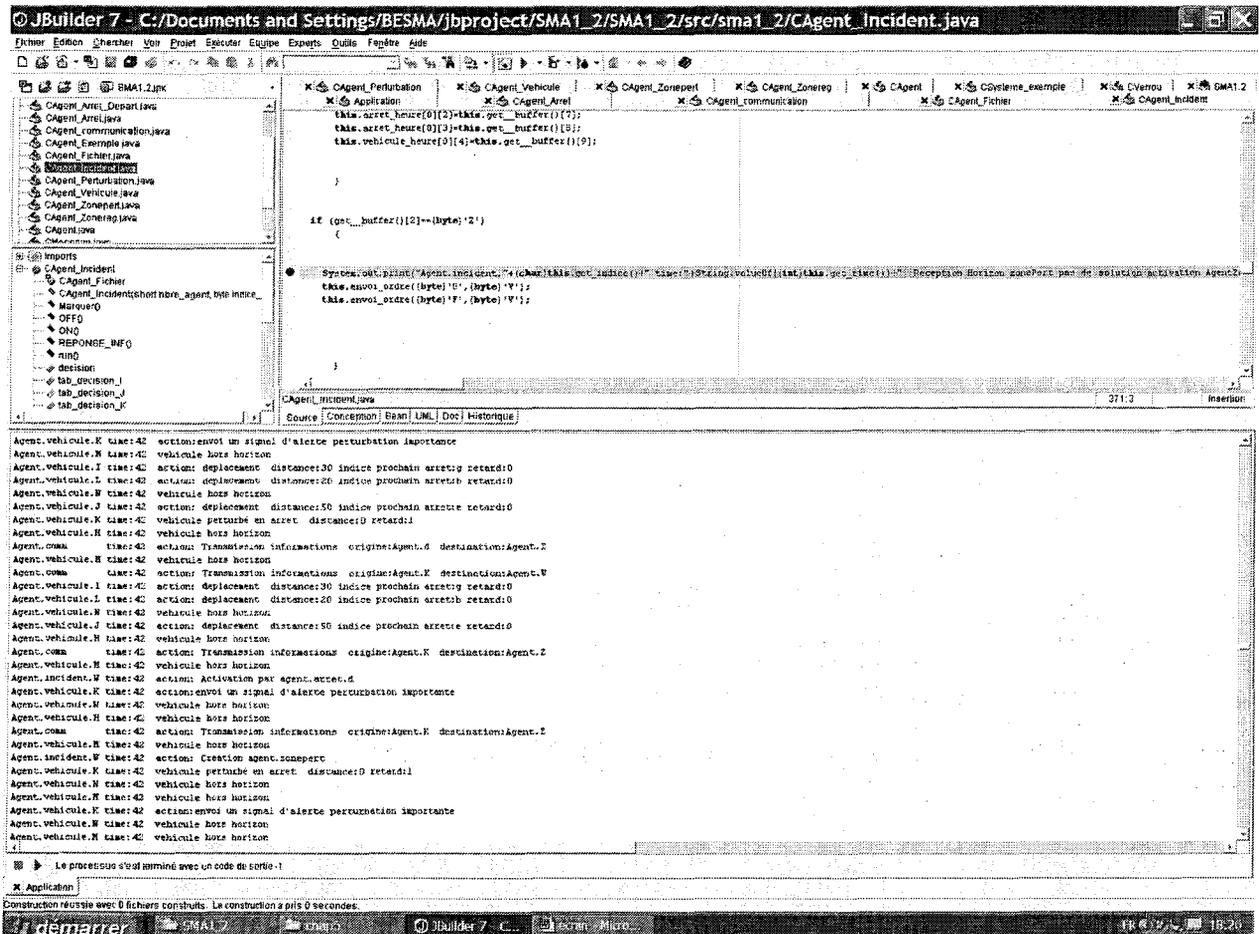


Figure V.31: Création d'un agent INCIDENT.

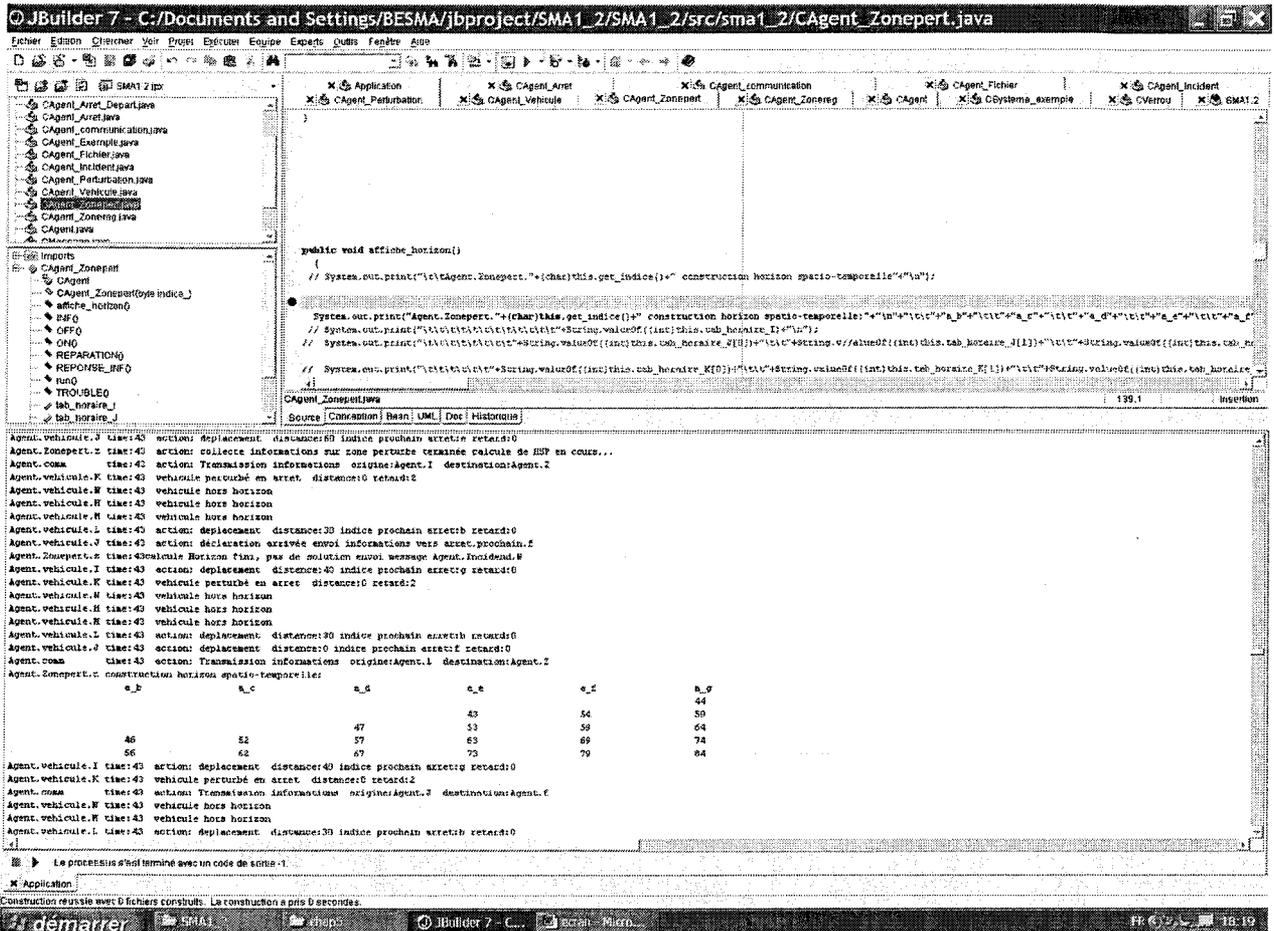


Figure V.32: Construction de l'horizon spatio-temporel par ZONEPERT.

L'agent ZONEPERT peut afficher le TMP associé à la zone traitée du réseau. Cet agent n'ayant pas de solutions primaires à proposer, l'agent INCIDENT active ZONEREG. Ce dernier reçoit alors toutes les informations sur les horaires et lance son algorithme évolutionniste. Les résultats affichés sont issus des applications de l'AERSR pour l'exemple 4.

En ce qui concerne la durée d'exécution des tâches des agents INCIDENT et ZONEPERT, elle est de l'ordre de quelques dizaines de secondes, ce qui est bien adapté à une application temps réel. Par exemple, pour un incident qui implique deux lignes, le temps de traitement ne dépasserait pas une minute, sachant que les décisions sont à appliquer généralement quelques minutes après l'instant de détection. La rapidité du traitement de l'incident dépend en fait de la durée d'exécution de l'algorithme évolutionniste, qui est en outre interruptible.



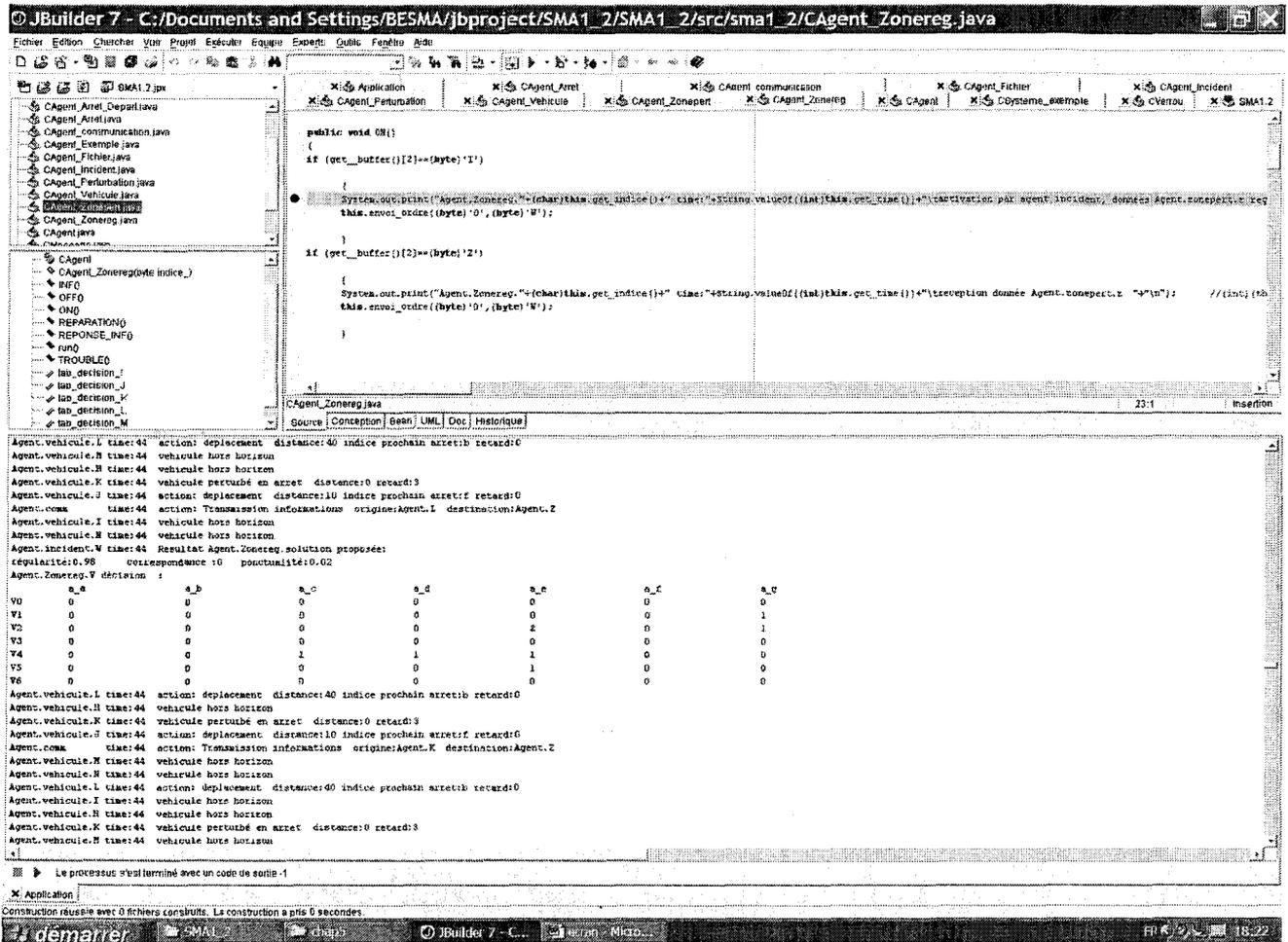


Figure V.33: Affichage des solutions de ZONEREG.

V.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence de façon concrète l'apport du SMAAD et surtout de l'approche évolutionniste de la régulation, réalisée par les agents ZONEREG, à la gestion des incidents qui surgissent de manière aléatoire dans le trafic d'un réseau multimodal. En effet, nous fournissons au régulateur des propositions de décisions qui relèvent de la nature de la perturbation et des objectifs de la régulation. Aussi, l'agent ZONEREG peut garantir non seulement une solution proche de l'optimum, mais aussi un ensemble de solutions établies selon l'importance relative des différents critères considérés. Les décisions sont immédiatement applicables et surtout faciles à comprendre par le régulateur.

Nous avons montré, à travers les résultats exposés, que les solutions proposées améliorent la qualité de service offerte aux clients. Cette amélioration est évaluée par les critères qui illustrent

une comparaison entre la situation perturbée et la situation régulée et aussi par les coefficients d'irrégularité. Toutefois, d'autres indicateurs peuvent être utilisés pour évaluer les solutions finales.

Nous avons aussi présenté une ébauche d'une application Java, en cours de développement, pour simuler le comportement du SMAAD que nous avons détaillé dans le chapitre III. Nous avons alors montré les tâches exécutées par les différents agents dans l'organisation statique (état normal) et dynamique (en cas de perturbation) du système.

Conclusion Générale

Dans ce travail de recherche, nous avons traité le problème de la gestion en temps réel des réseaux de transport multimodal. Ce problème préoccupe de plus en plus les compagnies de transport car il a un impact direct sur la qualité du service offert aux usagers. En effet, en cas de perturbation, ces derniers sont contraints à une attente plus importante au niveau des stations ou à un trajet plus long à bord des véhicules du réseau.

Nous avons d'abord réalisé une intéressante étude bibliographique des aspects de gestion des réseaux de transport multimodal en général et de la régulation en particulier. Cette étude a conduit à la nécessité d'un outil d'aide à la décision qui propose des mesures de régulation associées à chaque incident. La problématique de la régulation constitue non seulement le réordonnancement des courses des véhicules mais aussi, en amont, la surveillance du réseau et le diagnostic des incidents. Or, nous avons noté que les outils existants ne considèrent pas la totalité des tâches du processus de régulation (détection, diagnostic et résolution) et ne traitent pas simultanément les différents critères (régularité, ponctualité et correspondance). Aussi, en s'appuyant sur l'état de l'art présenté sur les modèles de réseaux urbains, nous pouvons déduire que les techniques de modélisation appliquées aux réseaux multimodaux ne couvrent pas la totalité de leurs caractéristiques. Dans ce but, nous avons présenté un SAD original qui repose sur :

- une modélisation hybride basée sur les graphes pour la représentation des itinéraires et sur les agents pour la représentation spatiale et temporelle du réseau (module de surveillance du SMAAD) ;
- une approche Agent pour le diagnostic et la régulation en cas de situations familières et une approche évolutionniste pour la régulation temporelle (AERSR) ou spatio-temporelle (AERAR), en cas de situations non familières.

Le SMAAD proposé résulte d'une décomposition modulaire du processus de régulation. Il possède un haut niveau de coopération dans la collecte et l'analyse des informations pour la

construction de l'horizon spatio-temporel et des solutions de régulation. Toutefois, il peut opérer en temps anticipé afin d'enrichir la base de règles des agents ZONEPERT pour la régulation primaire, et en même temps la base des situations familières représentant les lois sociales de ces agents. L'algorithme évolutionniste exécuté par l'agent ZONEREG sert alors de module d'apprentissage pour les stratégies de décision.

L'algorithme évolutionniste de la régulation que nous avons présenté dans le chapitre IV fournit des décisions simples à interpréter et applicables dans l'immédiat. L'AERSR n'agit que sur les horaires des véhicules, alors que l'AERAR peut reconfigurer les itinéraires initiaux des véhicules. En effet, cette régulation spatio-temporelle englobe la plupart des décisions de régulation qui concernent la modification des horaires et itinéraires des véhicules. Elle s'appuie sur un algorithme de recherche d'itinéraires ou de chemins hamiltoniens basé sur une technique de « backtracking » et de transformation rotationnelle.

Nous avons conçu une application en Java du SMAAD a fin de prouver son efficacité dans la surveillance et le diagnostic des perturbations. Pour l'agent ZONEREG, nous avons testé l'approche évolutionniste de la régulation avec plusieurs scénarios de perturbation, issus du réseau de transport de Lille, Transpole, en vue de montrer l'impact des décisions proposées sur la qualité de service offert aux usagers. De plus, la durée totale de simulation est tout à fait admissible pour une application en temps réel, surtout si l'ARI est exécuté en temps anticipé pour améliorer la rapidité de la résolution.

Le travail présent a beaucoup contribué à l'avancement du projet MOST à travers les différentes réunions et présentations. Ce projet étant presque en phase terminale, nous avons intégré, via l'approche de reconfiguration, un autre grand projet ANR N°6 (Action Nouvelle de Recherche) lié à la gestion et l'optimisation des réseaux de transport. Cette intégration ne peut que prouver l'originalité de cette approche de reconfiguration qui contribue en effet à une nouvelle vision de la problématique de la régulation. Le projet ANR N°6 concerne la conception de l'architecture des réseaux et notamment de celle des pôles d'échange. Avec le dimensionnement et la localisation de ces pôles, il est fondamental de trouver des outils et méthodes efficaces d'optimisation afin d'harmoniser l'utilisation (affectation, plans, etc.) des différents moyens de transport en passant s'il le faut par la reconfiguration des réseaux.

Différentes perspectives peuvent alors surgir dans ce sens. En effet, pour la reconfiguration, nous pouvons étendre la formulation du problème en vue de la modification en temps réel des pôles d'échange en cas de perturbation. Aussi, la recherche de nouveaux itinéraires à travers l'ARI peut se baser sur des systèmes d'information géographique afin de cerner les différentes possibilités effectives de déplacement pour chaque véhicule.

D'autre part, dans le cadre de l'approche évolutionniste de régulation, nous pouvons intégrer une recherche multicritère basée sur la méthode Paréto afin de saisir les dominances des solutions par rapport aux trois critères considérés. Des études peuvent aussi être établies pour la détermination de bornes éventuelles et la mise à échelle de ces critères.

En ce qui concerne les données dynamiques sur les flux de passagers, une autre perspective peut considérer des modèles d'estimation statistiques ou basés sur la théorie de la logique floue qui tient compte des incertitudes liées à ces données.

Finalement, nous espérons valider notre système avec des données dynamiques d'un réseau réel de transport tout en considérant la nécessité de la négociation entre plusieurs décideurs ou opérateurs à cause de la multimodalité et de la taille du réseau. Dans ce but, il est nécessaire de construire la base de règles de l'agent ZONEPERT avec les régulateurs via des stratégies d'apprentissage par l'AERSR et l'AERAR. Ce module pourrait ainsi intégrer l'expertise et le savoir-faire des régulateurs.

Bibliographie Générale

- [Abbas-Turki & al, 02] A.Abbas-Turki, O.Grunder, R.Bouykhek and A.Elmoudni, "Modular controlled stochastic Petri Nets for the connection monitoring", Proceedings of the World Automation Congress, Fourth International Symposium on Intelligent Automation and Control, ISIAC030, Florida, 2002.
- [Adamski, 98] A.Adamski and A.Turnau, "Simulation support tool for real-time dispatching control in public transport", Transportation Research A, Volume 32, No.2, pp.73-87, 1998.
- [Afanassieva & al, 96] L.G.Afanassieva, G.Fayolle et S.Yu.Popov, "Models for Transportation Networks", Projet MEVAL, Rapport de recherche INRIA no.2834, mars 1996.
- [Aknine & al, 98] S.Aknine, S.Pinson, M.Zacklad, "Un système d'agents récursifs pour l'aide au travail coopératif", Actes de la 6^{ème} journée Francophones d'IA et SMA, pp.67-80, 1998.
- [Alla & al, 89] H.Alla, R.David, "Du Grafset aux réseaux de Petri", Editions Hermès, octobre 1989.
- [Aloulou, 99] M.A.Aloulou, "Application des algorithmes génétiques à la régulation du trafic des bus", Rapport de DEA en Informatique Industrielle à l'université des sciences et technologies de Lille, juin 1999.
- [Aloulou, 02] M.A.Aloulou, "Structure flexible d'ordonnements à performances contrôlées pour le pilotage d'atelier en présence de perturbations", thèse en Informatique à l'Institut Nationale Polytechnique de Lorraine, Soutenue le 16 décembre 2002.
- [Bailly, 96] E.Bailly, "Etude de la régulation des lignes de métro automatisées : approche par la logique floue", Thèse de doctorat en Automatique et Informatique Industrielle à l'université des sciences et technologies de Lille, No d'ordre 1783, 11 juillet 1996.
- [Balbo, 00] F.Balbo, "ESAC: un module d'interaction Multi-Agent utilisant l'environnement comme support actif de communication, Application à la gestion des Transports Urbains", Thèse en Informatique, soutenu à Paris IX Dauphine en janvier 2000.
- [Barla & al, 00] P.Barla, C.Constantatos, "Airline network structure under demand uncertainty", Journal of Transportation Research, Part E 36, pp. 173-180, 2000.

- [Bensaid, 99] N.Bensaid, "Contribution à la réalisation d'un modèle d'architecture multi-agent hiérarchique", Thèse en Informatique à l'université des sciences et technologies de Lille, 11 mai 1999.
- [Borne & al, 02] P.Borne, B.Fayech, S.Hammadi and S.Maouche, "Decision Support System for Urban transportation networks", IEEE SMC Part C: Applications and Reviews, Special Issue on Decision Technologies in honour of Prof Madan Singh, Vol.33, No.1, pp.67-77, February 2003.
- [Bouchon, 95] B.Bouchon-Meunier, "La logique floue et ses applications", Addison-Wesley, octobre 1995.
- [Bounsaythip, 98] C.K.Bounsaythip, "Algorithmes heuristiques et évolutionnistes : application à la résolution du problème de placement de formes irrégulières", Thèse de doctorat en Productique, université des sciences et technologies de Lille, 9 octobre 1998.
- [Carlier & al, 88] J.Carlier et P.Chrétienne, "Problèmes d'ordonnancement : Modélisation, complexité et algorithmes", Etudes et Recherches en Informatique, Editions Masson, Paris, 1988.
- [Carlsson & al, 02] C.Carlsson and E.Turban, "DSS: directions for the next decade", Journal of Decision Support Systems, Volume 33, Issue 2, pp. 105-110, June 2002.
- [Caruso, 97] M.Caruso, "Observation du poste de travail d'un régulateur dans un P.C. d'autobus, le réseau de la STIB à Bruxelles", Rapport interne Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, INRETS, octobre 1997.
- [Castelain & al, 02] E.Castelain and K.Mesghouni, "Regulation of a public transport Network with consideration of the passenger flow: modelling of the system with high-level Petri Nets", Proceedings of the IEEE SMC Conference, WA2C3, Hammamet, Tunisia, 6-9 October 2002.
- [Casteran & al, 00] J.C.Casteran, M.P.Gleizes, P.Glize, "Des méthodologies orientées multi-agent", Actes des journées Francophones d'IA Distribuée et SMA, pp.191-207, Saint-Jean-La-Vêtre, Loire, France, 2-4 octobre 2000.
- [Caux & al, 94] C.Caux, H.Pierreval, M.C.Portmann, "Les algorithmes génétiques et leurs applications aux problèmes d'ordonnancement", Actes des journées d'étude : Ordonnancement et entreprise, applications concrètes et outils pour le futur, 16 et 17 juin 1994, Toulouse, France.

- [Chaib-draa, 95] B.Chaib-draa, "Industrial Applications of Distributed AP", Communications of the ACM, Vol.38, No.11, pp. 49-53, November 1995.
- [Chaib-draa, 96] B.Chaib-draa, "Interaction between Agents in Routine, Familiar and Unfamiliar Situations", International Journal of Intelligent & Cooperative Information Systems, vol. 5(1), pp. 1-25, 1996.
- [Chakroborty & al, 95] P.Chakroborty, K.Deb and P.S.Subrahmanyam, "Optimal scheduling of urban transit systems using genetic algorithms", Journal of transportation engineering, novembre-décembre 1995.
- [Chihaib, 02] F.Chihaib-Bouzbouz, "Approche floue pour la régulation multimodale dans les réseaux de transport urbain en mode perturbé", Thèse de doctorat en Automatique et informatique industrielle, Université des sciences et technologies de Lille, No d'ordre 3231, 18 décembre 2002.
- [Ciesielski & al, 98] V.Ciesielski and P.Scerri, "Real time genetic scheduling of aircraft landing times", IEEE International Conference on Evolutionary Computation, ICEC98, in D.Fogel (Editor), pp.360-364, Anchorage, May 1998.
- [Cure & al, 84] C.Cure et B.Foraste, "Systèmes d'aide à l'exploitation et algorithmes de régulation", Revue Recherche Transport Sécurité, pp.14-22, juillet 1984.
- [Danflous, 01] D.Danflous, "Déploiement national des systèmes d'information multimodale", GOFAS : l'exemple suisse", Rapport d'étude, CERTU/CETE Méditerranée (Centre des études techniques et de l'équipement), Octobre 2001.
- [Davis, 91] L.Davis, "The genetic algorithm Handbook", Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
- [Deb & al, 98] K.Deb and P.Chakroborty, "Time scheduling of transit systems with transfer considerations using genetic algorithms", Evolutionary Computation 6(1), pp.1-24, 1998.
- [Deb, 99] K.Deb, "Multi-objective Genetic Algorithms: Problem Difficulties and Construction of Test Problems", Evolutionary Computation, Vol.7, No.3, pp.205-230, 1999.
- [Delahaye & al, 96] D.Delahaye, N.Durand, J.M.Alliot and M.Schoenauer, "Genetic algorithms for air traffic control systems", ENAC, INFAUTOM'96, Toulouse, France, 14-15 mars 1996.
- [Demmou & al, 98] H.Demmou, L.Hermite, A.Sahraoui and P.Oliverio, "A Neural Network Methodology for Traffic Congestion and On-line Traffic Control", April 1998.

- [Denaison, 03] P.M.Denaison, "Description de la plateforme Multi-Agent du SMAAD", Rapport interne, laboratoire I3D, Université de Lille 1, Octobre 2003.
- [Desrochers & al, 99] M.Desrochers, C.V.Jones, J.K.Lenstra, M.W.P.Savelsbergh and L.Stougie, "Towards a model and algorithm management for vehicle routing and scheduling problems", *Decision Support Systems* 25, pp. 109-133, 1999.
- [Durfee & al, 91] E. H. Durfee and V. R. Lesser, "Partial global planning: A coordination framework for distributed hypothesis formation", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 21(5), pp.1167-1183, September-October 1991.
- [Duvallet & al, 00] C.Duvallet, B.Sadeg and A.Cardon, "An Anytime Multi-Agent System to manage Electronic Commerce Transactions", In *Proceedings of OOIS'2000*, pp.121-128, Springer, Londres, Grande-Bretagne, Décembre 2000.
- [Fayech, 00] B.Fayech, "Application des algorithmes évolutionnistes aux problèmes de régulation du trafic des autobus", Rapport de DEA en Automatique et Informatique Industrielle à l'Université des Sciences et Technologies de Lille 1, Soutenu le 27 juin 2000.
- [Fayech & al, 01] B.Fayech, S.Hammadi, S.Maouche and P.Borne, "Urban Bus Traffic Regulation by Evolutionary Algorithms", *Proceedings of the 2001 IEEE Systems, Man and Cybernetics Conference, USA, D03-1*, pp.1316-1322, Tucson, Arizona, 6-10 October 2001.
- [Fayech & al, 02a] B.Fayech, S.Hammadi, S.Maouche and P.Borne, "An Evolutionary Rescheduling Approach for an Urban Transport Network with Simultaneous Disturbances", *JTEA 2002*, 21-23 Mars, Sousse, Tunisie, 2002.
- [Fayech & al, 02b] B.Fayech, S.Maouche, S.Hammadi and P.Borne, "Multi-Agent Decision-Support System for an Urban Transportation Network", *World Automation Congress, CDROM Proceedings ISIAC021*, 9-13 June, Florida, USA, 2002.
- [Fayech & al, 02c] B.Fayech, S.Hammadi, S.Maouche et P.Borne, "Approche Coopérative pour la Régulation d'un Réseau de Transport Multimodal", *Actes CIFA2002*, pp. 177-182, Nantes, France, 8-10 juillet 2002.
- [Fayech & al, 02d] B.Fayech, S.Hammadi and S.Maouche, "Partial Network Reconfiguration through a Dynamic Vehicle Scheduling Approach", *IEEE SMC, CDROM Proceedings TA2I3*, October 6-9, Tunisia, 2002.
- [Ferber, 95] J.Ferber, "Les Systèmes Multi-Agents : Vers une intelligence collective", *Informatique et Intelligence Artificielle*, InterEditions, Paris, 1995.

- [Ferber & al, 98] J.Ferber, O.Gutknecht, "A meta-model for the analysis and design of organizations in multi-agent systems", Proceedings of the third International Conference on MAS, ICMAS, pp.128-135, Paris, 1998.
- [Fischer & al, 95] K.Fischer, J.P.Müller, M.Pischel and D.Schier, "A Model for Cooperative Transportation Scheduling", In Proceedings of the First International Conference on MAS, AAAI Press/MIT Press, pp.109-116, Menlo Park, California, 1995.
- [Florez, 99] R.A.Florez-Mendez, "Towards a Standardization of Multi-Agent System Frameworks", ACM Crossroads Student Magazine, Canada, 1999.
- [Fogel, 94] L.J. Fogel, "Evolutionary programming in perspective: the top-down view", Computational Intelligence, Imitating Life, Zurada & al editors, IEEE Press, pp.135-146, June 1994.
- [Froloff & al, 89] E.Froloff, M.Rizzi et A.Saporito, "Bases et pratiques de la régulation", RATP, Direction du Réseau Routier RC/MSE, août 1989.
- [Fukuyama & al, 96] Y.Fukuyama and H.D.Chiang, "A parallel genetic algorithm for generation expansion planning", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.11, No.2, 1996.
- [Ghaffari, 99] A.Ghaffari, "Modélisation d'une ligne de métro en tenant compte du flux des passagers", Rapport de DEA en Informatique Industrielle à l'université des sciences et technologies de Lille, juin 1999.
- [Giampapa & al, 02] J.A. Giampapa and K. Sycara, "Team-Oriented Agent Coordination in the RETSINA Multi-Agent System", Tech. Report CMU-RI-TR-02-34, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, December, 2002.
- [Goldberg & al, 85] D.E.Goldberg, R.Lingel, "Alleles, loci and travelling salesman problem", Proceedings of first international conference on genetic algorithms, pp.154-159, 1985.
- [Goldberg, 89] D.E.Goldberg, "Genetic algorithms in search, optimisation and machine learning", Addison-Wesley, 1989.
- [Green & al, 97] S.Green, L.Hurst, B.Nangle, P.Cunningham, F.Somers, R.Evans, "Software agents: A review", TCS-CS-1997-06, Trinity College Dublin, Broadcom Eireann Research Ltd., 27 may 1997.
- [Grefenstette, 92] J.J.Grefenstette, "The Evolution of Strategies for Multi-Agent Environments", Adaptive Behaviour, 1(1), pp.65-89, 1992.
- [Gruer & al, 01] P.Gruer, V.Hilaire and A.Koukam, Multi-Agent Approach to Modelling and Simulation of Urban Transportation Systems, Proceedings of the 2001 IEEE SMC Conference, 6-10 October 2001, Tucson, Arizona, USA, pp.2499-2504.

- [Gutknecht & al, 00] O.Gutknecht, J.Ferber et F.Michel, "MADKIT : une expérience d'architecture de plateforme multi-agent générique", Actes des journées Francophones d'IA Distribuée et SMA, pp.223-236, Saint-Jean-La-Vêtre, Loire, France, 2-4 octobre 2000.
- [Haghani & al, 02] A.Haghani, M.Banihashemi, "Heuristic approaches for solving large-scale bus transit vehicle scheduling problem with route time constraints", *Transportation Research, Part A* 36, pp. 309-333, 2002.
- [Hansen, 03] J.V.Hansen, "Genetic search in air traffic control", Corrected proof, *Computers & Operations Research*, to appear in 2003.
- [Hayat & al, 97] S.Hayat et S.Maouche, "Régulation du trafic des autobus, Amélioration de la qualité des correspondances", Rapport intermédiaire, Convention ESTAS-I3D, Octobre 1997.
- [Holland, 92] J.Holland, "Adaptation in natural and artificial systems", Second Edition, MIT Press, 1992.
- [Huissman & al, 01] D.Huisman, R.Freling, A.P.M.Wagelmans, "A Dynamic Approach to Vehicle Scheduling", *Econometric Institute, Erasmus University Rotterdam, Netherlands*, Report EI2001-17 (accepted for *Transportation Science* (focussed issue on Real-time Fleet Management) on August 22, 2002 with a new title "A Robust Solution Approach to the Dynamic Vehicle Scheduling Problem").
- [Isaai & al, 00] M.T.Isaai, M.G.Singh, Fellow, IEEE, "An object-oriented, Constraint-based Heuristic for a class of passenger-train scheduling problems", *IEEE Transactions on SMC, part C, Applications and Reviews*, vol.30, NO.1, February 2000.
- [Isaai & al, 01] M. T. Isaai and N. P. Cassaigne, "Predictive and Reactive Approaches to the train-scheduling problem: A knowledge management perspective", *IEEE Transactions on SMC, part C, Applications and Reviews*, vol.31, NO.4, pp. 476-484, November 2001.
- [Jaber & al, 98] A.Jaber, F.Guarnieri, J.L.Wybo, "Un système d'agents Logiciels Intelligents pour favoriser la coopération entre des SAD dédiés à la gestion de crise", Actes de la 6^{ème} journée Francophones d'IA et SMA 1998, pp.39-50.
- [Jennings & al, 95] N.R.Jennings, M.J.Wooldridge, "Intelligent Agents: Theory and Practice", *Knowledge Engineering Review* 2, pp.115-152, 1995.

- [Jennings & al, 98] N.R.Jennings, K.Sycara, M.J.Wooldridge, "A Roadmap of agent research and development", *Autonomous Agents and Multi-Agents Systems*, I, pp.275-306, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998.
- [Jennings, 00] N.R.Jennings, "On agent-based software engineering", *Artificial Intelligence*, Volume 117, Issue 2, pp.277-296, March 2000.
- [Kabachi & al, 96] N.Kabachi, L.Vincent, Y.Ouzrout, "Une société d'agents pour la prise de décision dans les organisations productives", *Actes des journées Francophones d'IA Distribuée et SMA*, pp.35-46, 1996.
- [Kacem & al, 02] I. Kacem, S. Hammadi and P. Borne, "Pareto-Optimality approach for Flexible Job-Shop Scheduling Problems: Hybridization of Genetic Algorithms with Fuzzy Logic", *Journal of Mathematics and Computer in Simulation*, Elsevier Science, pp. 245-276, 2002.
- [Kinny & al, 96] D.Kinny and M.Georgeff, "Modelling and design of multi-agent systems", In J.P.Muller, M.Wooldridge, and N.R.Jennings, editors, *Proceedings of the Third International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages, ATAL-96*, LNAI Volume 1193, pp.1-20, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1996.
- [Koza, 98] J.R.Koza, "Genetic programming", *Encyclopedia of Computer Science and Technology*, Vol.39, pp.29-43, Editors J.G.Williams and A.Kent, 1998.
- [Kühn & al, 99] F.Kühn et S.Hayat, "Indicateurs de qualité de service et faits marquants sur 22 réseaux de transport urbain en Europe", *ESTAS, Synthèse INRETS n° janvier 1999*.
- [Laïchour & al, 01] H.Laïchour, S.Maouche and R.Mandiau, *Traffic Control Assistance in Connection nodes*, *Proceedings of the 2001 IEEE SMC Conference*, 6-10 October 2001, Tucson, Arizona, USA.
- [Laïchour, 02] H.Laïchour, "Modélisation multi-agent et aide à la décision: application à la régulation des correspondances dans les réseaux de transport urbain", *Thèse de doctorat en Automatique et informatique industrielle*, Université des sciences et technologies de Lille, No d'ordre 3239, 20 décembre 2002.
- [Lebacque, 02a] J.P.Lebacque, "Modélisation des réseaux multimodaux", *Groupe de travail multimodalité, INRETS Paris*, 07 février 2002.
- [Lebacque, 02b] J.P.Lebacque, "Introduction aux modèles biniveaux", *Séminaire modèles de trafic, INRETS Paris*, 07 novembre 2002.
- [Li & al, 91] Y.Li, J.M.Rousseau and M.Gendreau, "Real-Time Scheduling on a Transit Bus Route: A 0-1 Stochastic Programming Model", *Rapport de recherche PUB-*

- 772, Centre de Recherche sur le Transport, CRT, Université de Montréal, May 1991.
- [Lind & al, 98] J.Lind and K.Fischer, "Transportation scheduling and Simulation in a railroad scenario: a multi-agent approach", German Research Center for AI (DFKI), Research Report, DFKI-TM-98-05, December 1998.
- [Ljungberg & al, 92] M.Ljungberg and A.Lucas, "The oasis air-traffic management system", In Proceedings of the Second Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence, PRICAI '92, Seoul, Korea, 1992.
- [Mesghouni, 99] K.Mesghouni, "Application des algorithmes évolutionnistes dans les problèmes d'optimisation en ordonnancement de la production", thèse de doctorat en Automatique et Informatique Industrielle, université des sciences et technologies de Lille, 5 janvier 1999.
- [Meskine, 01] A.Meskine et P.Gendre, "Algorithmes et calculs d'optimisation d'itinéraires pour l'information multimodale", Rapport d'étude, CERTU/EMSE (Ecole des Mines de Saint-Étienne et Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions urbaines), Novembre 2001.
- [Michalewicz, 94] Z.Michalewicz, "Genetic algorithms + Data structures = Evolution programs", second extended Edition, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 1994.
- [Murata & al, 96] T.Murata, H.Ishibuchi and H.Tanaka, "Multi-objective genetic algorithm and its applications to flow shop scheduling", Computers industrial Engineering, Vol. 30, No. 4, pp. 957-968, 1996.
- [Nait-Sidi & al, 02] A.Nait Sidi Moh, M.A.Manier and A.El Moudni, "A controlled policy for public transport network modelled by Petri Nets and Max-Plus Algebra", CD-Rom Proceedings of World Automation Congress, ISAC028, WAC 2002, Orlando, Florida, USA, June 9-13, 2002.
- [Ngamchai & al, 00] S.Ngamchai and D.J.Lovell, "Optimal time transfer in bus transit route network design using genetic algorithms", 8th international Conference CASPT, Computer Aided Scheduling of Public Transportation, Berlin, Germany, 21-23 June 2000.
- [Ngamchai & al., 00] S.Ngamchai and D.J.Lovell, "Optimal time transfer in bus transit route network design using genetic algorithms", 8th international Conference CASPT, Computer Aided Scheduling of Public Transportation, Berlin, Germany, 21-23 June 2000.

- [Oussedik & al, 99] S.Oussedik, D.Delahaye and M.Schoenauer, "Dynamic Air Traffic Planning by Genetic Algorithms", Ecole polytechnique, CMAP, *LOG, CEC 29 janvier 1999.
- [Pierreval & al, 03] H.Pierreval, C.Caux, J.L.Paris and F.Viguier, "Evolutionary approaches to the design and organization of manufacturing systems", Computers and Industrial Engineering, Vol.44, pp.339-364, 2003.
- [Pósa, 76] L. Pósa, "Hamiltonian circuits in random graphs", Discrete Mathematics, 14(4), pp.359-364, 1976.
- [Potvin, 96] J.Y.Potvin, "Genetic algorithms for the travelling salesman problem", Annals of Operation Research, Netherlands, 63, pp.339-370, 1996.
- [Rao & al, 95] A.Rao and M.Georgeff, "BDI Agents from Theory to Practice", AAIL, Proceedings of the First International Conference on Multi-agent Systems, pp.312-319, Menlo Park, California USA, June 1995.
- [Renders, 95] J.M.Renders, "Algorithmes génétiques et réseaux de neurones", Hermès, Paris, 1995.
- [Rizzi, 88] M.Rizzi, "La régulation des autobus en ligne, approche théorique et algorithmes", RATP, direction du réseau routier, TEC N°89, juillet-août 1988.
- [Rousseau, 85] J.M.Rousseau and J.Y.Blais, "HASTUS: An interactive systems for buses ans crew scheduling", Computer Scheduling of Public Transport-2, J.M.Rousseau ed., pp.45-60, Amsterdam, North Holland, 1985.
- [Salim & al, 97] V.Salim and X.Cai, "A genetic algorithm for railway scheduling with environmental considerations", Environmental Modelling and Software, Vol.12, No.4, pp.301-309, 1997.
- [Saussol & al, 00] B.Saussol, S.Maouche, S.Hayat, A.Dekokere, A.Dumont, "Elaboration et mise au point d'un système d'aide à la décision pour la gestion du réseau de transport collectif de Montbéliard", Rapport d'étape INRETS-I3D-LAIL, Appui à la modélisation du système multi-agents, juin 2000.
- [Schwefel & al, 97] H.P.Schwefel and T.Bäck, "Artificial Intelligence: How and why?", Genetic Algorithms and evolution strategies in engineering and computer science, Edited by D.Quagliarella & al, J.Wiley Editions, 1997.
- [Secq, 99] Y.Secq, "Notion de service et d'échange de services dans les systèmes multi-agents", Mémoire de DEA en Informatique, Laboratoire d'Informatique Fondamentale de Lille, Université des Sciences et Technologies de Lille, 1 juillet 1999.

- [Shields & al, 99] I.Shields and C.D.Savage "A Hamilton path heuristic with applications to the middle two levels problem", *Congressus Numerantium*, 140, pp.161-178, 1999.
- [Shim & al, 02] J. P. Shim, M.Warkentin, J. F. Courtney, D. J. Power, R. Sharda and C. Carlsson, "Past, present, and future of decision support technology", *Journal of Decision Support Systems*, Volume 33, Issue 2, pp. 111-126, June 2002.
- [Shoham, 93] Y.Shoham, "Agent Oriented Programming", *Artificial Intelligence*, Vol.60, No.1, pp.51-92, 1993.
- [Soulhi, 00] A.Soulhi, "Contribution de l'intelligence artificielle à l'aide à la décision dans la gestion des systèmes de transport urbain collectif", Thèse de doctorat à l'université des sciences et technologies de Lille, 18 janvier 2000.
- [Stevens, 95] G.Stevens, "An approach to scheduling aircraft landing times using genetic algorithms", Honours thesis, RMIT, Department of Computer Science, November 1995.
- [Sycara, 98] K.P.Sycara, "Multi-agent Systems", *American Association for Artificial Intelligence, AI Magazine*, pp.79-92, Eté 1998.
- [Talbi, 00] E-G.Talbi, "Contribution à la résolution parallèle de problèmes d'optimisation combinatoire", Rapport de H DR en Informatique à l'université de Lille 1, 2000.
- [Talbi & al, 01] E-G.Talbi, M.Rahoual, M.H.Mabed and C.Dhaenens, "A Hybrid Evolutionary Approach for Multi-criteria Optimization Problems: Application to the Flow Shop", *Proceedings of first international conference, Evolutionary Multi-criterion Optimization, EMO2001*, pp.416-428, Zurich, March 2001.
- [Tan & al, 01] K.C.Tan, L.H.Lee, K.Q.Zh and K.Ou, "Heuristic methods for vehicle routing problem with time windows", *Artificial Intelligence in Engineering*, 15, pp.281-295, Elsevier, 2001.
- [Thangiah & al, 95] S.R.Thangiah, "Vehicle Routing with Time Windows using Genetic Algorithms", *Artificial Intelligence and Robotics Laboratory, Slippery Rock University USA*, Submitted to the book on "Applications Handbook of Genetic Algorithms: New Frontiers", 1995.
- [Valouxix, 02] C.Valouxix and E.Housous, "Combined bus and driver scheduling", *Computers and Operations Research* 29, pp.243-259, 2002.
- [Vandegriend, 98] B.Vandegriend, "Finding Hamiltonian cycles : algorithms, graphs and performance", thesis submitted to the faculty of Graduate Studies end Research in

partial fulfilment of requirements for the degree of Master of Science, University of Alberta, Canada, Spring 1998.

- [Whitley & al, 90] D.Whitley, T.Starkweather and D.Shaener, "Travelling salesman and sequence scheduling: quality solutions using genetic edge recombination", in Handbook of Genetic Algorithms, L.Davis Eds, Van Nostrand Reinhold, pp.350-372.
- [Wooldridge & al, 94] M.J.Wooldridge and N.R.Jennings, "Agent Theories, Architectures, and Languages: A Survey", Proceedings of ECAI-Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages (eds. M.J.Wooldridge and N.R.Jennings), Amsterdam, The Netherlands, pp.1-32, 1994.
- [Wooldridge & al, 95] M.J.Wooldridge and N.R.Jennings, "Intelligent Agents: Theory and Practice", The Knowledge Engineering Review, 10(2), pp.115-152, 1995.
- [Wooldridge & al, 99] M.Wooldridge, N.R.Jennings and D.Kinny, "A methodology for agent-oriented Analysis and design", In Proceedings of the Third International Conference on Autonomous Agents, ACM Press, pp.69-76, Seattle, WA, USA, 1999.
- [Wooldridge & al, 00] M.Wooldridge, N.R.Jennings and D.Kinny, "The Gaia methodology for agent-oriented Analysis and design", Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, Kluwer Academic publishers, Vol.3, No.3, pp.285-312, 2000.
- [Wren, 98] A.Wren, "Heuristics ancient and modern: transport scheduling through the ages", Journal of Heuristics, 4, pp.87-100, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [Wren & al, 00] A.Wren, R.S.K.Kwan and A.S.K.Kwan, "Hybrid genetic algorithm for scheduling bus and train drivers", Report 2000.05, School of Computer Studies, University of Leeds, UK, February 2000.
- [Wynter, 03] L.Wynter et P.Lolito, "Boîte à outils affectation du trafic de Scilab : étude sur l'analyse de transport en région périurbaine", 10^{ème} rencontre INRIA-Industrie, Applications de l'informatique et de l'automatique aux transports, Paris-Rocquencourt, 16 janvier 2003.
- [Yan, 97] S.Yan and Y.P.Tu "Multifleet routing and multistop flight scheduling for schedule perturbation", European Journal of Operational Research, Vol.103, Issue 1, pp.155-169, November 1997.
- [Zhu, 95] K.Q.Zhu, "A New Genetic Algorithm for VRPTW", Journal of Combinatorial Optimization, April 2000.

Récapitulatif des Publications

Dans le cadre de ces travaux, nous avons écrit six articles dont un dans une revue internationale et cinq dans des congrès internationaux. Nous précisons dans les paragraphes suivants les références des différentes publications concernées, par ordre chronologique, en parlant brièvement de leurs apports et de leurs liaisons avec les chapitres de ce mémoire. Nous notons que 4 articles ont été exposés dans les congrès (Tunisie (Sousse et Hammamet), Nantes et Orlando).

1. IEEE SMC, Octobre 2001 :

“Urban Bus Traffic Regulation by Evolutionary Algorithms”, B.Fayech, S.Hammadi, S.Maouche and P.Borne, Proceedings of the 2001 IEEE Systems, Man and Cybernetics Conference, 6-10 October 2001, Tucson, Arizona, USA, D03-1, pp1316-1322.

Cet article marque le début des travaux sur l’approche évolutionniste de régulation temporelle. En effet, nous y exposons le problème de la régulation en formulant les trois critères sous forme de gain, ce qui est lié aux chapitres II, IV et V. Nous y avons présenté un scénario concernant deux lignes de bus avec une même fréquence.

2. JTEA, Mars 2002 :

[Fayech & al, 02a] “An Evolutionary Rescheduling Approach for an Urban Transport Network with Simultaneous Disturbances”, B.Fayech, S.Hammadi, S.Maouche and P.Borne, JTEA 2002, 21-23 Mars, Sousse, Tunisie.

Ce papier, qui a été présenté au congrès JTEA en Tunisie, s’intéresse à la formulation de la problématique de la régulation lors de l’apparition simultanée de plusieurs perturbations, que nous n’avons pas vraiment traité dans ce mémoire. Ce problème peut constituer une importante perspective dans la mesure de la coopération entre les agents ZONEREG dans le traitement de perturbations liées. Nous ne parlons alors que du cas monomodal et de l’approche évolutionniste de régulation temporelle. Toutefois, ce papier a contribué à la rédaction des chapitres II, IV et V (scénario 4) et aussi du chapitre III quant au comportement des agents ZONEPERT et ZONEREG.

3. World Automation Congress, Juin 2002 :

[Fayech & al, 02b] “Multi-Agent Decision-Support System for an Urban Transportation Network”, B.Fayech, S.Maouche, S.Hammadi and P.Borne, World Automation Congress 2002, 9-13 June, Florida, USA.

Nous avons exposé cet article à Orlando, dans une session sur le transport. Il traite en fait la première version du SMAAD dans le cas monomodal. Il est ainsi fortement lié au chapitre III. Nous y avons présenté l'architecture générale du SMAAD et le rôle de ses différents composants.

4. Conférence Internationale Francophone de l'Automatique, Juillet 2002 :

[Fayech & al, 02c] “Approche Coopérative pour la Régulation d'un Réseau de Transport Multimodal”, B.Fayech, S.Hammadi, S.Maouche et P.Borne, CIFA2002, pp. 177-182, 8-10 juillet 2002, Nantes, France.

Nous avons remarqué d'après l'article 3 que le SMAAD s'adapte bien à la problématique qui nous concerne du fait de la distribution des entités du réseau de transport. Nous l'avons ainsi généralisé au cas multimodal dans le papier du CIFA (chapitre III). Nous avons également parlé dans ce papier de la coopération entre l'approche agent et l'approche évolutionniste pour la régulation du trafic. Nous y avons aussi exposé la paramétrage de la flexibilité du réseau comme introduction à l'approche évolutionniste de régulation avec reconfiguration (Chapitre IV). Dans cet article, nous avons aussi décrit l'aspect « anytime » et interruptible de l'approche évolutionniste de régulation exécutée par les agents ZONEREG (chapitre III). Les résultats présentés concernent un exemple multimodal de régulation.

5. IEEE SMC, Octobre 2002 :

[Fayech & al, 02d] “Partial Network Reconfiguration Through A Dynamic Vehicle Scheduling Approach”, B.Fayech, S.Hammadi, S.Maouche and P.Borne, IEEE SMC 2002, CDROM Proceedings TA2I3, 6-9 october 2002, Hammamet, Tunisia.

Dans cet article, nous avons décrit brièvement le formalisme mathématique du chapitre II. Nous y avons ainsi exposé l'approche évolutionniste de régulation spatio-temporelle pour enfin parler de la notion de reconfiguration partielle (Chapitre IV). Toutefois, nous n'avons utilisé que le codage CNH.

6. IEEE SMC Transactions C, Février 2003 :

[Borne & al, 02] “Decision Support System for Urban transportation networks”, P.Borne, B.Fayech, S.Hammadi and S.Maouche, IEEE SMC-Part C: Application and Reviews, Special Issue on Decision Technologies, Vol.33, NO.1, pp.67-77, February 2003.

Dans ce papier, il s’agit d’abord du contexte général de l’aide à la décision et des systèmes d’aide à la décision que nous avons exposés au premier chapitre de ce mémoire. Nous y précisons également la notion de l’horizon spatio-temporel de la régulation (chapitre II et III). Cet article concerne aussi une description du SMAAD et de l’approche évolutionniste de régulation spatio-temporel en détaillent la formulation des différents critères de régulation (chapitres II, III et IV).

Le contenu de ces articles décrit l’évolution des travaux réalisés au cours de cette thèse et ne peuvent que témoigner de leur importance et surtout des nombreuses perspectives qu’ils suggèrent.

Annexes

Annexe 1 : Les lignes de Transpole utilisées dans les scénarios

Nous présentons les données que nous avons utilisées dans ce mémoire afin de tester l'efficacité de nos travaux. Nous avons en fait récupéré les différents Tableaux de Marches de 4 lignes de bus et d'une ligne de tramway du réseau de Transpole, via le site Internet de cette compagnie : www.transpole.fr.

TMT LIGNE 6

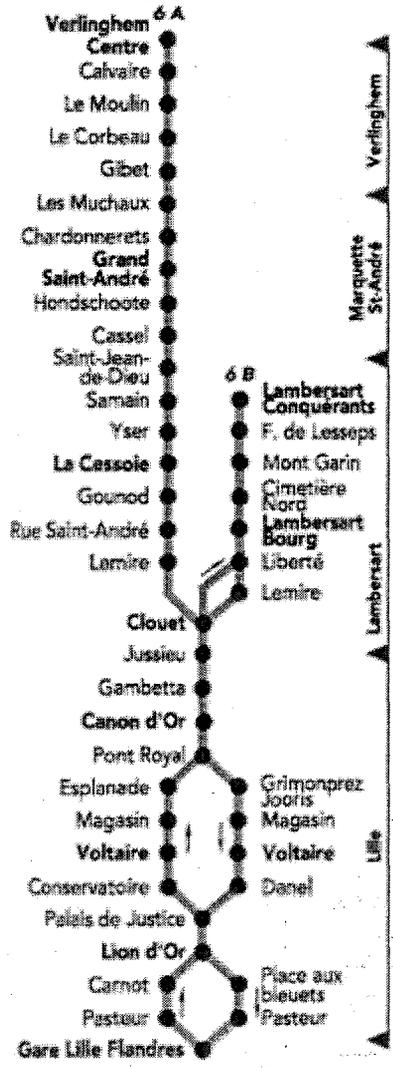
Véhicules

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
|---|---|---|---|---|---|

Arrêts

| | | | | | | |
|------------------------------------|-------|-------|--------------|--------------|-------|-------|
| Pont Royal S- | 17:34 | 17:44 | 17:53 | 18:02 | 18:20 | 18:26 |
| Grimonprez S- | 17:37 | 17:47 | 17:56 | 18:05 | 18:23 | 18:29 |
| Magasin S- | 17:39 | 17:49 | 17:58 | 18:07 | 18:25 | 18:31 |
| Voltaire S- | 17:40 | 17:50 | 17:59 | 18:08 | 18:26 | 18:32 |
| Danel S- | 17:41 | 17:51 | 18:00 | 18:09 | 18:27 | 18:33 |
| Palais de justice S- | 17:44 | 17:54 | 18:03 | 18:12 | 18:30 | 18:36 |
| Lion d'Or S- | 17:45 | 17:55 | 18:04 | 18:13 | 18:31 | 18:37 |
| Place Bleuets S- | 17:47 | 17:57 | 18:06 | 18:15 | 18:33 | 18:39 |
| paster S- | 17:50 | 18:00 | 18:09 | 18:18 | 18:35 | 18:41 |
| Gare Lille Flandres Arrivée | 17:55 | 18:05 | 18:14 | 18:23 | 18:39 | 18:45 |
| Gare Lille Flandres Départ | 17:59 | 18:11 | 18:20 | 18:28 | 18:44 | 18:51 |
| Pasteur S+ | 18:01 | 18:13 | 18:22 | 18:30 | 18:46 | 18:53 |
| Carnot S+ | 18:04 | 18:16 | 18:25 | 18:33 | 18:48 | 18:55 |
| Lion d'Or S+ | 18:06 | 18:18 | 18:27 | 18:35 | 18:49 | 18:56 |
| Palais de justice S+ | 18:08 | 18:20 | 18:29 | 18:37 | 18:51 | 18:58 |
| Conservatoire S+ | 18:09 | 18:21 | 18:30 | 18:38 | 18:52 | 18:59 |
| Voltaire S+ | 18:11 | 18:23 | 18:32 | 18:40 | 18:54 | 19:01 |
| Magasin S+ | 18:12 | 18:24 | 18:33 | 18:41 | 18:55 | 19:02 |
| Esplanade S+ | 18:14 | 18:26 | 18:35 | 18:43 | 18:57 | 19:04 |
| Pont Royal S+ | 18:17 | 18:29 | 18:38 | 18:46 | 19:00 | 19:07 |
| Canon D'Or S+ | 18:18 | 18:30 | 18:39 | 18:47 | 19:01 | 19:08 |

Ligne 6



TMT LIGNE 12

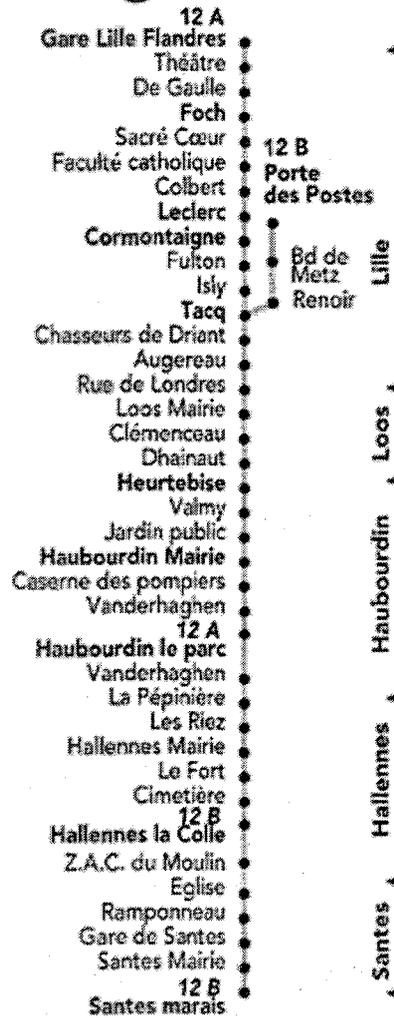
Véhicules

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
|---|---|---|---|---|---|

Arrêts

| | | | | | | |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tacq S- | 17:35 | 17:49 | 18:00 | 18:09 | 18:17 | 18:28 |
| Fulton S- | 17:37 | 17:51 | 18:02 | 18:11 | 18:19 | 18:30 |
| Cormontaigne S- | 17:39 | 17:53 | 18:04 | 18:13 | 18:21 | 18:32 |
| Leclerc S- | 17:40 | 17:54 | 18:05 | 18:14 | 18:22 | 18:33 |
| Colbert S- | 17:42 | 17:56 | 18:07 | 18:16 | 18:24 | 18:35 |
| Faculté catholique S- | 17:44 | 17:58 | 18:09 | 18:18 | 18:26 | 18:37 |
| Sacré cœur S- | 17:45 | 17:59 | 18:10 | 18:19 | 18:27 | 18:38 |
| Foch S- | 17:49 | 18:03 | 18:14 | 18:23 | 18:31 | 18:42 |
| De Gaulle S- | 17:51 | 18:05 | 18:16 | 18:25 | 18:33 | 18:44 |
| Théâtre S- | 17:53 | 18:07 | 18:18 | 18:27 | 18:35 | 18:46 |
| Gare Lille Flandres Arrivée | 17:56 | 18:10 | 18:21 | 18:30 | 18:38 | 18:49 |
| Gare Lille Flandres Départ | 18:08 | 18:18 | 18:28 | 18:37 | 18:47 | 18:57 |
| Théâtre S+ | 18:12 | 18:22 | 18:32 | 18:41 | 18:51 | 19:01 |
| de Gaulle S+ | 18:15 | 18:25 | 18:35 | 18:44 | 18:54 | 19:04 |
| Foch S+ | 18:17 | 18:27 | 18:37 | 18:46 | 18:56 | 19:06 |
| Sacré cœur | 18:20 | 18:30 | 18:40 | 18:49 | 18:59 | 19:09 |
| Faculté catholique S+ | 18:22 | 18:32 | 18:42 | 18:51 | 19:01 | 19:11 |
| Colbert S+ | 18:24 | 18:34 | 18:44 | 18:53 | 19:03 | 19:13 |

Ligne 12



TMT LIGNE 13

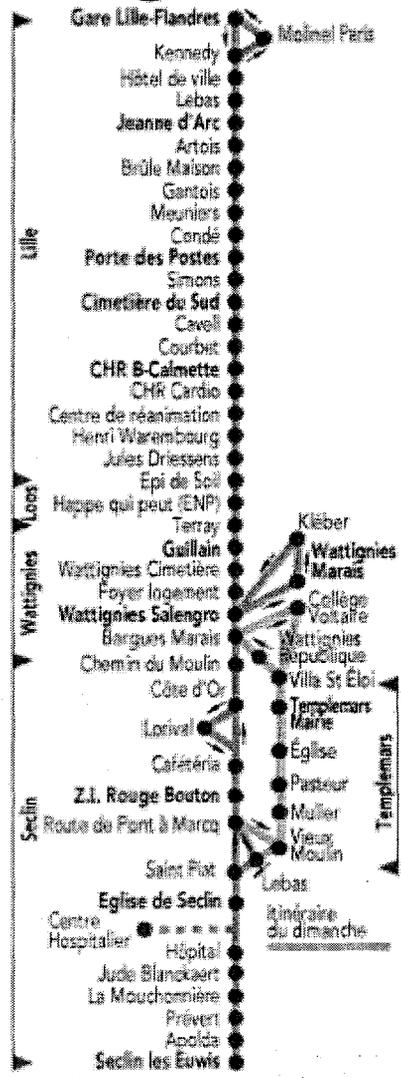
Véhicules

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
|---|---|---|---|---|

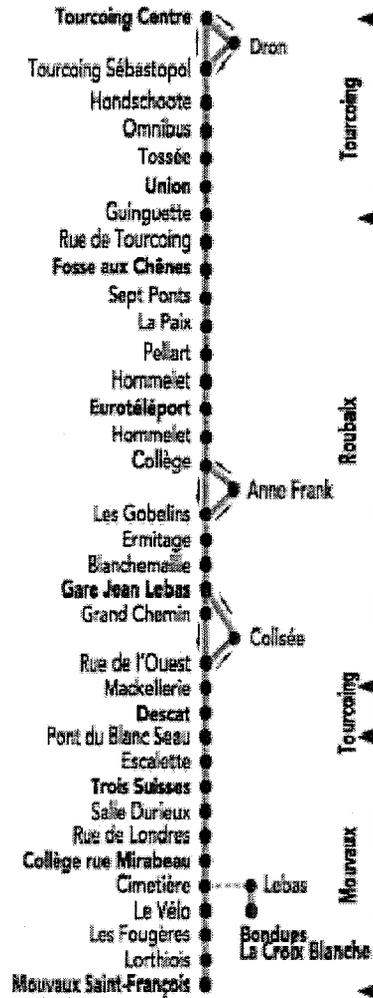
Arrêts

| | | | | | |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Meuniers S- | 17:15 | 17:29 | 17:56 | 18:27 | 18:42 |
| Gantois S- | 17:16 | 17:30 | 17:57 | 18:28 | 18:43 |
| Brûle Maison S- | 17:18 | 17:32 | 17:59 | 18:30 | 18:44 |
| Artois S- | 17:19 | 17:33 | 18:00 | 18:31 | 18:45 |
| Jeanne d'Arc S- | 17:23 | 17:37 | 18:04 | 18:35 | 18:49 |
| Lebas S- | 17:27 | 17:41 | 18:08 | 18:39 | 18:52 |
| Hotel de Ville S- | 17:29 | 17:43 | 18:10 | 18:41 | 18:54 |
| Molinel Paris S- | 17:32 | 17:46 | 18:13 | 18:44 | 18:57 |
| Gare Lille Flandres Arrivée | 17:33 | 17:47 | 18:14 | 18:45 | 18:58 |
| Gare Lille Flandres Départ | 17:41 | 17:55 | 18:21 | 18:48 | 19:05 |
| Kennedy S+ | 17:46 | 18:00 | 18:25 | 18:52 | 19:09 |
| Hotel de Ville S+ | 17:48 | 18:02 | 18:26 | 18:53 | 19:10 |
| Lebas S+ | 17:49 | 18:03 | 18:28 | 18:55 | 19:11 |
| Jeanne d'Arc S+ | 17:52 | 18:06 | 18:30 | 18:57 | 19:13 |
| Artois S+ | 17:53 | 18:07 | 18:31 | 18:58 | 19:14 |
| Brûle Maison S+ | 17:54 | 18:08 | 18:32 | 18:59 | 19:15 |
| Gantois S+ | 17:56 | 18:10 | 18:33 | 19:00 | 19:16 |

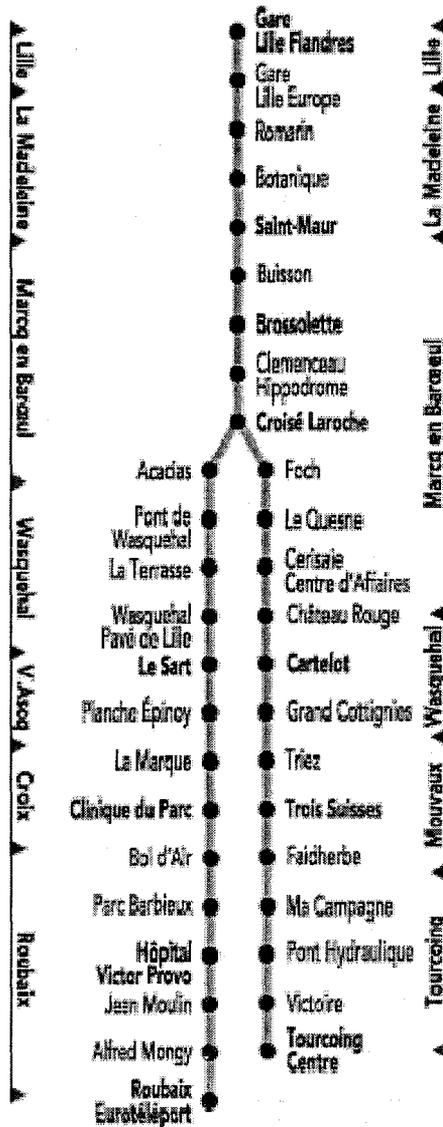
Ligne 13



Ligne 27



Tramway



Annexe 2 : Description de la plateforme du SMAAD [Denaison, 03]

1- Classe abstraite CAgent :

Nous avons défini une structure minimale pour l'agent afin d'optimiser les ressources du système et privilégier la rapidité d'exécution de ses éléments. Tout Agent contient :

- son identification (indice, type, indice_server)
- sa base de connaissances (registre des données contenant un « buffer » de données primaires et un autre de données secondaires)
- son module de communication
- son module de raisonnement (interprétation des commandes).

Ces caractéristiques sont regroupées dans une classe générique dite abstraite, CAgent.

Par exemple, nous attribuons un registre d'états aux différents agents afin d'éviter les conflits et les exceptions provoquées par les entrées et sorties des agents :

```
protected boolean registre_etat[10];
```

Modèle du registre d'état :

| | | | | | | | | | |
|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| <i>ACTIF</i> | <i>INIT</i> | <i>INSTR</i> | <i>LECT</i> | <i>ECRIT</i> | | | | | |

ACTIF : Ce drapeau est mis à «ON » lorsque l'agent est activé.

INIT : Indique si l'agent a été initialisé.

INSTR : Lorsque l'agent effectue une commande ce flag passe à ON.

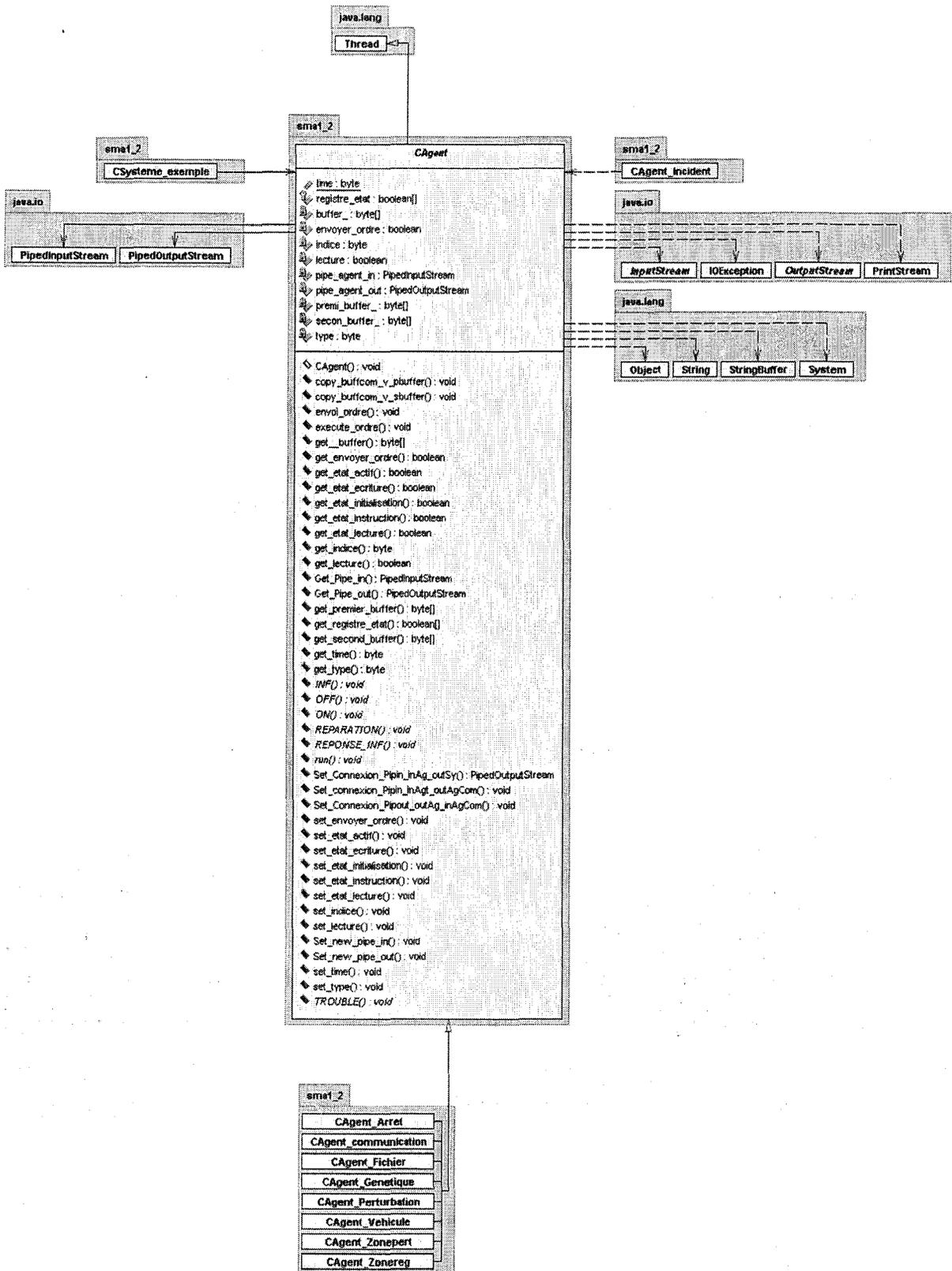
LECT : Lors de l'écriture d'un message ce booléen passe à 1

ECRIT : Lors de la lecture d'un message ce booléen passe à 1

Exemples de méthodes du registre d'état :

```
public void set_etat_actif(boolean s_etat)           public boolean[] get_registre_etat()
public void set_etat_initialisation(boolean s_etat) public boolean get_etat_lecture()
public void set_etat_instruction(boolean s_etat)    public boolean get_etat_ecriture()
public void set_etat_lecture(boolean s_etat)       public boolean get_etat_actif()
public void set_etat_ecriture(boolean s_etat)      public boolean get_etat_actif()
```

Nous avons aussi défini des commandes génériques (ON, OFF, INF, TRO, ETR) pour tous les agents, mais leurs interprétations diffèrent d'un agent à un autre. Par exemple, la commande ON signifie pour un agent VEHICULE l'action « déplacer ».



Contenu de la classe CAgent.

2- Communication :

Les agents ont besoin de communiquer pour pouvoir interagir et échanger de l'information. Cette communication se base sur le langage KQML où un standard de message à trois niveaux est utilisé (cf. chapitre III, paragraphe III.2.3.2). Le premier est un niveau de communication qui décrit le niveau bas des paramètres de la communication comme l'expéditeur, le receveur et l'identificateur de système. Le deuxième est le niveau du message où le protocole d'interprétation est indiqué. Le troisième niveau, contient les informations assignées au message soumis.

Le registre de communication est formaté suivant le modèle des messages décrits ci-dessus.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| REC | EME | TEM | CNT | TIM | ISE | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | D7 | D8 | D9 | D10 | D11 | D12 | D13 | D14 |
| 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

On utilise un « buffer » de 20 octets répartis en 3 parties :

- Niveau bas : Buffer_com[0] : REC : indice du récepteur
 Buffer_com[1] : EME : indice de l'émetteur
 Buffer_com[2] : TEM : type de l'émetteur
 Buffer_com[5] : ISE : indice du serveur du récepteur
- Niveau intermediaire : Buffer_com[3] : TIM : date d'émission du message.
 Buffer_com[4] : CNT : commande à effectuer
- Niveau haut : Buffer_com[6...19] : DAT les informations adjointes au message.

3- Exemple d'implémentation de l'agent VEHICULE

L'agent VEHICULE doit suivre un déplacement précis qui respecte son tableau de marche théorique en adaptant sa vitesse. Cet agent devra également communiquer ses horaires (simulés) de passage aux agents ARRET concernés et leur enverra éventuellement un message d'alerte en cas de perturbation.

3.1. Structure des données de la classe CAgent_Vehicule :

Le Registre d'état de ces agents contient les états suivants :

| | | | | | | | | | |
|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|---|---|---|
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| ACTIF | INIT | INSTR | LECT | ECRIT | PANNE | ROULE | | | |

Voici quelques méthodes utilisées par ces agents :

```
public void set_Panne (boolean s_panne);      public boolean Get_Panne();
void set_Roule (boolean s_Roule);           public boolean Get_Roule();
```

Le premier niveau des données (premier buffer) concerne les données théoriques et dynamiques de déplacement comme inAi pour l'indice du i-ème arrêt, le retard R, la vitesse V et Idpa pour l'indice du prochain arrêt.

| | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|---|---|---|------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| inA1 | InA2 | InA3 | InA4 | InA5 | InA6 | inA7 | R | D | V | Idpa | Idxpa | libre | libre |

En ce qui concerne le deuxième buffer, il contient les données théoriques sur les distances inter-arrêts et les horaires théoriques de passage des véhicules.

3.2- Déplacement des véhicules

A chaque franchissement d'arrêt, il incrémente son indexe « prochain arrêt » (idxpa), calcule sa vitesse moyenne grâce au données spatio-temporelles contenues dans sa base de connaissances et contacte le prochain arrêt. Cet agent ARRET enregistre alors l'horaire de passage du véhicule.

Syntaxe du message :

- Destinataire : « arrêt prochain »
- Type agent émetteur : agent véhicule
- Contenu : ON

Format des données du message :

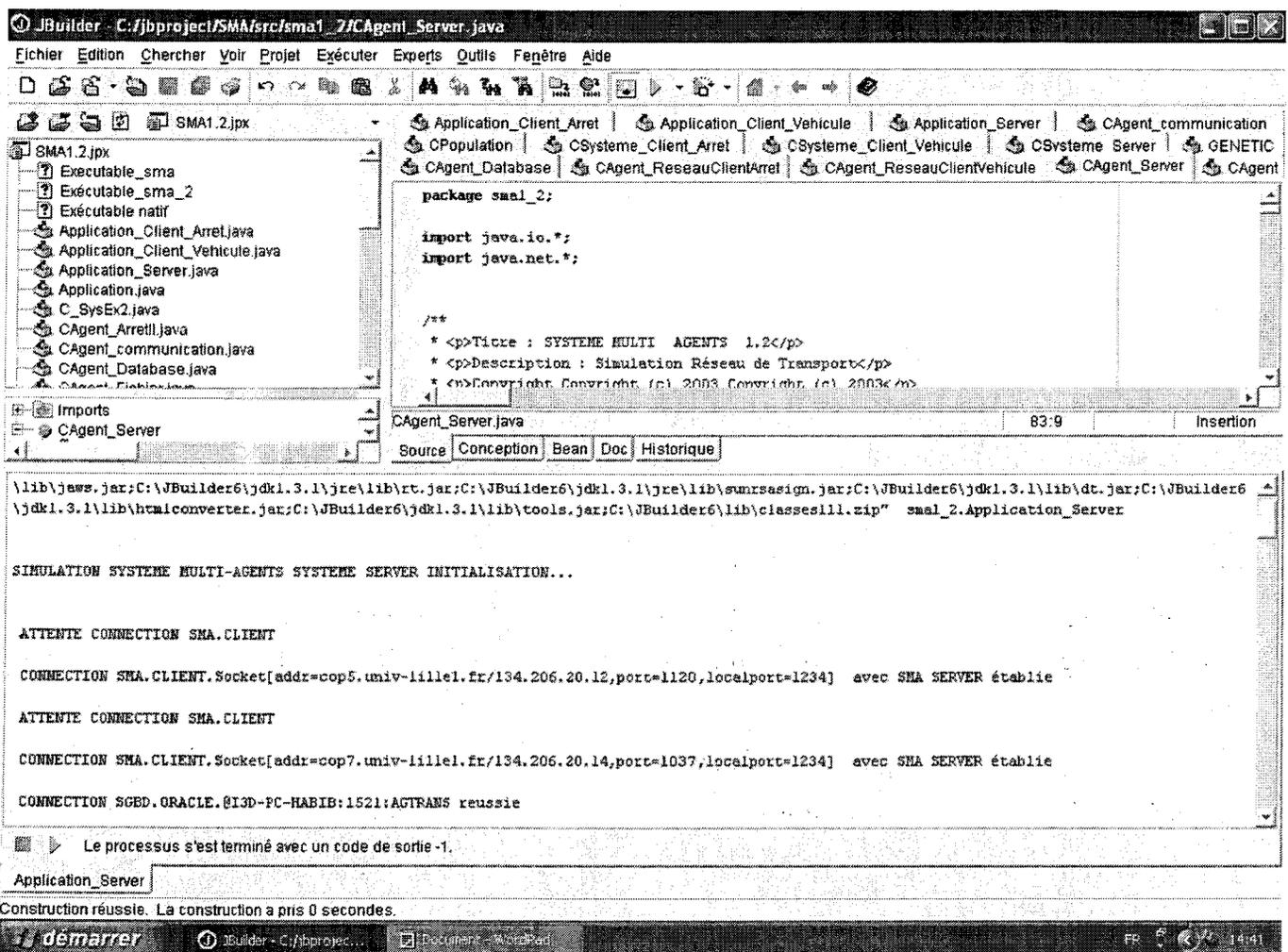
| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|-----|------|-------|-------|-------|
| D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | D7 | D8 | D9 | D10 | D11 | D12 | D13 | D14 |
| HA1 | HA2 | HA3 | HA4 | HA5 | HA6 | HA7 | R | D | V | IdpA | IdxpA | libre | libre |

4- Fonctionnement global de la plateforme

Rappelons que la plateforme est composée de quatre sous-systèmes oeuvrant en parallèle :

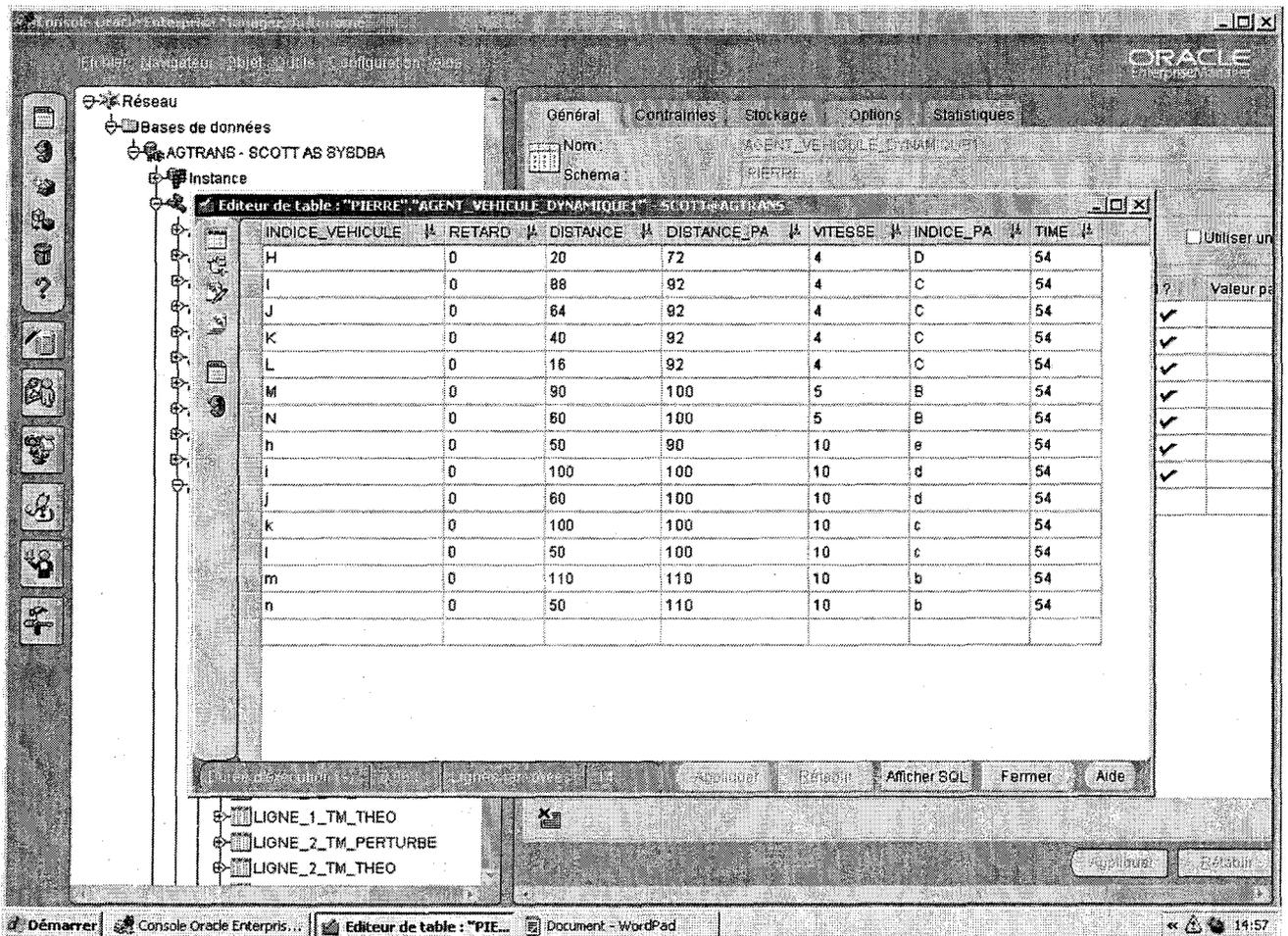
- un serveur pour le contrôle de la communication,
- un sous-système de base de données,
- un sous-système pour la simulation des déplacements des véhicules (équivalent au SAE),
- un sous-système pour le module de régulation du SMAAD.

Au lancement de l'application, tous les sous-systèmes doivent se connecter au serveur.



Première Connexion au Serveur.

La base de données contient les données sur les déplacements des véhicules (distances inter-arrêts, horaires théoriques et perturbés de passage, itinéraires théoriques, retards, vitesse, etc.).



Présentation du sous-système de la base de données.

Une fois l'agent ZONEREG activé par l'agent INCIDENT, il doit récupérer les données de l'agent ZONEPERT et lancer l'algorithme évolutionniste de la régulation. Nous affichons le nombre de génération et le meilleur coût courant.

```

for (int i=0;i<1000;i++)
{
    if (i==k*100)
    {

```

```

AGENT.ZONEREG.R time:0      reception donnée AGENT.ZONEPERT
AGENT.ZONEREG.R time:0      DECLENCHEMENT ALGO-GENETIQUE
Generation:0
fitness meilleur individu :201.0
Generation:100
fitness meilleur individu :269.0
Generation:200
fitness meilleur individu :276.0
Generation:300
fitness meilleur individu :282.0
Generation:400
fitness meilleur individu :282.0
Generation:500
fitness meilleur individu :284.0
Generation:600
fitness meilleur individu :284.0
Generation:700
fitness meilleur individu :286.0
Generation:800
fitness meilleur individu :290.0
Generation:900
fitness meilleur individu :293.0
Le processus s'est terminé avec un code de sortie -1

```

Application_Client_Arret

Construction réussie. La construction a pris 0 secondes.

Demarrer | JBuilder - C:\WINDO... | Document WordPad | 15:56

Déclenchement de l'algorithme évolutionniste de régulation.

