

Sommaire

Résumé	6
Glossaire	7
Abréviations	9
Introduction générale	11
Chapitre 1 : Introduction aux réseaux de transports urbains collectifs	17
1.1 Introduction	17
1.2 Configuration d'un réseau de transport urbain	17
1.3 Processus de planification	19
1.4 Exploitation d'un réseau de transport urbain	19
1.5 Perturbation et régulation	21
1.6 Aide à la décision	28
1.7 Conclusion	30
Chapitre 2 : La machine cellulaire CASI	31
2.1 Introduction	31
2.2 Quelques travaux réalisés avec CASI	31
2.3 Principe de fonctionnement du moteur d'inférence classique	36
2.4 La machine cellulaire	39
2.5 Conclusion	48
Chapitre 3 : Modélisation d'un réseau de transport urbain	49
3.1 Introduction	49
3.2 Modélisation des réseaux de transport urbain	49
3.3 Etude comparative des modèles proposés	66
3.4 Conclusion	68
Chapitre 4 : Le moteur d'inférence cellulaire pour la régulation d'un RTU	69
4.1 Introduction	69
4.2 Passage des algorithmes de régulation vers la nouvelle codification (règles cellulaires)	69

4.3 Exploitation du moteur d'inférence cellulaire	80
4.4 Exemple de fonctionnement	83
4.5 Etude comparative entre moteur d'inférence classique et cellulaire	87
4.6 Conclusion	88
Chapitre 5 : Apport de la machine cellulaire pour la régulation et la reconfiguration	91
Partie 1 : Exploitation de l'indexation cellulaire pour un RBC	91
5.1 Introduction	91
5.2 Exploitation d'un RBC avec une indexation classique : exemple illustratif	92
5.3 Passage d'une indexation par situation comportementale à une indexation cellulaire	96
5.4 Modification de la machine cellulaire pour l'indexation cellulaire	99
5.5 Interprétation des résultats relatifs à l'indexation cellulaire et à la nouvelle codification	101
5.6 Synthèse des résultats obtenus	103
5.7 Conclusion	103
Partie 2 : Reconfiguration d'un RTU via la machine cellulaire	104
5.8 Introduction	104
5.9 Travaux antérieurs pour la reconfiguration d'un RTU	104
5.10 Notion de reconfiguration pour un réseau de transport urbain	105
5.11 Existence d'itinéraire de déviation	106
5.12 Exploitation de la machine cellulaire pour le changement d'itinéraire	107
5.13 Interprétation des résultats pour l'action « changement d'itinéraire »	110
5.14 Intégration du module changement d'itinéraire dans la plateforme SARRT	111
5.15 Synthèse sur l'apport de l'action changement d'itinéraire	113
5.16 Conclusion	114
Chapitre 6 : Evaluation des critères pour la prise de décision dans un SAR	115
6.1 Introduction	115
6.2 Problématique et contribution	116
6.3 Architecture fonctionnelle de la plateforme SARRT	116

6.4 Identification des critères d'évaluation des décisions	118
6.5 Elaboration des décisions et leurs évaluations	119
6.6 L'évaluation des décisions	120
6.7 Formulation algorithmique des critères	121
6.8 Etude de cas : discussion et résultats	125
6.9 Mise en œuvre	127
6.10 Conclusion	129
Conclusion générale et Perspectives	131
Bibliographie générale	135
Bibliographie personnelle	141
Annexes	145

RÉSUMÉ. Cette thèse propose l'intégration d'une nouvelle approche à base d'automate cellulaire pour la régulation et la reconfiguration des réseaux de transports urbains collectifs.

La complexité des réseaux de transports urbains a un effet très important sur les perturbations. Des incidents s'avèrent très compliqués lorsqu'il y a particulièrement plusieurs zones concernées ou bien blocage d'un itinéraire pour une durée plus ou moins longue. Dans ce cas là, une régulation adaptée ou tout particulièrement des modifications d'itinéraire s'avèrent nécessaires.

Nous nous intéressons dans cette thèse à l'exploitation de cette approche, à son adaptation à la régulation et la reconfiguration d'un RTU et enfin à son intégration dans une plateforme de régulation existante « SARRT » d'un réseau de transport urbain collectif afin d'améliorer les performances de cette dernière d'un point de vue temps de réponse et stockage des données. Pour la mise en œuvre de cette approche nous exploitons un langage de modélisation booléen (BML) adopté par le moteur d'inférence cellulaire (CIE).

MOTS-CLÉS: Système d'aide à la régulation (SAR), Reconfiguration spatiale, Réseau de transport urbain (RTU), Moteur d'inférence cellulaire, Plateforme SARRT.

ملخص : هذه الرسالة تقترح إدماج مقارنة جديدة تقوم على البارادون الخليوي لتنظيم وإعادة تشكيل شبكات النقل العام في المناطق الحضرية. تعقيد نظم النقل الحضري لديها تأثير كبير على الاضطرابات. حوادث معقدة جدا عندما تكون هناك العديد من المناطق المتضررة بشكل خاص أو عرقلة الطريق ل. أطول أو أقصر في هذه الحالة، لا بد من تغييرات مناسبة طريق تنظيم أو خاصة. ونحن مهتمون في هذه الدراسة إلى إدماج هذا النهج الجديد في عنصر تحكم منصة القائمة SARRT شبكة النقل الحضري الجماعي لتحسين الأداء من وجهة نظر زمن الاستجابة وتخزين البيانات. لتنفيذ هذا النهج نستخدم لغة النمذجة المنطقية (BML) التي اعتمدها الاستدلال محرك الخلية.

كلمات مفتاحية: دعم نظام تنظيم، إعادة تكوين الفضاء، شبكة النقل الحضري (RTU)، منصة المحرك الخليوي SARRT.

ABSTRACT. This thesis proposes the integration of a new approach based on cellular automata for the regulation and the reconfiguration of urban transportation systems.

The complexity of an UTS has a dramatic effect on disturbances. Incidents are very complicated when there are several areas particularly concerned or blocking a route for a longer or shorter. In this case, appropriate regulation action or any particular route changes are necessary. We focus in this study to integrate this new approach in an UTS regulating platform SARRT to improve collective performance point of view response time and data storage. To implement this approach we use a Boolean modeling language (BML) adopted by the cellular inference engine (CIE).

KEYWORDS: Decision-Making System of regulation (DMSR), Spatial Reconfiguration, Urban Transportation System (UTS), Cellular Inference Engine (CIE), SARRT Platform.

Glossaire

Avance	écart négatif entre l'horaire réel et l'horaire commandé (avance subie) ou bien entre l'horaire commandé et l'horaire de base (avance commandée).
Capacité:	nombre de passagers que peut contenir un véhicule
Charge	nombre réel de passagers que contient un véhicule.
Changement de mission	action consistant à affecter une voiture à une autre mission que celle prévue initialement. Le changement de mission peut s'effectuer par raccourcissement (demi-tour), par rallongement ou par transformation.
Course spéciale ou spécial	course prévue au TM effectuée en dehors de l'itinéraire commercial
Dégarage	action de remise en ligne d'un véhicule garée provisoirement au terminus
Dépassement sur ligne	action qui consiste à faire doubler une voiture par celle qui la suit.
Dépôt de remisage	dépôt assurant le commandement des conducteurs, le remisage et l'entretien des voitures sur la ligne concernée
Dépôt d'exploitation	dépôt assurant la préparation et le contrôle du service sur la ligne concernée.
Fréquence	nombre de départs ou de passages à un arrêt ou sur un tronçon de ligne par unité de temps.
Graphicage	opération d'élaboration de l'horaire théorique
Habillage	opération de répartition du temps de travail total découlant de l'offre définie par le graphicage entre des services conducteurs satisfaisant aux conditions de travail.
Horaire réel	horaire effectivement réalisé.
Horaire théorique	horaire du TMT tel qu'il est prévu.
Inter-arrêt ou interstation	segment de ligne borné par deux arrêts successifs.
Intervalle	laps de temps séparant les heures de départ ou de passage de deux courses consécutives à un point d'arrêt.
Ligne à horaire	ligne où l'offre de service commercial est définie par les heures de passage en certains points caractéristiques affichés aux points d'arrêt.
Ligne à intervalle	ligne où l'offre de service commercial est définie par l'intervalle pratiqué aux différentes périodes de la journée ainsi que par les premiers et les derniers départs qui sont affichés au point d'arrêt.
Lacune	différence en un point de la ligne et à un instant donné entre

	l'intervalle de l'horaire réel et l'intervalle de l'horaire commandé.
Mission	type de course
Permutation des conducteurs sur ligne	action consistant à intervertir à leur point de croisement les conducteurs de deux voitures circulant en sens opposés
Point de retournement	point de la ligne où peut s'effectuer un demi-tour
Radiotéléphonie	système permettant au contrôleur et au conducteur de communiquer oralement.
Régulation	processus d'adéquation en temps réel du TMT aux conditions objectives d'exploitation.
Retard	écart positif entre l'horaire réel et l'horaire commandé (retard subi) ou bien entre l'horaire commandé et l'horaire de base (retard commandé)
Retombe	action consistant à rééquilibrer les intervalles lors de la modification du nombre de départs
Service	travail à accomplir par un conducteur un jour donné.
Tableau de marche (TM)	document regroupant les données relatives à l'exploitation d'une ligne pour un type de journée et une période donnée. Il indique pour chaque voiture l'heure de sortie du dépôt, les heures de départ de chaque terminus, les heures de passage au point de relève si celui-ci est situé au milieu de la ligne, les heures éventuelles de garage, l'heure de sortie en ligne vers le dépôt et l'heure de rentrer au dépôt. Pour chaque course figure le numéro du service affecté. Le TMT comprend par ailleurs le tableau des services et le tableau des temps de parcours et des kilométrages pour les différentes missions.
Temps de battement (ou battement)	temps compris entre l'heure d'arrivée à un arrêt de la course amont et l'heure de départ de la course aval.
Temps de parcours	temps compris entre l'heure de départ et l'heure d'arrivée d'une course donnée.
Terminus	point caractéristique d'une ligne correspondant au début ou à la fin d'une mission
Transbordement	transfert des voyageurs d'un véhicule à un autre.
Véhicule entrant	véhicule ayant terminé son service et entrant au dépôt.
Véhicule sortant	véhicule sortant du dépôt pour commencer son service.

Abréviations

HLP Haut Le Pied

Procédure de rapatriement d'une rame sans voyageur et de manière autonome.

IA Intelligence Artificielle

Branche de recherche informatique dont le but est de concevoir des systèmes ayant un comportement intelligent.

OD Origine-Destination

Enquête menée par les pouvoirs publics afin de déterminer le flux passager de et vers les différentes stations d'un réseau urbain (Etude statistique)

PCC Poste de Contrôle Centralisé

Lieu de travail des régulateurs. Pour chaque ligne le PCC est composé d'un TCO et d'une console, offrant diverses sources d'informations, commandes et systèmes de communication.

RBC Raisonnement à Base de Cas

Raisonnement artificiel apparenté au raisonnement par analogie.

RATP Régie Autonome des Transports Parisiens

Entreprise de transport publique de Paris et de sa proche banlieue.

RER Réseau Express Régional

Système de transport ferré de grand gabarit desservant Paris et sa banlieue.

RTU Réseau de Transport Urbain

Appellation donnée généralement au réseau de transport collectif dans une agglomération

SAD Système d'Aide à la **D**écision

Système permettant de mettre en œuvre une ou plusieurs fonctions d'aide à la décision

SAE Système d'Aide à l'**E**xploitation

Dispositif électronique muni de capteurs pour le recueil d'informations à destination du PCC.

SBC Système à **B**ase de **C**onnaissances

Système expert de seconde génération proposant notamment une gestion simplifiée des connaissances grâce à une hiérarchisation de celles-ci.

SE Système **E**xpert

Programme informatique présentant une certaine capacité d'expertise, généralement fondée sur la logique propositionnelle.

SIAD Système **I**nteractif d'Aide à la **D**écision

L'acronyme SIAD, traduit l'interactivité élevée du système qu'implique le rôle actif de l'opérateur.

Introduction générale

1. Contexte de l'étude

La qualité des transports est un élément essentiel de la compétitivité. Si les exigences en matière de confort et de sécurité sont les aspects les plus préoccupants, c'est la fiabilité et la ponctualité du transport qui retiennent le plus souvent l'attention.

Les décideurs publics ont des préoccupations d'investissement et de congestion, ils doivent intégrer les problèmes de sécurité, d'efficacité du système de transport ou d'environnement.

Les transports en commun sont devenus de nos jours incontournables. Malgré une légère prédominance dans notre pays des véhicules particuliers (VP), ce mode de transport reste le plus privilégié dans les grandes et moyennes agglomérations. De ce fait, l'arrêt même momentané des transports en commun perturbe fortement les usagers et les privent d'accéder à leur destination. Il cause aussi une surélévation du taux de retard et d'absentéisme.

Dès le début de leur création, les compagnies de transport urbain ont cherché à gérer au mieux les incidents qui affectent le réseau de transport urbain.

De nos jours, un grand nombre de personnes sont amenés à se déplacer quotidiennement en utilisant les réseaux de transport urbain. L'arrêt même provisoire des transports (grève ou autre évènement) perturbe les usagers. La qualité des transports est un élément essentiel de la compétitivité.

Le développement progressif du trafic urbain incite les responsables des grandes villes à donner la priorité aux transports publics. Les transports ont connu ces dernières années une évolution dans leur mode de fonctionnement. Grâce à l'informatique, les possibilités de leur gestion ont été améliorées. Le progrès de la définition de l'offre de transport constitue le premier changement. L'objectif recherché est de mieux planifier l'offre de transport conformément à la répartition spatiale et temporelle de la demande. La seconde modification concerne la gestion des ressources en temps réel. Le but est alors de réajuster en temps réel l'offre en fonction des perturbations auxquelles est soumis un plan de transport. Ce plan doit être révisé si les données ont changé.



- La structure de la demande peut être modifiée dans l'espace et dans le temps ; par exemple suite à certains événements ou manifestations.
- L'offre de transport peut également être modifiée; par exemple un accident ou une panne momentanée d'un véhicule qui bloque la circulation sur une ligne donnée.

De plus, le plan initial (Tableau de Marche Théorique) est soumis à des aléas, en particulier les conditions de circulation. L'informatique et les moyens de communication ont permis d'améliorer la collecte des informations et leurs mise en forme, en temps réel pour une meilleure vue sur le système, d'où une meilleure gestion du réseau de transport urbain.

2. Problématique

La problématique réside dans le fait que la régulation du trafic est une tâche difficile, où chaque décision doit être prise en un temps limité en fonction de la situation en cours. C'est pourquoi, les exploitants des réseaux de transport essayent de trouver des solutions de plus en plus efficaces (Amélioration du temps de réponse, accès rapide et facile aux données). Ils rencontrent de nombreuses difficultés pour assurer un trafic urbain stable et respecter les règles en usage (règles de régulation, règles de sécurité, rôle commercial de l'entreprise...).

Pour mieux assurer la régulation, l'apparition des Systèmes d'Aide à l'Exploitation (SAE) a beaucoup aidé les exploitants (appelés aussi régulateurs). Les SAE permettent le suivi en temps réel de l'exploitation d'un réseau de transport urbain. La prise de décision nécessite de prendre en considération les informations les plus importantes. Un Système d'Aide à la Décision (SAD) est nécessaire afin d'aider les régulateurs à prendre des décisions pertinentes pour la régulation du trafic, en cas d'éventuelles perturbations. Plus généralement, le SAD a pour rôle d'assister le régulateur dans ses activités quotidiennes, sans prendre de décision à sa place. Le SAD pour la régulation ou Système d'Aide à la Régulation (SAR) est interactif, il doit pouvoir renseigner le régulateur sur des points précis en fournissant des informations ciblées et pertinentes.

Les entreprises de transport se sont dotées ces dernières années de vastes systèmes de traitement et de communication de l'information espérant, sans doute, régler les problèmes liés à la régulation.

3. Contribution

L'objet de cette étude est « Techniques de routage par automate cellulaire : adaptation à la régulation d'un réseau de transport urbain ». Le lecteur de cette thèse devra prendre en considération que le mot « routage » est utilisé dans le cadre du transport, à savoir indiqué à quelqu'un, la route à prendre (ce qui est le cas dans le cadre de certaines actions de régulation ou de la reconfiguration d'un réseau de transport urbain).

Le travail présenté dans cette thèse traite le problème de l'adaptation de l'offre aux conditions réelles d'exploitation. Le but étant d'étudier l'opportunité d'exploiter les automates cellulaires pour la régulation et la reconfiguration d'un réseau de transport urbain. Ensuite, d'intégrer les différents modules développés dans la plateforme de régulation SARRT [Bouamrane, 06].

Ce travail se veut un enrichissement du travail proposé dans [Bouamrane et Amrani, 07] en développant une nouvelle approche à base d'automate cellulaire proposée par [Atmani et Beldjillai, 07], et la considérer comme unique démarche pour le développement de l'ensemble des modules à intégrer dans la plateforme SARRT.

Il s'agit aussi d'expérimenter l'intégration d'un nouveau module assurant une nouvelle fonctionnalité identifiée en l'action de « changement d'itinéraire » qui permet la reconfiguration spatiale du réseau de transport urbain (modification de l'itinéraire commercial). Ensuite modifier la conception de deux autres modules existants par une approche basée sur les automates cellulaires. Ces deux modules sont le module SBC (Système à Base de Connaissances : moteur d'inférence classique) et le module RBC (Raisonnement à Base de Cas).

L'apport de ce travail réside dans le fait que ces trois modules exploitent un même modèle (un même noyau de la machine cellulaire) pour effectuer la régulation et la reconfiguration d'un réseau de transport urbain. Cette nouvelle approche à base d'automates cellulaires permet un gain substantiel en termes de temps de réponse ainsi qu'un gain dans le stockage des différentes solutions (Base de cas).

Ce travail contribue à l'avancement de la thématique de la régulation du trafic au sein d'un réseau de transport urbain modal (Bus), tout particulièrement le futur réseau de l'agglomération Oranaise. 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 de plus en plus rude et que les exploitants ont peu de moyen de prévoir l'apparition des phénomènes aléatoires qui affectent le trafic.

Le souci majeur étant l'amélioration de la qualité de service offert aux voyageurs dans leurs déplacements quotidiens. Les systèmes d'aide à la régulation sont dotés des outils les plus performants permettant d'assurer le diagnostic des perturbations et la proposition de solutions en un temps très limité.

L'architecture initiale de la plateforme SAART étant conservée, à savoir une coopération entre différents agents assurant la surveillance et la régulation du réseau de transport urbain, il s'agit dans ce travail de modifier certains outils de la régulation existants dans la plateforme SARRT en les dotant de cette approche cellulaire afin d'améliorer leur temps de réponse en gardant le même rôle. En ce sens, il y a recours:

- à la codification des différents paramètres exploités dans les algorithmes de régulation et exploité anciennement dans le moteur d'inférence classique afin d'assurer un passage vers un moteur d'inférence cellulaire.
- à l'amélioration de la phase d'indexation des solutions au niveau du système de Raisonnement à Base de Cas (RBC) en la modifiant par une indexation cellulaire.
- à l'enrichissement de la plateforme SARRT en intégrant une action particulière de régulation « changement d'itinéraire », inexistante à l'origine dans la plateforme.
- à l'évaluation formelle (formulation mathématique) des différentes actions de régulation (solutions) obtenus comparativement aux anciennes évaluations élaborées par les compagnies de transport.

L'utilisation de cette approche cellulaire se fait via une fonction de transition booléenne qui va assister le moteur d'inférence cellulaire (CIE) pour proposer, au régulateur, des actions de régulation incluant cette fois-ci, le changement d'itinéraire comme action de reconfiguration du réseau dans un temps limité.

Toute modification apportée au niveau des outils de la plateforme de régulation SARRT est accompagnée d'une étude comparative entre l'ancien et le nouveau modèle adopté.

4. Organisation de la thèse

La thèse est structurée en six chapitres.

Le premier chapitre intitulé, « **Introduction aux réseaux de transport urbain** », présente un travail de synthèse, basé sur les différents entretiens et lectures menés, afin d'extrapoler la liste des actions de régulation pour les modes de transport bus et tramway. En outre, les

différents types de systèmes de transport avec les configurations physique et horaire sont décrits. Le processus de planification ainsi que celui de la régulation y sont présentés, de même que les manœuvres (actions) de régulation pour un réseau de transport. Dans ce même chapitre, la notion d'aide à la décision est introduite en explicitant le rôle d'un SAD et celui de l'IA pour aider à la prise de décision. A cet effet, une panoplie d'outils dédiés à la régulation est succinctement décrite.

Le deuxième chapitre intitulé « **La machine cellulaire CASI** », propose dans un premier temps, les différentes études élaborées avec la machine cellulaire. Ensuite, il introduit les concepts de la machine cellulaire CASI, ses caractéristiques, son fonctionnement avec les différents composants et tout particulièrement le CIE, ainsi que le fonctionnement de ce dernier sur un exemple.

Le chapitre trois intitulé « **Modélisation d'un réseau de transport urbain** » propose, après une présentation des différents schémas d'un réseau de transport, l'approche de modélisation proposée en décrivant le modèle adopté.

Le chapitre 4 intitulé « **Le moteur d'inférence cellulaire pour la régulation d'un RTU** » introduit le passage d'une formulation algorithmique (procédurale) vers une formulation sous forme de règles cellulaires (CIE), montrer l'exploitation de la machine cellulaire pour la régulation d'un RTU, et illustre l'ensemble par un exemple de fonctionnement.

Le chapitre cinq, intitulé « **Apport de la machine cellulaire dans la régulation et la reconfiguration** » est scindé en deux parties. La première est consacrée à *l'Exploitation de l'indexation cellulaire pour un Raisonnement à Base de Cas*. Cette partie donne un bref aperçu sur les systèmes RBC en montrant l'intérêt de tels systèmes pour l'expérience et le retour d'expérience ainsi que pour la régulation d'un réseau de transport urbain. Par la suite, le RBC proposé est décrit, en montrant le processus de classification et de remémoration, ainsi que l'indexation cellulaire proposée pour l'amélioration du temps de réponse et le gain d'espace.

La deuxième partie est consacrée à la *Reconfiguration d'un réseau de transport urbain via la machine cellulaire*, où il est introduit les travaux antérieurs réalisés dans le cadre de la reconfiguration des RTU, la notion de reconfiguration, ainsi que l'existence d'itinéraire de déviation. Enfin, l'exploitation de la machine cellulaire pour la reconfiguration, y est présenté avec interprétation des résultats.

Le chapitre six intitulé « **Evaluation des Critères pour la prise de décision** », propose l'évaluation des décisions à travers la formulation mathématique des critères retenus lors de cette étude. Ce chapitre présente la problématique et la contribution des auteurs, l'architecture fonctionnelle de la plateforme de régulation SARRT, l'identification des critères d'évaluation des décisions (action de régulation), l'élaboration des décisions et leurs évaluations.

Cette thèse s'achève par la présentation d'une conclusion synthétisant les différents résultats obtenus et ouvrant des perspectives à la présente étude.

Chapitre 1

Introduction aux réseaux de transports urbains collectifs

1.1 Introduction

De nos jours, un grand nombre de personnes sont amenées à se déplacer quotidiennement en utilisant les réseaux de transport urbain. L'arrêt provisoire des transports (grève ou autres évènements) perturbe désormais les usagers. Cet arrêt provoque un absentéisme important sur les lieux de travail et la saturation du trafic routier dans les grandes agglomérations.

Nous pouvons classer les systèmes de transport en commun en plusieurs catégories :

- Les systèmes de transport non guidés (bus).
- Les systèmes de transport guidés; notamment le tramway et le métro sont plus ou moins dépendants de la circulation; car ils sont utilisés en site propre.
- Les systèmes hybrides comprennent une partie en site propre et une partie en circulation normale.

Ce chapitre est composé de plusieurs sections, la seconde concerne la configuration du RTU, la troisième le processus de planification, la quatrième l'exploitation du RTU, la cinquième des notions sur la régulation. Enfin, la sixième sur l'aide à la décision dans les RTU.

1.2 Configuration d'un réseau de transport urbain

Avant de décrire l'exploitation d'un réseau de transport urbain, nous présentons maintenant les constituants d'un tel réseau de transport [Laïchour, 02].

1.2.1. Configuration physique

Physiquement, un réseau de transport est constitué d'un ensemble de lignes et de dépôts.

Une ligne contient des arrêts. Parmi ces arrêts, on distingue plusieurs types :

- **Arrêts simples** : caractérisés par des horaires de départ et des horaires d'arrivées des véhicules.

- **Arrêts de régulation** : caractérisés en plus des arrêts simples, par la localisation des véhicules (arrêts équipés de capteurs) et la possibilité de commander des manœuvres de régulation.
- **Arrêts terminus** : caractérisés, en plus des arrêts de régulation, par des véhicules (vidés) des clients.
- **Arrêts nœud de correspondances** : un arrêt de correspondance est un endroit d'échange de voyageurs entre deux modes de transport à une date donnée. Donc, une correspondance est par définition spatio-temporelle [Laichour & al.01 c].

On trouve sur une ligne au moins deux arrêts terminus. Lorsqu'une ligne comporte plus que deux arrêts terminus, elle est dite à antennes. Les structures de ligne X ou Y forment des antennes. Certains arrêts d'une ligne offrent la possibilité de commander des demi-tours et des possibilités de garage de véhicules.

La liaison entre deux arrêts consécutifs est appelée « **inter arrêts** ».

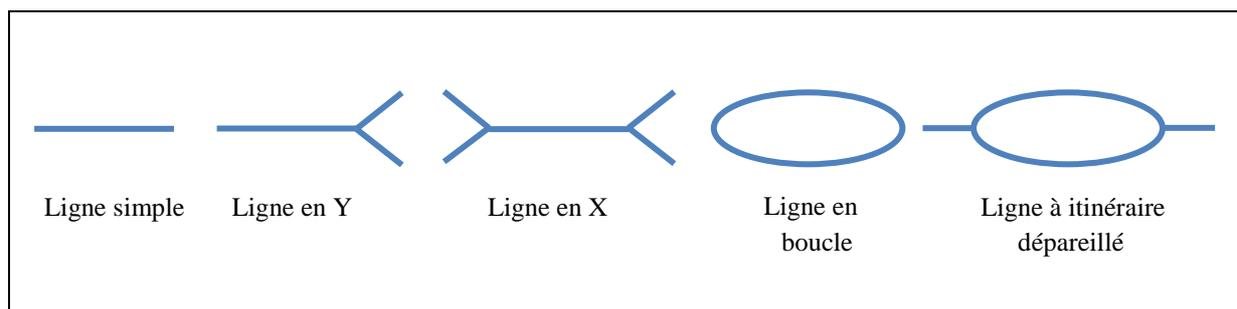


Figure 1.1 : Structures d'une ligne

Dans un réseau de transport urbain. On trouve deux types de dépôts :

- **Dépôt d'exploitation** : assure la préparation et le contrôle d'un service sur une ligne.
- **Dépôt de remisage** : assure l'affectation des conducteurs, l'entretien des véhicules et le remisage proprement dit qui permet d'acheminer un véhicule du dépôt à l'itinéraire commercial et réciproquement.

Logiquement, une ligne contient plusieurs itinéraires :

- Des itinéraires commerciaux.
- Des itinéraires spéciaux.

1.2.2. Configuration horaire

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

varie en cours de journée (**heures de pointe ou creuse**) et que l'offre change suivant le type de journée (**jour férié, vendredi, etc..**), de la période de l'année (**vacances scolaires, saison**), des conditions météorologiques et des contraintes d'exploitation (**nombre de véhicules...**). Afin de pouvoir définir l'offre d'une ligne, une représentation graphique de l'ensemble des parcours au cours d'une journée est nécessaire.

1.3 Processus de planification

Le processus de planification est effectué en général une fois par an et ne s'appuie que sur des prévisions de la demande et des durées des trajets entre les différents arrêts du réseau.

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

L'objectif du processus de planification est d'établir une offre prévisionnelle de transport qui s'ajusterait à la demande. 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 comme connues. A partir de ces données, des tableaux horaires sont établis et en résultent des courses qui correspondent aux temps et lieux d'arrivées et de départs. Le résultat de la planification se présente sous forme de listes de service pour les différents intervenants dans l'exploitation, et aussi pour le tableau de marche théorique « **TM** » [Laichour, 02].

1.4 Exploitation d'un réseau de transport urbain

L'exploitation d'une ligne dans un réseau de transport urbain se décompose en deux phases distinctes, figure (1.2).

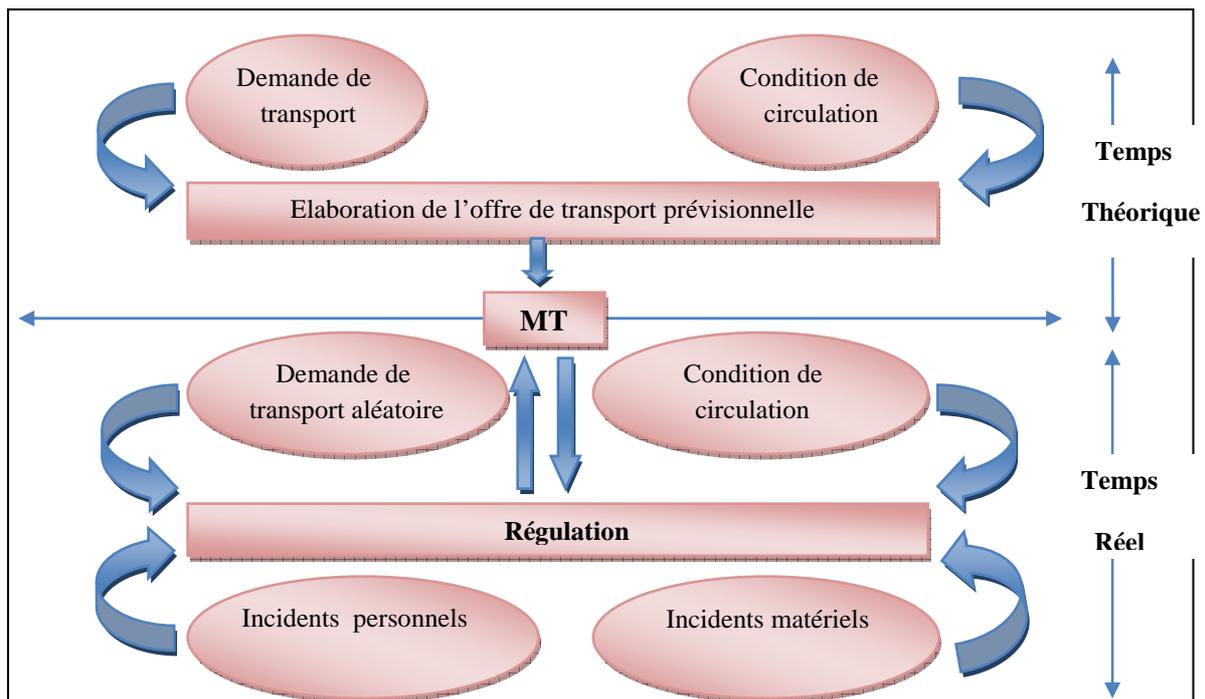


Figure 1.2: Construction et évaluation du tableau de marche

- Une phase de conception et d'élaboration du programme de production concrétisé par le tableau de marche de base « **TM de base** » qui est défini tout au long d'une journée d'exploitation donnée.
- Une phase d'adaptation du programme de production « **TM** » aux conditions réelles d'exploitation concrétisé par le « **TM commandé** » qui est perpétuellement actualisé. Les données issues de l'exploitation en temps réel viennent alimenter en permanence un « **TM** » ainsi susceptible de se traduire par des modifications du tableau de base.

1.4.1. L'offre de service

L'offre de service sur une ligne est composée de courses reliant un terminus de départ à un terminus d'arrivée et desservant des arrêts selon un horaire. Une course est une mission effectuée par un véhicule :

- Entre deux terminus extrêmes (**course pleine**).
- Entre un terminus extrême et un arrêt (**course partielle**).
- Sans desserte des arrêts entre l'arrêt de départ et l'arrêt d'arrivée (**course HLP : haut le pied**).
- L'emprunt des itinéraires spéciaux (**course spéciale**).

Sur une ligne donnée, on trouve plusieurs types de courses selon les arrêts desservis, l'itinéraire emprunté ou les consignes d'exploitation.

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

1.4.2. Confection des horaires

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

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

1.5 Perturbation et régulation

1.5.1. Perturbation

Les écarts entre la réalité et les objectifs de la qualité de service résultent de différents types de perturbations qui peuvent affecter le fonctionnement correct de la ligne.

Les perturbations pour véhicules (bus) peuvent être classées selon leurs sources. Le dysfonctionnement peut être dû à un problème interne ou externe.

Les différentes perturbations sont :

- Des perturbations liées aux « **conditions de circulation** » et se répercutant sur les temps de parcours (retards)
- Des perturbations dues aux variations dans la configuration de la « **demande de transport** ».
- Des perturbations liées aux « **matériels roulants** » (voitures indisponibles ...).

- Des perturbations causées par le « **personnel conducteur** » (absent de personnel à la relève ...).
- Des perturbations liées aux erreurs dans « **l'application du tableau de marche** ».

1.5.2. Régulation

1.5.2.1. Définitions

La régulation est un ensemble de méthodes permettant de se rapprocher au plus près du « **TM** » initial, malgré les perturbations, on se rend compte que la régulation est une batterie de mesures ou de méthodes (actions de régulation) qui essaient de remettre de l'ordre dans un réseau perturbé afin de se rapprocher de ce qui a été annoncé aux voyageurs.

Le fonctionnement en temps réel d'une ligne est caractérisé par un système qui peut être schématisé selon la figure (1.3) [Rizzi et Guichoux, 97] :

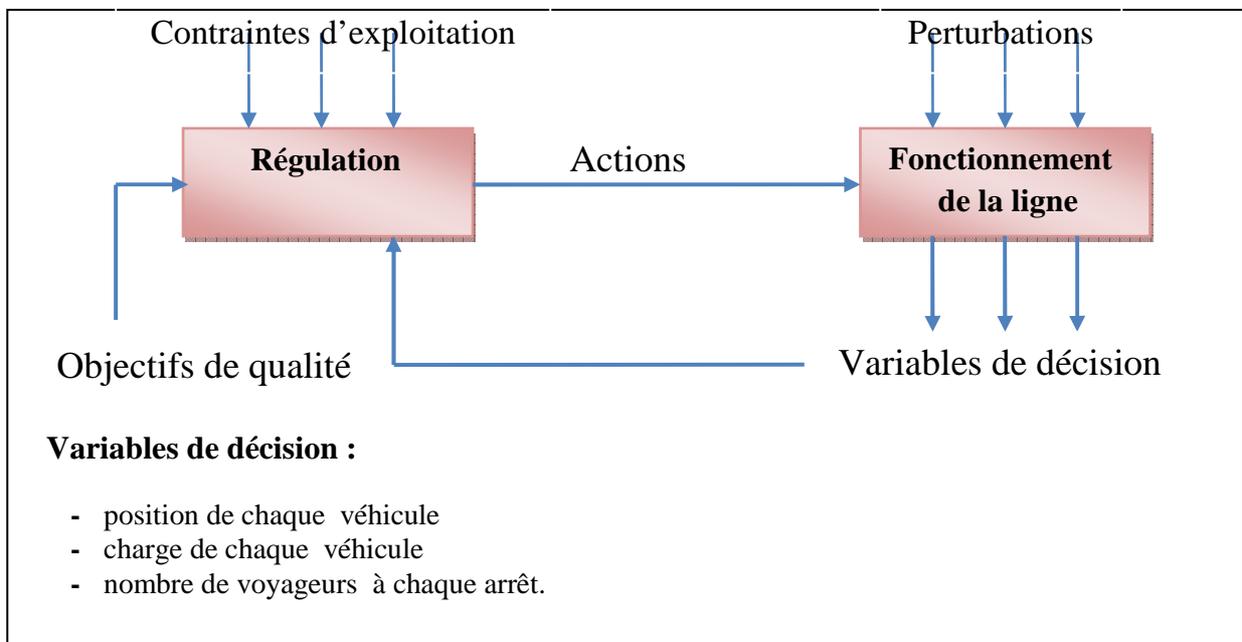


Figure 1.3: Fonctionnement d'une ligne en temps réel

Ce système se compose de deux éléments :

- Le sous système de fonctionnement de la ligne, dont l'état à un instant donné est décrit par un ensemble de variables (position et charge des voitures, voyageurs en attente aux arrêts,...)
- Le sous système de régulation qui analyse les écarts existants entre les objectifs de qualité de services et la réalité, et qui met en œuvre des actions susceptibles de les combler, compte tenu des contraintes liées à l'exploitation (niveau des moyens disponibles et règles d'utilisation de ces moyens).

1.5.2.2 Objectif de la régulation

L'objectif de régulation consiste à minimiser l'écart entre les valeurs mesurées et celles déterminées préalablement en mode de fonctionnement non perturbé et cela principalement en ce qui concerne la position et la vitesse.

Le processus de régulation contient différentes tâches allant de la détection de la perturbation jusqu'à la prise de décision, figure (1.4). Ces tâches sont regroupées 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. La phase de décision est entamée par le régulateur quand il doit choisir les mesures appropriées de régulation en tenant compte des contraintes d'exploitation, de la nature des perturbations, ainsi que des critères qui conviennent aux objectifs d'exploitation.

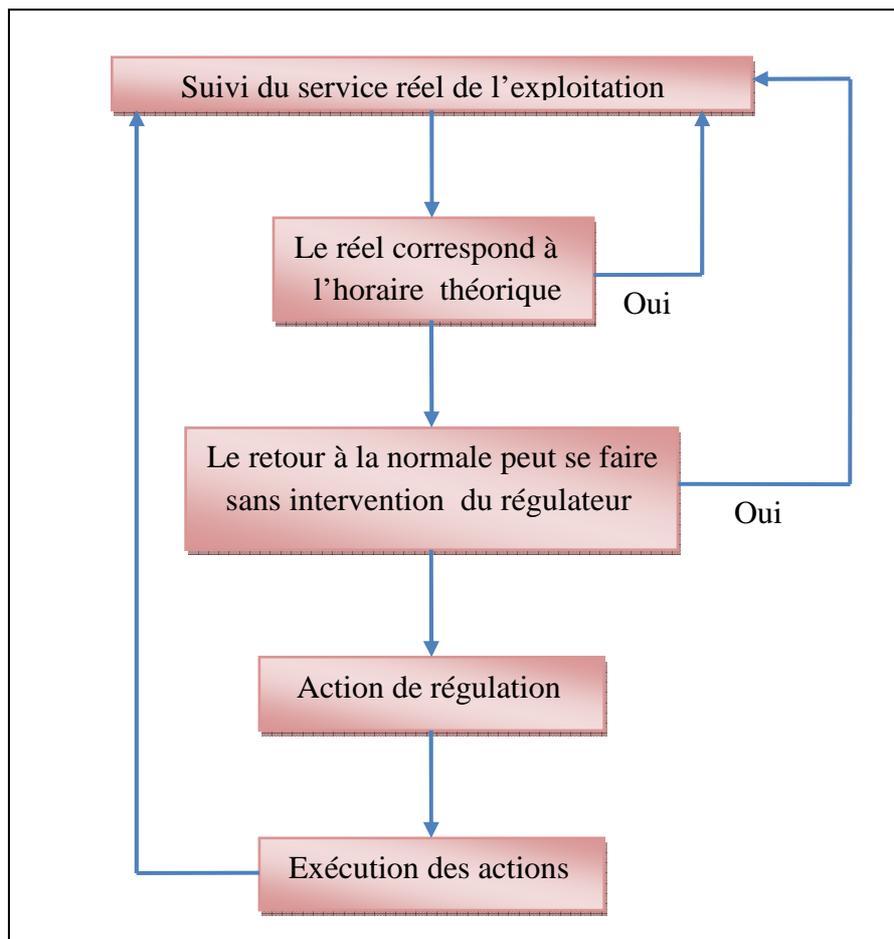


Figure 1.4: Les étapes du processus de régulation

- **Phase de diagnostic** : La gestion de l'exploitation des transports urbains a traversé plusieurs phases de développement [Khorovitch et al, 91]. A l'origine, l'exploitation commerciale du transport urbain était largement décentralisée. De ce fait, des agents de surveillance étaient placés à certains arrêts stratégiques du réseau afin d'observer les passages réels des bus aux temps convenus dans le « **TM initial** ».

La principale caractéristique de la deuxième phase du développement de l'aide à l'exploitation réside dans son utilisation de la radiophonie. L'aide à l'exploitation centralisée et la surveillance ont dès lors pris de plus en plus d'importance.

Ainsi, le conducteur pouvait communiquer directement au poste central toute perturbation survenant sur le trajet ou toute irrégularité du service. Par radio, les régulateurs peuvent obtenir une vue globale du réseau et de la localisation des véhicules ainsi que leur situation à partir du « **PCC** » (Poste Central de Commande).

Comme l'a montré la pratique, le fort accroissement des tâches du transport urbain, surtout aux heures de pointes, surcharge les régulateurs qui ne peuvent presque plus garantir le déroulement correct de l'exploitation par la seule radiophonie. Dès lors, les entreprises de transport urbain ont envisagé de nouvelles améliorations possibles de la gestion de l'exploitation. L'application de systèmes informatiques très puissants et la transmission par radio des données pour échanger des informations conducteur/régulateur sont bien vite considérées comme une solution possible pour gérer entièrement l'exploitation. C'est le point de départ de la mise en œuvre des « **SAE** » informatisés. Cela constitue la troisième phase du développement de la gestion de l'exploitation dans les transports urbains. L'étape actuelle (la quatrième phase) consiste à améliorer ces « **SAE** » en intégrant un Système d'Aide à la régulation « **SAR** ». Ce dernier doit proposer des solutions aux régulateurs, en particulier, en cas de perturbations.

Le « **SAE** » est un dispositif électronique 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 en cas de perturbation. Le « **SAE** » traite deux types d'informations [Fayech, 03] :

- Des informations théoriques qui sont contenues dans les « **TM** » (processus de planification)
- Des informations temps réel concernant l'état du réseau (la localisation des véhicules, leurs niveaux d'occupation, leur itinéraire, leurs horaires de passage réels, la communication avec le chauffeur, etc..).

Ainsi, les fonctionnalités d'un « **SAE** » sont :

- Saisie de la localisation permanente des véhicules.
- Saisie de l'occupation des véhicules.
- Echange d'information 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.

Ces fonctionnalités dépendent en fait de la génération du « **SAE** » mis en exploitation. Le « **SAE** » en fonction des écarts détectés entre le « **TM** » initial et les conditions réelles du réseau, peut déclencher plusieurs alarmes :

- Alarme de non respect des correspondances.
- Alarme d'avance/ retard.
- Alarme de train véhicules.
- Alarme de prochain départ non assuré.

• **Phase de décision** : La régulation en temps réel d'un réseau de transport urbain fait intervenir différents acteurs :

- Le régulateur, qui possède une vision globale du fonctionnement de la ligne dans le « **PCC** ».
- Les conducteurs qui représentent les capteurs de la réalité et exécutent les actions de régulation.
- Le chef de lignes, intervenant sur l'itinéraire de la ligne pour aider le régulateur à obtenir un complément d'information.

Il faut ajouter à cela, les graphiqueurs qui interviennent en amont du travail du régulateur en créant les horaires.

Dans cette panoplie d'intervenants, la responsabilité revient toujours au régulateur vers lequel convergent tous les canaux d'information à l'aide du « **SAE** ». Les autres intervenants ne peuvent décider qu'après accord du régulateur compte tenu qu'ils ne disposent que d'une vision partielle des événements sur le réseau.

Le travail du régulateur est caractérisé essentiellement par la nécessité d'anticiper l'évolution des perturbations ou la capacité de réagir efficacement à celles-ci et leurs conséquences sur le fonctionnement de la ligne. Plus le régulateur agit tôt, mieux il peut prévenir la dégradation du système qui tend à s'éloigner de l'optimum. De cette capacité d'anticipation dépend la qualité de la régulation, en fonction de :

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

1.5.3. Les logiques de la régulation

Dans son travail, le régulateur est amené à appliquer des actions de régulation en respectant des objectifs d'exploitation. Ces objectifs d'exploitation sont différents d'un réseau de transport urbain à un autre. Mais nous pouvons généraliser les objectifs d'exploitation d'une ligne, d'après les études réalisées à la RATP, à quatre logiques différentes liées à la configuration de la demande de transport (la logique d'enlèvement de la charge, la logique de régularité, la logique de ponctualité et la logique de correspondance). A ces logiques, il faut ajouter la gestion du personnel qui agit comme une contrainte d'exploitation.

- **La logique d'enlèvement de la charge :**

C'est la logique dominante, elle s'applique en premier pour répondre ponctuellement à une forte demande telle qu'aux heures de pointe du matin, l'après-midi, sortie d'école, afin de minimiser le nombre de voyageurs en attente. L'objectif est d'enlever les voyageurs sans en laisser aux arrêts.

- **La logique de régularité :**

Elle s'applique lorsque l'arrivée des voyageurs aux arrêts s'effectue indépendamment des passages des véhicules (bus,..). Cette logique permet de satisfaire deux objectifs :

- Minimiser l'attente des voyageurs aux arrêts.
- Maximiser le confort des voyageurs à bord des véhicules.

- **La logique de ponctualité :**

S'applique en premier lieu sur les lignes à horaire. On considère en générale qu'au-delà d'un intervalle de temps de 12 minutes, on est en logique de ponctualité, dans la mesure où l'arrivée des voyageurs aux arrêts s'effectue en fonction des horaires programmés et annoncés au public, autrement dit on est en logique de régularité.

- **La logique de correspondance :**

Elle est présente lorsqu'il existe des échanges de voyageurs entre deux lignes du réseau ou bien entre une ligne et un autre mode de transport indépendant de l'exploitation situé en amont ou en aval de

Celle-ci. On cherche alors à minimiser le temps de correspondance des voyageurs en transit.

- **Contrainte de gestion du personnel :**

Cette logique joue un rôle essentiel dans les périodes de la journée, elle consiste à respecter les conditions réglementaires de travail des conducteurs et à répartir au mieux le temps de travail total sur l'ensemble des services conducteur.

Ces logiques n'opèrent jamais de façon univoque, mais interfèrent entres-elles, au travers de priorité qui se modifient tout au long de la journée et selon les circonstances.

1.5.4. Les contraintes de la régulation

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

- **Demande de transport :**

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

- **Conditions de circulation :**

Les conditions de circulation influent sur les actions de régulation. De nombreux phénomènes nuisent à la fluidité du trafic et entraînent un allongement important des temps de parcours : livraison, embouteillage, carrefours, feux de signalisation, mauvaise synchronisation des feux, stationnement illicite, sortie d'établissement scolaire...etc.

- **Topographie de la ligne :**

Les variables à prendre en compte par le régulateur pour la configuration de la ligne sont : l'existence du point de retournement, d'itinéraire de déviation, d'itinéraire de HLP, d'antennes, de tronçons communs avec d'autres lignes ainsi que la longueur de la ligne.

- **Structure d'exploitation :**

La façon dont est organisée l'exploitation de la ligne a des conséquences importantes sur le travail du régulateur tel que : le nombre de dépôts de remisage, la situation du dépôt sur la ligne, la situation du point de relève sur la ligne, la possibilité de garage, ...etc.

1.5.5. Les manœuvres de la régulation

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

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

1.5.6. Les actions de régulation

A fin d'appliquer les décisions prises, le régulateur dispose d'algorithmes et d'action de régulation qu'il utilise dans la régulation de son réseau bus. La liste de ses actions est :

- Le direct en ligne.
- Le demi-tour en ligne.
- Le demi-tour avec échange de conducteurs et de véhicules.
- Dépassement et service en descente uniquement.
- Départ retardé au terminus.
- Echange de conducteurs et de véhicules.
- Remise à l'heure par réserve est disponible.
- Régulations en terminus.
- Raccourci.
- Régulation en ligne.
- La régulation en cascade.
- Haut le pied hors ligne.

1.6 Aide à la décision

La multitude d'information à gérer, à manipuler et à surveiller dans les systèmes de supervision est souvent un obstacle au maintien de l'attention de l'opérateur sur les éléments essentiels. Les apports des « **SAD** » pour ces systèmes sont de deux ordres :

- Fournir une aide à la maintenance pour contrôler et détecter des déviations par rapport à la normale et en informer l'opérateur.

- Fournir une aide à la conduite (régulation) par des outils de simulation ou de commande directe [Bouamrane et al, 05].

La conception de ces systèmes est partie de l'analyse des processus cognitifs sous-jacents à la prise de décision par l'opérateur. Dans sa tâche de prise de décision, l'opérateur se fie à ce qu'il connaît de l'état du système [Jovic, 92].

La détection et le suivi d'une situation donnée dépendent en grande partie de la perception de l'opérateur et de sa rapidité de réaction, qui est souvent affaiblie par l'avalanche des informations reçues et par les problèmes de choix d'outils et de documents disponibles. De plus, les bonnes synthèses d'information ne sont pas toujours disponibles car elles peuvent ne pas avoir été prévues lors de la conception du système de supervision. En effet, tous les cas de figure de situations possibles sont nombreux et non prévisibles au moment de la conception de système de prévision.

Selon [Fuchs, 97], les objectifs attendus d'un « SAD » dans le contexte de la supervision « industrielle » est d'analyser une situation donnée et d'établir la liste des entités ayant un rôle à jouer (ou ayant contribué) dans le contexte de la situation en cours.

Concernant la supervision d'un réseau de transport urbain, Fayech [Fayech, 03] a identifié un ensemble de questions à se poser liées à la nature des perturbations et aux manœuvres de régulation.

Ces questions se résument comme suit :

- 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 ?
- Quelles mesures choisir ?
- Selon quel(s) critère(s) faut-il faire ce choix ?
- Comment évaluer pour pouvoir décider ?

A certaines périodes de la journée (les heures de pointes en particulier) les régulateurs exécutent en temps réel ou différé, des tâches difficiles (raisonnement, réflexion, décision) sur plusieurs incidents à la fois, et sur plusieurs lignes. Ces constats concernant le travail du régulateur en « PCC » montrent la nécessité de concevoir un « SAD » pour assister le régulateur dans sa tâche.

La possibilité offerte au régulateur de construire sa solution est une démarche originale. En effet, on assure, en cela au régulateur une réelle interactivité avec le «**SAR**», et par conséquent, on lui permet de proposer une solution, quand celle-ci n'est pas disponible dans la base de cas. Ou que celle qui est proposée ne le satisfait pas [Bouamrane et al, 05].

1.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les informations nécessaires pour cerner les concepts relatifs aux réseaux de transports urbains, leurs configurations ainsi que le principe de régulation. Nous avons effectué en ce sens une description du réseau en mettant l'accent sur son lien avec les perturbations, les différents intervenants ainsi que les actions à entreprendre. Nous avons montré aussi l'effort de l'aide à la décision pour la régulation.

Nous nous intéressons dans le chapitre suivant à une approche utilisée dans le cadre de cette thèse pour développer un système d'aide à la décision pour la régulation à savoir la machine cellulaire.

Chapitre 2

La machine cellulaire CASI

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'outil essentiel exploité dans cette étude, et qui est au cours de l'ensemble des contributions qui seront proposées à savoir le moteur d'inférence cellulaire (**Cellular Inference Engine**) de CASI (**Cellular Automaton for Symbolic Induction**) [Atmani et Beldjilali, 07]. Avant d'entamer la partie conception et analyse de la machine cellulaire et du moteur d'inférence cellulaire par une description formelle, et le détail de son principe de fonctionnement tout en sachant qu'il est basé sur les notions de base du système expert, nous introduirons un état de l'art sur les différents travaux réalisés avec CASI, un rappel sur le fonctionnement d'un système expert classique, les concepts de base du CIE, son architecture, son voisinage, ainsi que son mode de représentation des connaissances.

2.2 Quelques travaux réalisés avec CASI

Différents travaux abordant différents domaines ont été réalisés exploitant la machine cellulaire CASI. Nous citons ses travaux dans l'ordre de leurs publications.

2.2.1 Cartographie des connaissances guidée par la fouille des données

Le travail proposé [Menaouer et Atmani, 09] présente une nouvelle approche de cartographie des connaissances stratégique/métiers guidée par apprentissage automatique en vue de définir la stratégie de gestion des connaissances à engager. La démarche expérimentée s'appuie sur une nouvelle méthode cellulaire d'extraction de règles à partir des données nommée CASI. La première étape consiste en la préparation d'une cartographie des domaines de connaissances stratégique et métiers par le modèle graphique. La deuxième étape à transformer le graphe de cette cartographie sous forme de partitions, en respectant le principe booléen de la machine cellulaire CASI. Le but, après une modélisation booléenne de la cartographie des domaines de connaissances, est double : d'une part affiner la cartographie par une fouille de donnée

orchestrée par CASI, et d'autre part réduire la complexité de stockage, ainsi que le temps de calcul. Seule la modélisation booléenne de la cartographie est décrite dans ce papier.

En adoptant la modélisation booléenne, la machine cellulaire CASI optimise la représentation de la carte. Le résultat du modèle ainsi obtenu, est affiné par un processus d'apprentissage automatique symbolique à base de graphe d'induction. Ce raffinement se fait par l'automate cellulaire CIE qui va assister SIPINA [Sipina, 12] dans le processus d'extraction de nouvelles connaissances tacites à partir de cas pratiques (connaissances explicites) et assurer, par la suite, une contribution dans le processus général de création et de transfert des connaissances.

2.2.2 Fouille de données biologiques : vers une représentation booléenne des règles d'association.

L'avènement des biotechnologies nouvelles a permis, au cours des dernières années, d'accumuler des données sur les génomes des agents pathogènes épidémiologiques. Par contre l'exploitation des données génomiques n'as pas suivi le rythme des découvertes, alors la fouille de données biologiques, particulièrement à caractère épidémiologique s'est imposée d'elle-même afin d'aider à trouver des éléments de réponse aux questions que se pose l'épidémiologiste concernant des pathologies particulières.

D'où, la problématique abordée par cette étude qui est la fouille de données biologiques du Mycobacterium Tuberculosis responsable de la tuberculose.

Les auteurs [Mansoul et Atmani, 09] proposent un processus de fouille de données assez novateur pour générer des connaissances qui vont êtres profitables et exploitables à deux niveaux :

- Profitables au spécialiste du domaine, à travers l'extraction de motifs en particulier les règles d'association qui aident à mieux comprendre la pathologie.
- Ensuite, ces règles d'association extraites sont modélisées par le principe booléen adopté par la machine cellulaire CASI (Cellular Automaton for Symbolic Induction).

Le but de cette modélisation par le principe booléen étant de réduire la complexité de stockage et le temps de réponse.

L'étude se voulait être assez novatrice, dans la mesure où nous elle a exploité des techniques prouvées de la machine cellulaire CASI [Atmani et Beldjilali, 07] [Abdelouahab et Atmani, 08] [Benamina et Atmani, 08], combinées à une fouille de données. De ce fait, deux objectifs ont guidés les auteurs dans la proposition d'un automate cellulaire pour l'optimisation, la

génération, la représentation et l'utilisation d'une base de règles d'association. En effet, le premier c'est d'avoir une base de règles optimisée et des temps de traitements assez réduits grâce aux principes de représentation cellulaire, et le deuxième c'est d'apporter une contribution à la construction des systèmes à base de connaissances en adoptant une nouvelle technique cellulaire. Ainsi, les auteurs citent les avantages de leur méthode basée sur la machine cellulaire CASI qui peuvent être récapitulés comme suit :

- Un prétraitement simple et minimal de la base de règles d'association, pour sa transformation en matrice binaire selon le principe de couches cellulaires.
- La facilité d'implémentation des fonctions de transitions δ_{fait} et $\delta_{règle}$ qui sont de basses complexités, efficaces et robustes et concernent des valeurs extrêmes, et bien adaptées aux situations avec beaucoup d'attributs.
- La possibilité de description de l'état initial mais aussi de classifier en vu de produire des résultats simples à être insérés et utilisés à nouveau par un système expert classique, grâce notamment au système de prédiction de CASI, composé d'un ensemble de fonctions de transitions et de règles de production simples, et aussi à une facilité de transformation et de simplification des règles à travers la matrice d'incidence R_E .

2.2.3 Système d'assistance aux recherches épidémiologiques et de surveillance des maladies : Modélisation Booléenne

La contribution des auteurs [Sabri et Atmani, 10] concernent une contribution dans le domaine de la santé publique et de l'épidémiologie à travers la conception d'un Système d'Assistance à la Recherche Epidémiologique et de Surveillance des Maladies (SARESM). SARESM apporte aux différents acteurs de la santé publique une assistance à l'établissement de politiques sanitaires, notamment en matière de planification d'acquisition des produits pharmaceutiques, selon la distribution géographique de leur utilisation. Cette distribution géographique est établie par rapport à une mesure pathologique. La contribution dans ce domaine est de fournir des modèles de prédiction des maladies chroniques. Ces modèles sont basés sur des techniques de fouille de données, en l'occurrence une nouvelle approche de modélisation booléenne des graphes d'induction, inspirée du principe de la machine CASI.

Le but, après une modélisation booléenne des règles de prédiction épidémiologique, est double : d'une part affiner le suivi par une fouille de donnée orchestrée par CASI, et d'autre part réduire la complexité de gestion des connaissances, ainsi que le temps de réponse.

2.2.4 CARI-BKBS : Un système booléen hybride d'extraction et de gestion de connaissances

CARI-BKBS [Benamina et Atmani, 08] est un système booléen d'extraction et de gestion des connaissances dédié à la fouille de données. CARI-BKBS permet, à partir d'une base de données (cas pratiques), de faire *coopérer* un système booléen d'extraction automatique de règles et un système à base de connaissances booléennes pour la construction d'un modèle de prédiction. Le résultat de la phase d'apprentissage automatique symbolique à base d'arbre de décision est raffiné par un processus cellulaire : système CARI (*Cellular Automaton for Rules Induction*). Ce raffinement se fait par l'automate cellulaire qui va assister les méthodes d'induction symbolique à l'optimisation de l'arbre et assurer, par la suite, la représentation et la génération des règles de production sous forme booléenne avant d'entamer la phase de validation par un *Système à Base de Connaissance Booléenne* : système BKBS (*Boolean Knowledge Bases Systems*). CARI-BKBS s'adresse à deux types de publics. D'un côté, il exploite l'environnement de fouille de données offert par la plate forme TANAGRA qui le rend ainsi accessible à une utilisation de type «chargé d'études» sur des données réelles. De l'autre, du fait que les règles générées sont conjonctives, il se prête à une utilisation directe pour une acquisition automatique dans des systèmes experts cellulaires.

2.2.5 Conception d'une Plateforme Cellulaire Open Source d'Extraction et de Gestion des Connaissances : WS4KDM_1.0

Les auteurs [Kadem et Atmani, 10] présentent dans ce papier la conception et la réalisation d'une nouvelle plateforme open source qui regroupe plusieurs services web dédiés à l'Extraction et la Gestion des Connaissances (WS4KDM_1.0).

Les techniques de fouille de données de la plateforme WS4KDM_1.0 qui sont à base de graphe d'induction utilisent une nouvelle technique de modélisation booléenne nommée CASI. Le but, après une modélisation booléenne des règles de classification, est double : d'une part affiner le processus d'Extraction de Règles à partir de Données par une fouille de

donnée orchestrée par CASI, et d'autre part réduire la complexité de stockage, ainsi que le temps de réponse.

2.2.6 Un Automate Cellulaire pour la Détection de Spam

Dans le contexte du filtrage de courriels indésirables (appelé aussi spam), les auteurs [Barigou et al, 11] proposent l'utilisation d'une classification supervisée booléenne à base d'automate cellulaire. Ils examinent par des expériences sur le corpus LingSpam, la performance de cette approche en variant les méthodes de prétraitement du corpus : utilisation d'une stop-liste, racinisation, et sélection des termes.

Le volume croissant de courriels non sollicités (appelé aussi pourriel ou spam) a engendré un besoin de filtres anti-spam fiables. L'utilisation d'un classificateur basé sur les techniques d'apprentissage supervisé pour filtrer automatiquement les courriels spam a attiré l'attention de nombreux chercheurs.

Dans ce contexte, les auteurs proposent une nouvelle approche pour le filtrage de spam : classification à base d'automate cellulaire. Cette méthode permet, à partir d'une base de courriels électroniques, de faire coopérer un graphe d'induction et un Moteur d'Inférence Cellulaire (MIC¹) pour la construction d'un modèle de filtrage de spam. La représentation vectorielle des courriels est affinée par un processus d'apprentissage automatique symbolique à base de graphe d'induction (Méthode SIPINA). Ce raffinement se fait par une modélisation booléenne qui va assister SIPINA à l'optimisation du graphe d'induction et assurer, par la suite, la représentation et la génération des règles de classification sous formes conjonctives avant d'enclencher la phase de filtrage par le MIC. Pour évaluer les performances de cette nouvelle méthode, nous menons une série d'expériences sur le corpus LingSpam.

2.2.7 Synthèse sur les différents travaux

A travers les différents travaux présentés ci-dessus, nous remarquons que la machine cellulaire CASI a été exploitée dans différents domaines, cela va de la cartographie des connaissances à la détection des spam. Chacun de ces travaux a apporté une solution à une situation précise dans un environnement déterminé. Toutefois, la machine cellulaire CASI n'a jamais été exploitée dans des travaux en relation avec le domaine du transport urbain collectif.

¹ MIC : CIE (Cellular Inference Engine) en Anglais

A cet effet, la suite de cette étude est consacrée à identifier la possibilité d'adapter cette machine à la régulation et la reconfiguration d'un réseau de transport urbain, et à l'exploiter pour intégrer une plateforme de régulation SARRT [Bouamrane et Amrani, 07] dans le but d'apporter des améliorations aux modules déjà existants.

Dans ce qui suit, nous présentons l'architecture et le fonctionnement d'un système expert classique, ensuite l'architecture et le fonctionnement de la machine cellulaire CASI, tout particulièrement le moteur d'inférence cellulaire (CIE).

2.3. Principe de fonctionnement du Moteur d'inférence classique

2.3.1 Définition et Architecture d'un système expert

Un système expert (SE) est un système informatique capable de simuler le raisonnement d'un expert humain pour résoudre des problèmes dans un domaine de nature symbolique par opposition à l'algorithmique [Farreny, 87] [Farreny, 92] [Feigenbaum, 93].

Un SE est en général composé des modules suivants, figure (2.1) :

- Une base de connaissance
- Un moteur d'inférence
- Un module d'Acquisition de connaissances
- Une interface de dialogue

2.3.1.1 La base de connaissance

Ce module est composé de connaissances déductives représentant d'une part l'expertise d'un domaine particulier et d'autre part de connaissances factuelles décrivant le problème que le système doit résoudre par l'intermédiaire d'un moteur d'inférence (MI).

Les connaissances factuelles sont des connaissances non déductibles, introduites par l'utilisateur du système dans la base des faits au début et en cours d'une session.

Les connaissances déductives sont celles regroupées dans la base de connaissances elles permettent de déduire de nouvelles connaissances en fonction des connaissances factuelles.

En général, la base de connaissances est répartie en une base de faits et une base de règles. Cette répartition est purement logique.

- **Base de faits (BF)** : elle contient des connaissances représentant des états considérés comme prouvés. C'est la mémoire de travail du SE.
- **Base de règle (BR)** : elle contient des connaissances déductives ou règles, de type opératoire décrivant le savoir faire sur le domaine.

2.3.1.2 Le moteur d'inférences

C'est un programme qui permet de simuler les mécanismes inductifs ou déductifs du SE, donc de compléter l'étude du cas étudié.

Il élabore des raisonnements à partir de la BR et se sert également de la BF pour vérifier certaines hypothèses et peut éventuellement l'enrichir de nouveaux faits à la suite du raisonnement de l'expert. [Farreny, 87].

2.3.1.3 Module d'acquisition des connaissances

C'est un outil précieux qui aide le concepteur lors de l'élaboration de la BC (constitution, mise au point, consultation, mise à jour et vérification de la cohérence de la BC).

2.3.1.4 Une interface de dialogue

Qui permet le dialogue entre l'utilisateur et le système.

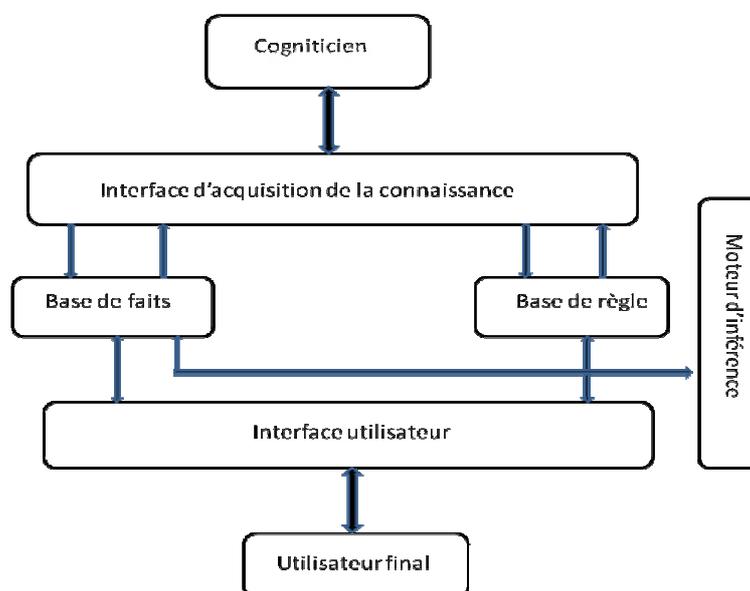


Figure 2.1 : Architecture d'un système expert

2.3.2 Représentation des connaissances

Les propositions originellement en langage naturel, doivent être converties dans une syntaxe bien précise, pouvant donner ainsi l'origine des règles de production.

Une règle de production est un quantum de connaissance, déclaratif et autonome de la forme :

SI prémisse **ALORS** conclusions

Où **prémisse** est une conjonction de plusieurs conditions élémentaires (faits) et **Conclusion** est une action à envisager, si la situation décrite par la partie antécédente de la règle est vérifiée. Cette partie indique le(s) fait(s) qui peuvent être déduits si la règle est déclenchée.

2.3.3 Principe de fonctionnement du moteur d'inférences

2.3.3.1 Cycle de base d'un moteur d'inférences

1-phase d'évaluation

La phase d'évaluation des connaissances s'effectue en trois étapes :

- Sélection : elle consiste à dégager un ensemble minimal de faits et de règles méritant d'être comparés lors de l'étape de filtrage.
- Filtrage : le MI compare la partie déclencheuse des règles sélectionnées avec les faits de la BF pour déterminer l'ensemble des règles applicables.
- Résolution de conflits : elle se concrétise par le choix de la règle à déclencher.

2- phase d'exécution

La phase d'exécution consiste à appliquer (activer) la règle obtenue lors de l'étape précédente ; cette action permet généralement d'ajouter un ou plusieurs faits à la BF. Dans le cas où ces règles sont valides, on peut considérer deux types de moteur : le moteur à régimes irrévocables et le moteur à régime par tentatives. [Farreny, 92].

2.3.3.2 Les différents modes de raisonnement

1. Le chaînage avant :

Il correspond au raisonnement déductif, le moteur part des faits établis et utilise les règles applicables. On aboutit à d'autres faits qui permettent de déclencher de nouvelles règles. Il n'est pas nécessaire de fixer un but pour le faire fonctionner. Il existe trois causes d'arrêt :

- Toutes les règles ont été déclenchées sans résultat ;

- Il n'y a plus de règle applicable ;
- On a obtenu le résultat désiré.

2. Le chaînage arrière :

Encore appelé remontée ou retour arrière, il correspond au raisonnement inductif. Le moteur part du but à démontrer et recherche une règle ayant le but comme conclusion. Si les prémisses de la règle appartiennent à la base de faits, alors le but est vérifié. Si l'une des prémisses n'appartient pas à la BF, elle devient un nouveau but, le moteur alors, part à la recherche de nouvelles règles applicables et ainsi de suite.

3. Le chaînage mixte :

Avec ce type de chaînage, la BR est utilisée soit en avant, soit en arrière, les conditions de déclenchement des règles peuvent porter simultanément sur des faits établis ou à établir.

4. Le Chaînage bidirectionnel :

Pour un même problème, on utilise tantôt des règles en avant, tantôt des règles en arrière; mais non des règles mixtes.

2.4 La machine cellulaire

Nous commencerons par introduire la notion d'automate cellulaire avant de passer à la description de la machine cellulaire CASI avec ses différents modules et fonctionnalités.

2.4.1 Définition d'un automate cellulaire

Un automate cellulaire, est une grille composée de cellules qui changent d'état dans des étapes discrètes. Après chaque étape, l'état de chaque cellule est modifié selon les états de ses voisines calculés dans l'étape précédente. Les cellules sont mises à jour d'une manière synchrone, et les transitions sont effectuées dans la théorie simultanément. En appliquant des règles simples et des transitions spécifiques, un automate cellulaire peut effectuer d'une manière globale, des opérations complexes. Certains des concepts principaux pour les automates cellulaires sont :

Configuration : L'état global de l'automate cellulaire, appelé configuration, est défini par les états de toutes ses cellules.

Voisinage : Le prochain état de chaque cellule dépend de l'état actuel de ses voisines. La transition de l'automate cellulaire, d'une configuration à une autre, est la conséquence des transitions locales de toutes les cellules. Le voisinage d'une cellule est défini par l'ensemble de ses voisines dont les états sont pris en compte pour chaque transition.

Parallélisme : Toutes les cellules constituant l'automate cellulaire sont mises à jour d'une manière simultanée et synchrone.

Déterministe : Le nouvel état de chaque cellule est déterminé par son état, et l'état seulement de son voisinage.

Homogénéité : Toutes les cellules utilisent la même règle de transition pour déterminer leur prochain état.

Discrétisation : Un automate cellulaire évolue discrètement dans le temps.

Un automate cellulaire peut être décrit par les quatre composants suivants :

- a) **Dimension** : Il n'y a aucune limite à la dimension d'un automate cellulaire, mais dans la pratique, on utilise des automates avec 1, 2, ou 3 dimensions.
- b) **Voisinage de la cellule** : Ceci définit l'ensemble de cellules voisines dont l'état sera pris en compte pour déterminer le prochain état de chaque cellule.
- c) **Espace d'état** : C'est l'ensemble fini d'éléments que peut prendre une cellule.
- d) **Fonction de transition** : C'est l'ensemble de règles qui détermine le nouvel état de chaque cellule selon son état précédant, et les états précédents des cellules de son voisinage.

2.4.2 La machine cellulaire CASI

CASI (Induction Symbolique par Automate Cellulaire) [Atmani et Beldjilali, 07] est un automate cellulaire qui simule le principe de fonctionnement de base d'un Moteur d'Inférence (MI) en utilisant deux couches finies d'automates finis.

Le comportement d'une base de connaissances en relation avec le CIE, figure (2.2) peut être schématisé par un automate cellulaire à deux lignes (couches) : la couche *Celfait* remplaçant la base de faits (BF), et la couche *Celrègle* remplaçant la base de règle (BR).

Chaque cellule de la couche *Celfait* (respectivement *Celrègle*) montre comment se comporte un fait (respectivement une règle pendant l'inférence), à chaque étape une cellule peut être active(1) ou passive (0), c'est-à-dire participe ou non à l'inférence .Le principe est simple :

- Toute cellule i de la première couche *Celfait* est considérée comme fait établi si sa valeur est 1, sinon, elle est considérée comme fait à établir.
- Toute cellule j de la deuxième couche *Celrègle* est considérée comme une règle

Candidate si sa valeur est 1, sinon, elle est considérée comme une règle qui ne doit pas Participer à l'inférence.

La conception de cet automate a été une réponse au problème : "*Comment synchroniser une ligne de faits (respectivement de règles) de façon à ce que toutes les cellules de la ligne participent (respectivement se déclenchent) ensemble ?*".

2.4.3 Architecture de CASI

CASI est composé essentiellement de 3 modules, figure (2.2), le module (COG), chargé de l'optimisation et la génération cellulaire, le module (CV) permettant la validation cellulaire et le module (CIE) auquel, nous nous intéressons dans cette étude, et qui représente le moteur d'inférence cellulaire. Nous retrouvons de plus, la partie induction du graphe assurée par SIPINA pour l'induction symbolique [Menaouer et Atmani, 09].

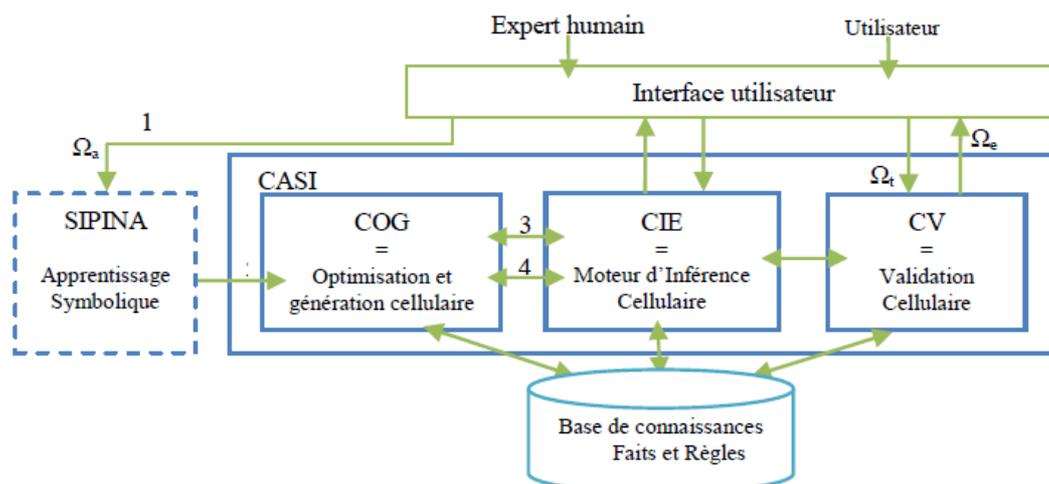


Figure 2.2 : Architecture générale de la machine cellulaire CASI

La section suivante est consacrée à la description du fonctionnement du CIE.

2.4.4 Le moteur d'inférence cellulaire (CIE)

2.4.4.1 Notation et Définitions

Les états des cellules se composent de trois parties : EF , IF et SF , respectivement ER , IR et SR , étant l'entrée, l'état interne et la sortie d'une cellule de *Celfait*, respectivement d'une cellule de *Celrègle*. L'état interne, IF d'une cellule de *Celfait* Indique le rôle du *Fait* :

Dans le cas d'un graphe d'induction $IF = 0$ correspond a un fait du type sommet (s_i), $IF = 1$ correspond à un Fait du type *attribut=valeur* ($X_i = valeur$). Pour une cellule de *Celrègle*, l'état

interne IR peut être utilisé comme coefficient de probabilité que nous n'utiliserons pas dans cette étude.

2.4.4.2 Voisinage

Le voisinage du CIE est représenté par deux relations d'entrée (&E), et la relation de sortie (&S) formulées comme suit :

– la relation d'entrée, notée $iREj$, est formulée comme suit : $\forall i \in \text{l'ensemble } \{1, 1\}, \forall j \in \{1, r\}$,

si (le Fait $i \in$ à la *Prémisse* de la règle j) alors $RE(i, j) \leftarrow 1$.

– la relation de sortie, notée $iRsj$, est formulée comme suit : $\forall i \in \text{l'ensemble } \{1, 1\}, \forall j \in \{1, r\}$,

si (le Fait $i \in$ à la *Conclusion* de la règle j) alors $Rs(i, j) \leftarrow 1$.

- Les cellules appartenant à la même couche Celfait/Celrègle ne communiquent pas entre elles vu l'indépendance qui existe entre les faits d'une part, et les règles d'autre part.
- La notion de relation d'entrée (&E) ou de sortie (&S) s'exprime, dans le domaine des réseaux d'automates, par une matrice d'incidence. L'avantage que représente ce type de notation est le suivant :
 - ❖ En chaînage avant, on peut utiliser &E et &S faits-règles ;
 - ❖ En chaînage arrière, on peut utiliser &S faits-règles (respectivement &E faits-règles) pour simuler la matrice &E règles-faits (respectivement &S règle – faits).
- Les hypothèses suivantes sont supposées être vérifiées :
 - ❖ La couche Celfait contient n cellules ;
 - ❖ La couche Celrègle contient m cellules ;
 - ❖ EF, IF et SF (respectivement ER, IR et SR) sont booléens ;
 - ❖ Le voisinage exprimé sous forme de matrice d'incidence (faits-règle ou règles-faits) est de dimension $(n*m)$.

2.4.4.3 Cycle de base du CIE

Le cycle de base d'un moteur d'inférence, pour établir un fait F en chaînage avant, fonctionne traditionnellement comme suit :

1. Recherche des règles applicables (évaluation et sélection) ;
2. Choisir une parmi ces règles, par exemple R (filtrage) ;
3. Appliquer et ajouter la partie conclusion de R à la base des faits (exécution).

La dynamique de la machine cellulaire CASI, pour simuler le fonctionnement d'un Moteur d'Inférence, utilise deux fonctions de transitions δ_{fait} et $\delta_{r\grave{e}gle}$, où δ_{fait} correspond à la phase **d'évaluation**, de **sélection** et de **filtrage**, et $\delta_{r\grave{e}gle}$ correspond à la phase **d'exécution**.

- La fonction de transition δ_{fait} :

$$(EF, IF, SF, ER, IR, SR) \xrightarrow{\delta_{fait}} (EF, IF, ER + (R_{TE} \cdot EF), IR, SR)$$

- La fonction de transition $\delta_{r\grave{e}gle}$:

$$(EF, IF, SF, ER, IR, SR) \xrightarrow{\delta_{r\grave{e}gle}} (EF + (R_s \cdot ER), IF, SF, ER, IR, ER)$$

Où la matrice R_{TE} désigne la transposée de R_{TE}

Nous considérons G_0 la configuration initiale de notre automate cellulaire et, $\Delta = \delta_{r\grave{e}gle} \circ \delta_{fait}$ la fonction de transition globale : $\Delta(G_0) = G_1$ si $G_0 \rightarrow \delta_{fait} G_0$ et $G_0 \rightarrow \delta_{r\grave{e}gle} G_1$. Supposons que $G = \{G_0, G_1, \dots, G_q\}$ est l'ensemble des Configurations de notre automate cellulaire.

L'évolution discrète de l'automate, d'une génération à une autre, est définie par la séquence G_0, G_1, \dots, G_q , où $G_{i+1} = \Delta(G_i)$. [Atmani et Beldjilali, 07].

2.4.4.4 Quelle est la condition d'arrêt du moteur *cellulaire*

- Lorsque le fait que l'on s'est fixé comme but est atteint (ou ajouté à la base de faits) dans ce cas, l'arrêt peut être considéré comme succès.
- Quand aucune règle n'est applicable bien que la base de faits ne contient pas encore le but désiré. Il s'agit d'un échec.

2.4.4.5 Fonctionnement du CIE sur un exemple

Nous proposons dans ce qui suit, un exemple de base de connaissances sur laquelle, nous déroulons l'ensemble des étapes de fonctionnement du CIE.

Base de règles (BR):	
A, B	→ C R1
F, D	→ A R2
D, E	→ B R3
B, D	→ F R4
E, F	→ D R5
E, F	→ B R6
B, F	→ G R7
Base de faits (BF):	
E, F	

Figure 2.3 : Base de connaissances.

Dans cet exemple on cherche à démontrer le fait **C**, qui représente le but.

En déroulant l'exemple de la figure (2.3) en chaînage avant pour arriver au but **C**, selon les différents modes, Figure (2.4), on obtient :

Mode 1 : Synchrones en largeur

cycle	Evolution de la BF	Règles
1	{E, F} ∪ {D, B}	5,6
2	{E, F, D, B} ∪ {A, B, F, G}	2,3,4,7
3	{E, F, D, B, A, G} ∪ {C}	1

Mode 2 : Asynchrone en largeur

Cycle	Evolution de la BF	Règles
1	{E, F} ∪ {D, B}	5
2	{E, F} ∪ {B}	6
3	{E, F, D, B} ∪ {A}	2
4	{E, F, D, B} ∪ {B}	3
5	{E, F, D, B} ∪ {B}	4
6	{E, F, D, B} ∪ {G}	7
7	{E, F, D, B, A, G} ∪ {C}	1

Mode 3 : Asynchrone en profondeur

Cycle	Evolution de la BF	Règles
1	$\{E, F\} \cup \{D\}$	5
2	$\{E, F, D\} \cup \{B\}$	6
3	$\{E, F, D, B\} \cup \{A\}$	2
4	$\{E, F, D, A, B\} \cup \{C\}$	1

Figure 2.4 : Chaînage avant selon différents modes.

Dans l'exemple de la figure (2.3), la base de faits initiale contient deux faits (E, F). Le nombre de faits est égal à 7, ainsi que le nombre de règles, ce qui va produire une matrice d'entrée/sortie de dimension 7, comme le montre la figure (2.5) :

R_E	R₁	R₂	R₃	R₄	R₅	R₆	R₇
A	1	0	0	0	0	0	0
B	1	0	0	1	0	0	1
C	0	0	0	0	0	0	0
D	0	1	1	1	0	0	0
E	0	0	1	0	1	1	0
F	0	1	0	0	1	1	1
G	0	0	0	0	0	0	0

R_s	R₁	R₂	R₃	R₄	R₅	R₆	R₇
A	0	1	0	0	0	0	0
B	0	0	1	0	0	1	0
C	1	0	0	0	0	0	0
D	0	0	0	0	1	0	0
E	0	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	1	0	0	0
G	0	0	0	0	0	0	1

Figure 2.5 : Matrices d'incidence d'Entrée/Sortie

- Traitement de la BF avec la machine cellulaire CASI pour arriver au but C

Durant l'étape d'initialisation du MI, seule les faits initiaux qui sont déjà présent dans la base de fait sont égaux a 1, au niveau du EF (entrée des faits), comme le montre la figure suivante :

Initialisation du CIE :

	EF	IF	SF
A	0	1	0
B	0	1	0
C	0	1	0
D	0	1	0
E	1	1	0
F	1	1	0
G	0	1	0

Celfait

	ER	IR	SR
R1	0	1	1
R2	0	1	1
R3	0	1	1
R4	0	1	1
R5	0	1	1
R6	0	1	1
R7	0	1	1

Celrègle

Figure 2.6: Configuration initiale du CIE

Configuration après évaluation (sélection et filtrage) :

$$(EF, IF, SF, ER, IR, SR) \xrightarrow{\delta_{fait}} (EF, IF, EF, ER + (R_{TE} \cdot EF), IR, SR)$$

En appliquant la règle δ_{fait} sur la configuration initiale du CIE on obtient :

	EF	IF	SF
A	0	1	0
B	0	1	0
C	0	1	0
D	0	1	0
E	1	1	1
F	1	1	1
G	0	1	0

Celfait

	ER	IR	SR
R1	0	1	1
R2	0	1	1
R3	0	1	1
R4	0	1	1
R5	1	1	1
R6	1	1	1
R7	0	1	1

Celrègle

Figure 2.7 : Configuration obtenu avec δ_{fait}

Configuration obtenue après exécution :

$$(EF, IF, SF, ER, IR, SR) \xrightarrow{\delta_{règle}} (EF + (R_s \cdot ER), IF, SF, ER, IR, ER)$$

Cette phase correspond à ajouter de nouveaux faits dans la BF, et à désactiver les règles qui ont été sélectionnées lors de l'étape précédente.

	EF	IF	SR
A	0	1	0
B	1	1	0
C	0	1	0
D	1	1	0
E	1	1	1
F	1	1	1
G	0	1	0

Celfait

Celrègle

Figure 2.8 : Configuration obtenu avec δ règle

Dans la figure (2.9), on exécute le δ fait et δ règle en parallèle, ce qui correspond à effectuer toutes les étapes (sélection, filtrage et exécution) en même temps, jusqu'à ce que le but C soit atteint ou aucune règle ne soit applicable.

	EF	IF	SF
A	1	1	0
B	1	1	1
C	0	1	0
D	1	1	1
E	1	1	1
F	1	1	1
G	1	1	0

Celfait

Celrègle

Figure 2.9 : Configuration G1 après exécution δ règle \circ δ fait

	EF	IF	SF
A	1	1	1
B	1	1	1
C	1	1	0
D	1	1	1
E	1	1	1
F	1	1	1
G	1	1	1

	ER	IR	SR
R1	1	1	0
R2	1	1	0
R3	1	1	0
R4	1	1	0
R5	1	1	0
R6	1	1	0
R7	1	1	0

Celfait

Celrègle

Figure 2.10 : Configuration finale G2 après exécution δrègle ° δfait

Comme le montre la figure (2.10), aucune règle n'est applicable (SR=0), et le fait C a été ajouté à la BF, par conséquent, le but a été démontré avec succès en utilisant le CIE de CASI.

2.5 Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à la présentation de la machine cellulaire CASI, et tout particulièrement le CIE qui simule le fonctionnement d'un système expert. La conception et le fonctionnement du moteur d'inférence cellulaire ont été présentés dans le détail afin d'observer les modifications qui vont être apportées au fonctionnement de ce dernier lors de son exploitation pour les différentes contributions présentées dans les prochains chapitres.

Nous avons aussi jugé nécessaire, de présenter les différents travaux réalisés avec CASI jusqu'à maintenant dans différents domaines tels que la santé, systèmes de production (ordonnancement des tâches) et de proposer son introduction dans le domaine des réseaux de transport urbain.

Nous proposons par conséquent, dans la suite de cette thèse, les différentes possibilités qu'offre cette machine cellulaire pour pouvoir l'adapter à la régulation et la reconfiguration d'un réseau de transport urbain.

Le prochain chapitre est consacré à la modélisation des réseaux de transports urbains afin de nous permettre de choisir le modèle qui sera adopté pour la simulation du RTU.

Chapitre 3

Modélisation d'un réseau de transport urbain

3.1 Introduction

La modélisation reste un moyen très efficace pour représenter la réalité, elle permet de commander, d'analyser et éventuellement d'améliorer les performances des systèmes. En effet, la modélisation s'est vite imposée et devenue indispensable dans toutes les disciplines : la modélisation est une tâche complexe qui nécessite l'élaboration de modèles appropriés pour assurer la satisfaction de la clientèle, à savoir, proposer un service de transport urbain en tenant compte des contraintes de fonctionnement telles que le respect des horaires théoriques, la garantie des correspondances, la réduction des temps d'attente, etc. Ceci a conduit naturellement les chercheurs à s'intéresser à ce problème et à proposer des modèles adéquats. A travers ce chapitre, nous présentons quelques modélisations des réseaux de transport urbain, proposées dans la littérature, ainsi qu'une comparaison sur la base de quelques critères pertinents entre ceux-ci.

3.2 Modélisation des réseaux de transport urbain

L'objectif de la modélisation des réseaux de transport urbain est d'obtenir une représentation utilisable et une description parfaite afin de pouvoir l'exploiter. Plusieurs approches de modélisation des réseaux de transport ont été proposées.

3.2.1 Modélisation par les Réseaux de Petri (RdP)

Les réseaux de Petri (RdP) représentent un outil de modélisation des systèmes à événement discrets. D'après [Castelain et Mesghouni, 02], ces derniers ont été exploités pour modéliser un réseau de transport urbain puisqu'ils permettent de modéliser facilement le comportement parallèle et asynchrone des différents moyens de transport et la synchronisation entre les bus, trains, tramways et métros. En général, ces modèles à base de réseaux de Petri sont utilisés pour optimiser les cycles des feux de signalisation des carrefours dans [DiCesare et al, 94] [Wang et al, 99]. Rappelons brièvement la définition d'un Réseau de Petri [Castelain et Mesghouni, 02] [Nguyen, 08].

Un Réseau de Petri (RdP) se représente par un graphe orienté reliant des places et des transitions, c'est un quadruplet $R = \langle P; T; Pre; Post \rangle$ où :

- $P = \{P_1; P_2; \dots; P_n\}$ est l'ensemble fini des places.
- $T = \{T_1; T_2; \dots; T_m\}$ est l'ensemble fini des transitions.
- $Pre : P \times T \rightarrow IN$ est l'application places précédentes.
- $Post : P \times T \rightarrow IN$ est l'application places suivantes.

Deux places ne peuvent pas être reliées entre elles, ni deux transitions.

Le marquage du réseau est une fonction $M : P \rightarrow IN$. $M(P_i)$ qui signifie le nombre de marques (ou jetons ou tokens) contenus dans la place P_i représentant généralement des ressources disponibles.

Les entrées d'une transition sont les places desquelles part une flèche pointant vers cette transition, et les sorties d'une transition sont les places pointées par une flèche ayant pour origine cette transition. Un réseau de Petri évolue lorsqu'on exécute une transition : des jetons sont pris dans les places d'entrée de cette transition et envoyés dans les places de sortie de cette transition suivant certaines règles.

Le tir d'une transition (pour un réseau de base ou un réseau coloré) est une opération indivisible qui est déterminée par la présence de jetons dans les places d'entrée. Une transition T_i peut être tirée si et seulement si $\forall P_j \in P : M(P_j) \geq Pre(P_j; T_i)$.

Après le tir de la transition T_i , le marquage M' obtenu est défini par : $\forall P_j \in P : M'(P_j) = M(P_j) - Pre(P_j; T_i) + Post(P_j; T_i)$.

Dans le domaine du transport urbain, les auteurs [Abbas et al, 2002] proposent une modélisation des correspondances par des RdP stochastiques. [Nait Sidi Moh et al, 2002] présente un modèle basé sur les RdP pour la gestion des correspondances où les transitions représentent les arrêts (stations) de bus et les places représentent le déplacement inter-stations. Les temps d'attente sont calculés selon un modèle mathématique basé sur l'algèbre Max-Plus.

D'après [Castelain et Mesghouni, 02], pour modéliser précisément à la fois la ligne de transport et ses passagers, les réseaux de Petri ordinaires tels qu'ils ont été définis précédemment ne sont pas suffisants. Un modèle constitué des RdP Stochastiques, Temporisés à Prédicats/Transitions (RdP STP/T) a été proposé dans [Castelain et Mesghouni, 02], où un jeton modélise un ensemble de personnes qui ont le même comportement à un instant donné. Ces personnes peuvent attendre au même arrêt après le même bus. L'autobus n'est pas réellement modélisé, mais c'est l'ensemble des passagers à l'intérieur qui est représenté par un n-uplet (ou vecteur). Ce n-uplet caractérise l'état de cet ensemble de

personnes : (numéro de ligne, numéro de service, capacité du bus, nombre actuel de passagers). La position de ce jeton dans le réseau de Petri caractérise la position du bus dans le réseau de transport.

Dans cette modélisation proposée par [Castelain et Mesghouni, 02], les transitions du RdP sont temporisées. Un nombre positif représentant la durée de l'activité associée à la transition est affecté à chaque transition.

Le temps mis par un bus entre deux arrêts successifs et le temps d'arrêt d'un bus à son arrêt sont bien connus puisqu'ils dépendent du tableau de marche de la ligne. Toutes ces temporisations sont déterministes et ajoutées sur le RdP pour représenter la durée des trajets, les seules données temporelles non-déterministes proviennent des arrivées stochastiques des personnes aux arrêts et stations.

Une des hypothèses principales de leur modèle [Castelain et Mesghouni, 02], est de ne considérer que des flux stationnaires de passagers. Cela signifie que l'horizon d'étude (la semaine ou la journée) peut être partagé en périodes temporelles disjointes. A chaque période (heures de pointes, heures creuses) correspond un flux régulier d'utilisateurs. Les fréquences d'arrivée à chaque arrêt de bus, les itinéraires des usagers, les taux d'échanges entre les lignes aux nœuds de correspondance sont donnés par l'exploitant du réseau qui est sensé les connaître.

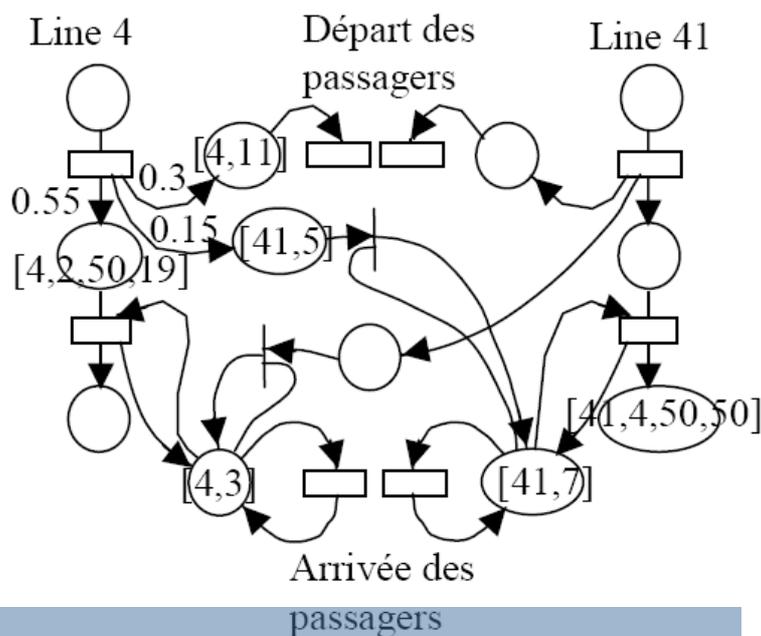


Figure 3.1 : Le RdP d'une correspondance

La figure (3.1) [Castelain et Mesghouni, 02] représente les échanges de passagers entre deux bus qui se croisent à un arrêt de correspondance. Le second bus de la ligne 4 vient juste d'arriver avec 35 passagers. 55% des passagers (soient 19 personnes) restent dans le bus, 30% des passagers (soient 11 personnes) quittent l'arrêt et 15% (soient 5 personnes) veulent prendre un bus de la ligne 41. Il y a 3 personnes qui attendent un bus de la ligne 4 et qui rejoindront les 19 personnes qui sont restées dans le bus. Sur l'autre ligne, le 4^{ème} bus de la ligne 41 vient juste de quitter son arrêt. Il est plein avec 50 passagers et 7 personnes n'ont pas pu monter dedans. Ils vont donc attendre le prochain bus de la ligne 41 et seront bientôt rejoint par les 5 personnes qui ont quitté l'autobus de la ligne 4.

3.2.2 Modélisation par les graphes

Dans le domaine du transport urbain, la modélisation à l'aide de la théorie des graphes est souvent utilisée. La modélisation par graphe consiste à représenter les différents itinéraires possibles qu'un autobus peut utiliser. Un réseau de transport urbain est généralement représenté par un graphe, dans lequel l'ensemble des sommets représente les stations, et les arcs représentent les déplacements [Nguyen, 08]. Dans cette approche de modélisation en exploitant les graphes, nous citons la modélisation des courses, la modélisation des débits, et la modélisation des itinéraires.

- **Modélisation des courses:**

Cette approche s'appuie sur la notion de course. Chaque course est illustrée par un nœud de début et un nœud de fin liés par un arc (au moins) qui représente les contraintes de précédence liant les courses [Haghani et Banihashemi, 02] [Huisman, 02]. Parmi les caractéristiques de cette modélisation [Huisman, 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 limité de véhicules.

Pour la résolution d'un Problème d'Ordonnancement Multi-Dépôt des Véhicules (*POMDV*), [Haghani et Banihashemi, 02] ont proposé une approche dynamique qui se base sur deux hypothèses :

- Les temps de parcours sont connus durant la période $[t; t + 1]$;

◦ Il y a un ensemble S de scénarios qui définissent les temps de parcours pour la période après $t + 1$. Chaque scénario s a une probabilité d'occurrence p .

- **Modélisation des débits:**

Cette modélisation présente les débits à affecter aux différents itinéraires du réseau routier suivant des critères représentant le coût des chemins (péage, billet pour un transport en commun) ainsi que la durée des parcours [Wynter et Lolito, 03].

Un réseau est représenté par un graphe. Chaque arc du graphe est décrit par son flot et son temps de parcours, et l'épaisseur représente l'importance du débit qui lui est affecté [Wynter et Lolito, 03].

Les différents modes de transport 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. Cette modélisation est très répandue dans les problèmes de planification statique du trafic routier, notamment des réseaux multimodaux. Sauf que la difficulté réside dans la dépendance entre le temps de parcours et les flots sur les arcs. En effet plus un itinéraire est emprunté par des véhicules, plus leurs temps de parcours augmente jusqu'à la congestion.

- **Modélisation des itinéraires:**

Dans cette représentation, les arrêts sont considérés comme étant des nœuds et les déplacements comme étant des arcs. Chaque arc est alors décrit par une distance [Bouamrane, 06].

Une modélisation d'un réseau de transport urbain a été proposé par [Ngamsahi et Lovell, 00] avec 13 nœuds et 13 arcs (inclus les nœuds de correspondance), figure (3.2), où les itinéraires sont modélisés par des séquences de nœuds, aussi, chaque itinéraire représenté 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.

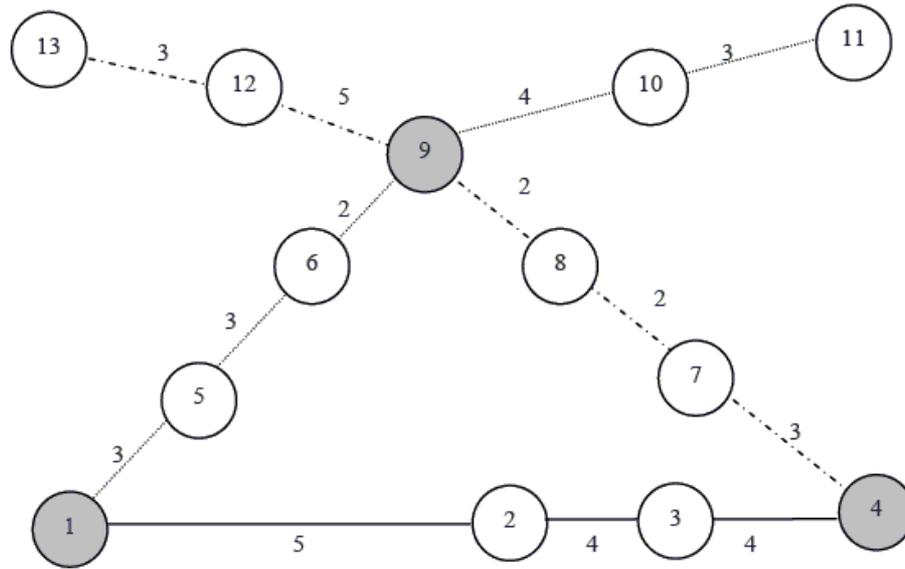


Figure 3.2 : Exemple de modélisation des itinéraires

Dans le domaine du transport, ce modèle est utilisé pour l'étude de la demande, la localisation des points de correspondances et enfin le choix des itinéraires adéquats [Bouamrane, 06].

3.2.3 Modélisation par les Systèmes Multi-agents (SMA)

Plusieurs études s'appuyant sur des approches multi-agents se sont intéressées au comportement des réseaux de transport.

Comme le décrivent les travaux de [Jenning et al, 98], les agents sont des entités conceptuelles qui existent dans un environnement dans lequel ils coopèrent et interagissent en vue de résoudre des problèmes qui dépassent leurs capacités et connaissances individuelles.

L'approche multi-agent est adaptée aux problèmes de gestion de réseaux de transport urbain.

Le caractère distribué et parallèle du paradigme multi-agent permet [Laichour, 02] :

1. De bien décrire la complexité de l'évolution d'un réseau de transport, par analogie structurelle;
2. De décomposer un problème en élément plus simple, plus facile à appréhender (réduction de la complexité dans un domaine peu formalisé) ;
3. D'assurer la résolution de problème par simulation.

Nous retrouvons d'autres travaux dans la littérature tels que ceux de [Bomarius, 92] où il propose une modélisation multi-agent des scénarios du trafic urbain au niveau des carrefours.

Dans sa modélisation, il y a trois types d'agents : des agents Véhicules, des agents Feux (feux

de signalisation), et des agents Parking. Au niveau d'un carrefour, il existe quatre agents feux. Les agents feux détectent la présence des agents véhicules. Ces derniers informent les agents feux de leur intension (tourner à gauche, tourner à droite, ou aller tout droit). Aussi les agents véhicules communiquent avec les agents parking pour les informer de leur intention pour minimiser l'attente des véhicules voulant se garer.

Par la suite plusieurs études ont été proposées en s'appuyant sur des approches ou des Systèmes Multi-Agent SMA. Ces travaux se sont intéressés au comportement des réseaux de transport ils traitent plus précisément la régulation du trafic urbain. Dans ce domaine, [Fayech, 03] a utilisé un système multi-agent pour la surveillance, le diagnostic, et la régulation dans une hybridation avec les algorithmes évolutionnistes. Les travaux de [Ezzedine et al, 05] propose aussi une application destinée à superviser à long terme le système d'information d'un réseau de transport urbain a été proposée. Par la suite, [Bouamrane, 06] a proposé un système interactif d'aide à la décision pour la régulation d'un réseau de transport urbain bimodal en se basant sur une approche multi-agents, un raisonnement à base de cas et un système expert.

3.2.4 Modélisation par les Algorithmes à Colonies de Fourmis (ACF)

La planification de l'exploitation des réseaux de transport multimodal, réalisée en temps anticipé, se base sur des prévisions des conditions de circulation, des durées des trajets et de la demande de transport. Ainsi, selon [Zidi, 07], il est bien difficile en temps réel de suivre les tableaux de marche théoriques issus de ce processus à cause de l'apparition de phénomènes complexes et aléatoires affectant le trafic du réseau. Zidi [Zidi, 07], propose un modèle qui permet d'éviter la détérioration de la qualité de service en traitant les perturbations provoquées par ces phénomènes dans les plus brefs délais à travers un processus de régulation. La régulation est alors le processus d'adéquation en temps réel des tableaux de marche aux conditions réelles d'exploitation. L'action de régulation n'agit que sur les horaires de passage des véhicules. Néanmoins, dans des cas de perturbations plus complexes et difficiles à gérer, le régulateur ne peut proposer aucune décision de régulation mais il doit refaire une planification totale ou partielle du réseau en temps réel.

Dans ces conditions, le régulateur doit chercher l'itinéraire optimal qui permet d'absorber le flux de voyageurs entre deux stations. Il s'agit d'une reconfiguration qui consiste en une réaffectation des horaires, des itinéraires et des stations aux véhicules. Dans ce cadre, Zidi [Zidi, 07] propose un système appelé SARR (Système d'Aide à la Régulation et la

Reconfiguration) et composé de trois modules. Le premier est un sous système de pilotage, il permet de classifier les perturbations selon les manœuvres de régulation connue et par la suite déterminer une première solution rapide mais aussi distinguer les cas de la reconfiguration spatiale des autres. Le second module du système SARR est un module d'optimisation basé sur l'Algorithme à Colonie de Fourmis, ACFRS, pour le calcul d'itinéraire. Cette approche heuristique de recherche d'itinéraire dans un réseau multimodal utilise une fonction d'agrégation construite à partir du temps de parcours, de la distance de parcours et du nombre de passagers servis. Dans l'algorithme ACFRS, il appliqué une nouvelle idée pour échapper aux optimums locaux. Il s'agit de forcer la sortie des fourmis de la première solution trouvée en diminuant sa quantité de phéromone permettant ainsi plus d'exploration. De même pour l'algorithme ACFRH qui assure une régulation horaire à travers un autre module qui propose au régulateur un tableau de marche régulé avec l'optimisation de la fonction d'agrégation des trois critères : la régularité, la ponctualité et la correspondance [Zidi, 07].

3.2.5 Modélisation par Unified Modeling Language (UML)

UML (en anglais Unified Modeling Language ou « langage de modélisation unifié ») est un langage de modélisation graphique à base de pictogrammes [Grady et al, 00]. Il est apparu dans le monde du génie logiciel, dans le cadre de la « conception orientée objet. UML est à présent un standard défini par l'Object Management Group (OMG)²

Cet outil de modélisation est également un bon moyen, de maîtriser la complexité d'un réseau de trams et de mieux comprendre son fonctionnement, ce qui est indispensable avant toute éventuelle implémentation [Nguena et al, 07].

Afin de construire toute la structure des données du réseau de transport, [Nguena et al, 07] proposent d'identifier au préalable les entités à représenter. Pour le réseau de trams, ils ont représenté :

- Le réseau de tram (au sens physique) ;
- Un segment ;
- Une ligne de tram ;
- Une connexion de segment.
- Un arrêt de tram.

² **Object Management Group** est une association [américaine](#) à but non lucratif créée en [1989](#) dont l'objectif est de standardiser et promouvoir le [modèle objet](#) sous toutes ses formes

– Un croisement.

Les classes définissent une abstraction, un type abstrait qui permettra plus tard d'instancier des objets. Le diagramme qui compose ces classes décrit le modèle général et permet de séparer les composants du système, ce qui peut s'avérer efficace pour structurer un travail de développement.

Le modèle de la figure (3.3) [Nguena et al, 07] est composé des classes suivantes :

1. La classe "**TramWayNet**" modélise un réseau de trams dans son aspect général. On considère que le réseau est composé d'une liste de trams, des lignes de trams et des segments.
2. La classe "**Connector**" modélise la liaison entre segment, on utilise le concept d'héritage pour définir deux sortes de liens : les arrêts de trams et les croisements.
3. La classe "**Segment**". A un segment, on affecte : zéro ou deux "connector " (lien de segments).

Pour un arrêt de tram par exemple, il ne peut y avoir que deux segments de tram connectés au maximum. Un segment peut être composé de plusieurs petits segments (liste de segments) et joue le rôle de début ou de fin de lien.

4. La classe "**Crossing**", c'est un croisement avec comme attributs la liste des segments en entrée et en sortie.
5. La classe "**TramStop**" modélise les arrêts de trams. Ses attributs sont le segment en entrée et le segment en sortie.
6. La classe "**TramLine**" est utilisée pour représenter une ligne de tram à laquelle on associe plusieurs arrêts de trams. Les arrêts sont les éléments d'une liste ordonnée, ce qui nous donne la direction de la ligne.

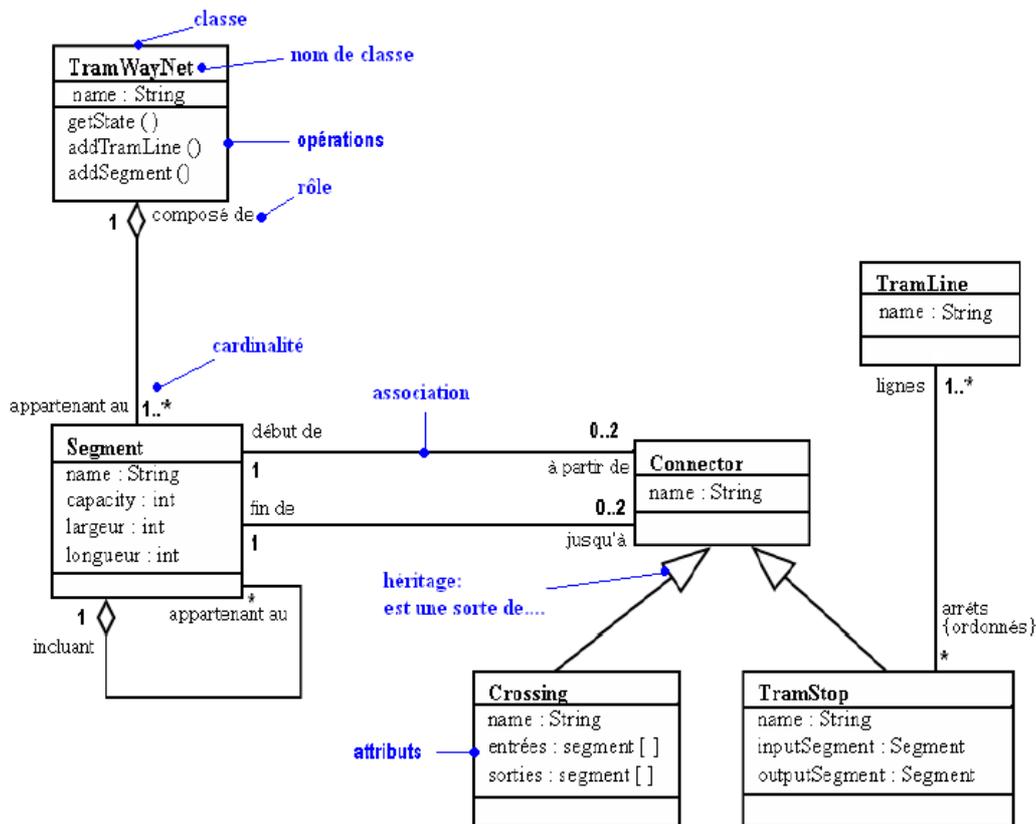


Figure 3.3 : Diagramme de classe, Réseau physique de tramways

3.2.6 Modélisation par les réseaux à forme BCMP ouverts multi-classes

Le trafic routier en segment urbain est sans cesse en évolution et en augmentation. Les deux grandes approches existant sont celle qui considère que le trafic comme un phénomène global en le modélisant comme un flux ou bien celle qui considère que le trafic n'est que la résultante du comportement des usagers et donc modéliser les usagers [Dad, 11].

Dans les systèmes de transport urbain, on parle souvent d'un ensemble d'informations qui sont en corrélation et nécessaires à la détermination d'une décision. Cependant les connaissances dont nous disposons sur ces systèmes sont parfois entachées d'incertitudes et d'imprécisions. De ce fait, il est très important de pouvoir exprimer et de modéliser ces informations imprécises en faisant appel à des théories nouvelles de modélisation dans un milieu incertain [Dad, 11].

Les systèmes de transport urbain constituent la partie fondamentale et essentielle de la structure urbaine et dynamique. Modéliser, c'est comprendre à priori l'évolution dynamique du processus étudié et ses déterminants principaux. La compréhension des phénomènes permet la mise en équations et la description de l'évolution du processus. Dans ce cadre,

[Dad, 11] a proposé une modélisation et simulation pour un réseau de transport. Le modèle est appliqué à un trafic d'une intersection routière qui se compose de deux routes, chacune avec une voie ou deux voies, et un ensemble de feux de signalisation qui contrôlent la traversée de l'intersection. Une intersection comprend deux axes. Chaque axe contient un trafic bidirectionnel, figure (3.4) [Dad, 11].

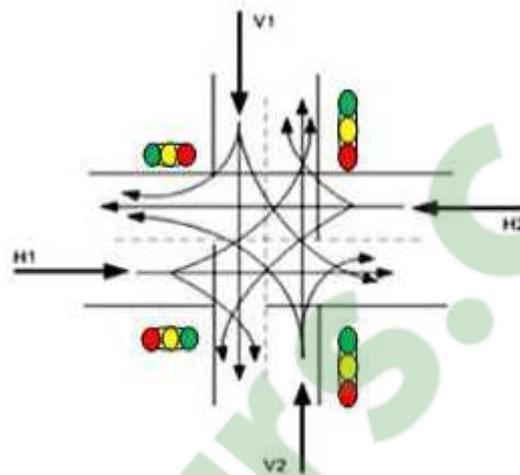


Figure 3.4 : Exemple d'un trafic d'une intersection routière.

Les feux de signalisation en un axe donné ont la même couleur : ils sont au vert simultanément et passent au rouge en même temps. Les véhicules sont arrêtés devant le feu de signalisation quand la lumière est au rouge. Une description informelle est faite pour définir les données textuelles et dynamiques d'une intersection routière donnée pour élaborer le modèle analytique, suivie par le modèle de simulation afin de tirer quelques mesures : le temps d'attente moyen, le temps de séjour moyen et la longueur moyenne des différentes files d'attente.

La description informelle se résume dans la description textuelle des données : le nombre de voies dans chaque axe, la position des feux de signalisation dans une intersection, le taux estimé des arrivées dans chaque direction pour chaque axe et le taux de service. Elle définit le système par une vue structurelle et une vue comportementale.

1. Vue structurelle : Une vue structurelle identifie les éléments statiques d'une intersection, en d'autre terme les secteurs d'entrées et de sorties correspondant aux ruelles d'entrées et de sorties et les secteurs internes se trouvant entre les deux.

- Secteur d'entrée : Un secteur d'entrée «*I* » est un secteur par lequel les véhicules entrent dans l'intersection. Les secteurs d'entrées sont positionnés dans la fin de l'entrée d'une ruelle d'une intersection, figure (3.5). Ils sont aussi le lieu où les véhicules sont stoppés par un feu rouge.
- Secteur de sortie : Un secteur de sortie «*O* » est un secteur par lequel les véhicules quittent l'intersection.
- Secteur interne : Un secteur interne «*S*» est un secteur par lequel les véhicules passent pour traverser le chemin allant du secteur d'entrée au secteur de sortie.

Après la définition des différents secteurs, la vue structurelle d'une intersection routière est illustrée dans la figure (3.5). Une telle granularité permet de représenter et analyser des situations dynamiques plus réalistes.

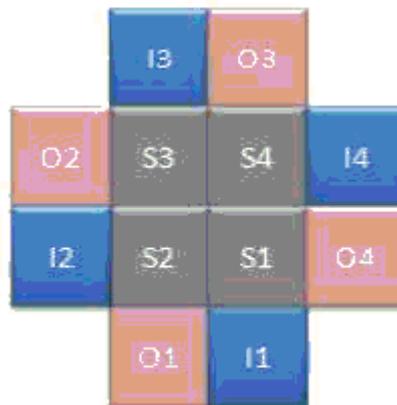


Figure 3.5 : Vue structurelle d'une intersection routière.

2. Vue comportementale : Cette vue donne la représentation dynamique d'une intersection, en d'autre terme les flux des véhicules du secteur d'entrée au secteur de sortie en passant par les secteurs internes, les temps des inters-arrivées, les taux de service et les temps des feux de signalisation.

En résumé, pour concevoir le modèle BCMP, [Dad, 11] présente la description informelle qui permet de définir les deux vues : «structurelle et comportementale».

Cette description est utilisée pour élaborer le modèle BCMP. Pour cette raison un sous modèle est introduit pour chaque type d'élément qui est une partie de la vue structurelle (secteurs d'entrées, secteurs de sorties et secteurs internes). Ces sous modèles sont après connectés pour former le modèle complet appelé «réseau BCMP ouvert multi-classes» accordant avec les

informations données par les vues : «structurelle» et «comportementale», figure (3.6) [Dad, 11].

Où les files d'attente représentent les différents secteurs de l'intersection routière étudiée (les files d'attente en gris représentent les secteurs internes, les files en bleu représentent les secteurs d'entrées et tous ce qui est en rose représentent les secteurs de sorties).

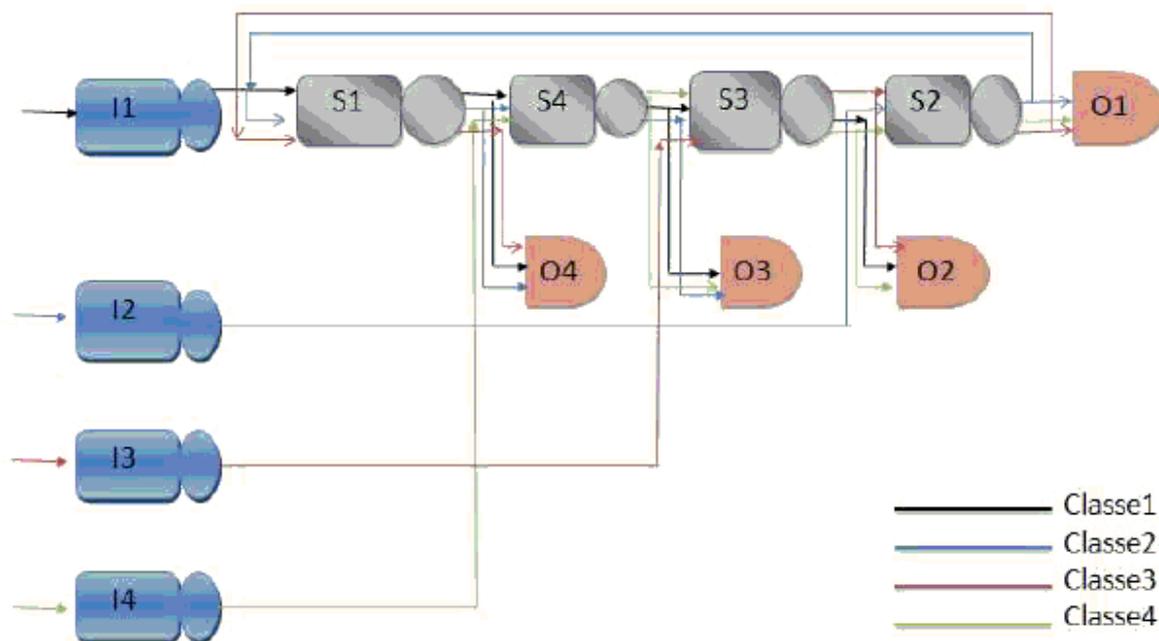


Figure 3.6 : Modèle de réseau BCMP ouvert multi-classes

3.2.8 Modélisation Mathématique

Un modèle de déplacement urbain consiste à représenter de façon simplifiée la réalité, afin de mieux la comprendre et de pouvoir faire des prévisions.

Dans cette approche, les auteurs proposent [Bouamrane et al, 12] un modèle sous forme d'un système d'équations qui permet de modéliser le déplacement d'un bus dans un réseau de transport urbain avec une prise en compte de la distribution des voyageurs sur les points d'arrêts pour pouvoir estimer la recette par la suite.

La résolution du système d'équations donne la possibilité pour prédire la répartition et la couverture des lignes d'exploitation. Elle permet aussi d'estimer la recette de chaque véhicule et de contrôler ses coûts relatifs aux roulages, et de ce fait, il offre un moyen pour estimer la

rentabilité. Le modèle proposé nous permet de savoir à chaque instant t et pour chaque véhicule vk

- La position du véhicule durant le trajet ;
- Le nombre de courses effectuées ;
- Le sens de la course actuelle (aller ou retour)
- L'accélération actuelle ;
- La vitesse actuelle du déplacement ;
- La distance parcourue à partir du départ ;
- Le temps total depuis le début du service ;
- Le nombre de passagers à bord ;
- La recette actuelle ;
- Les charges de roulage durant le déplacement ;
- La rentabilité économique³;

Les lignes du réseau doivent être projetées dans un repère qui fait abstraction du tissu urbain.

Pour cela, les auteurs ont élaboré une projection en utilisant le logiciel "MapInfo" qui nous a permis l'extraction et l'affichage des données géographiques.

Les valeurs d'un déplacement sont déterminées en prenant comme base seulement les valeurs observées au niveau des arrêts obtenues via "Mapinfo".

La figure (3.7) représente le trajet non linéaire d'un véhicule vk sur une ligne lr . Sur ce trajet, on a n points d'arrêts qui sont connus.

Le repère "0" de la figure (3.7) correspond au dépôt où les bus sont stationnés initialement.

Initialement, nous connaissons les coordonnées des n points d'arrêts d'une ligne donnée. Les n points d'arrêt sont définis par rapport au point de départ de chaque ligne.

Le schéma illustré sur la figure (3.7), représente le trajet non linéaire d'un bus sur une ligne donnée. Sur ce trajet, nous avons n points d'arrêts connus.

³ Une mesure de la performance économique de l'entreprise dans l'utilisation de l'ensemble de son capital

L'approximation d'une fonction F par un polynôme est une démarche naturelle que l'on rencontre dans divers contextes en analyse numérique [Bouamrane et al, 12].

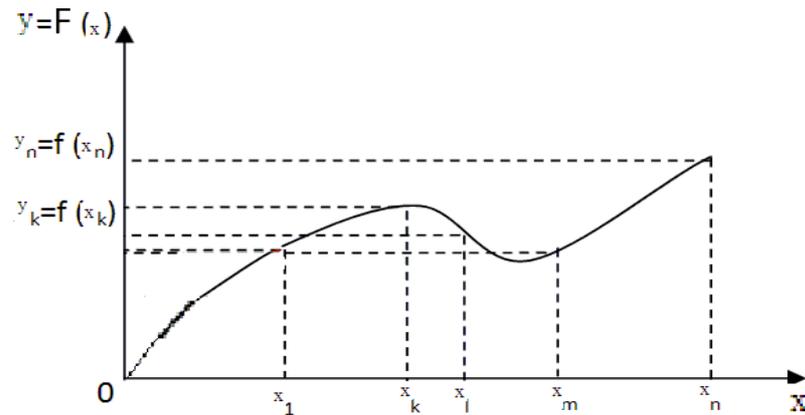


Figure 3.7 : Déplacement d'un véhicule v_k sur une ligne lr

En mathématiques, une interpolation polynomiale est une technique d'interpolation d'un ensemble de données ou d'une fonction F par un polynôme P . En d'autres termes, étant donné un ensemble de points (obtenu, par exemple, à la suite d'une expérience), on cherche un polynôme qui passe par tous ces points, et éventuellement vérifie d'autres conditions, de degré si possible le plus bas [Bouamrane et al, 12].

Les n points d'arrêts pour une ligne donnée ne sont pas équidistants. Les distances entre les points d'arrêts $(x_i; P(x_i))$ ne sont pas équidistantes, elles sont définies en tenant compte de la densité du flux des voyageurs sur le trajet.

Ces n points d'arrêts connus peuvent définir par interpolation le modèle de déplacement dans la ligne en question.

$P(x)$ est une fonction d'interpolation qui permet d'estimer les valeurs du déplacement $(X_i; p(x_i))$ à chaque instant t du départ jusqu'à l'arrivée en connaissant la position du bus sur les n points d'arrêts seulement.

En mathématiques, la théorie de l'approximation concerne la façon dont les fonctions peuvent être approchées par de plus simples fonctions, en donnant une caractérisation quantitative des erreurs introduites par ces approximations.

L'objectif est de donner une approximation aussi précise que possible d'une fonction réelle donnée, de façon à fournir des valeurs les plus exactes possibles avec une erreur minimale [Bouamrane et al, 12].

La figure (3.8) illustre la courbe C du polynôme obtenue $P(x)$ et la courbe C' de la fonction $F(x)$ inconnue du déplacement réel dans le milieu urbain.

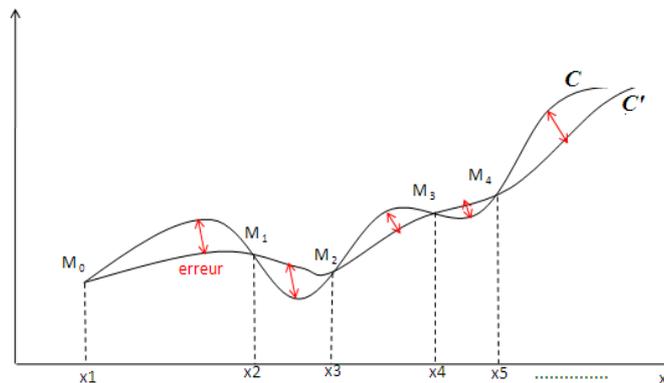


Figure 3.8 : Erreur d'interpolation polynomiale

Nous remarquons sur la figure (3.8) un petit décalage entre les deux courbes, ce dernier représente l'erreur d'interpolation contrôlée qui permet de visualiser la qualité de cette approximation. L'erreur de l'interpolation de la fonction de déplacement est donnée selon le théorème suivant [Bouamrane et al, 12] :

Théorème :

- Si f est une fonction $n+1$ dérivable sur $[a; b]$, $\forall x \in [a; b]$:
- I le plus petit intervalle fermé contenant x et les x_i ;
- $\varphi(x) = (x-x_0) * (x-x_1) * \dots * (x-x_n)$;
- Alors, il existe $\xi \in I$ tel que $e(x) = \frac{f^{(n+1)}}{(n+1)!}(\xi) \varphi(x)$
- NB : ξ dépend de x .

Donc l'erreur $E(x)$ d'approximation de la fonction de déplacement $P(x)$ dans notre cas d'étude est donnée comme suit :

$$E(x) = \frac{f^{(n+1)}}{(n+1)!}(\xi) \varphi(x)$$

Avec $\varphi(x) = (x-x_0) * (x-x_1) * \dots * (x-x_n)$;

$$I \in [\min(x_0, x_n), \max(x_0, x_n)]$$

Où $P(t)$ est dérivable $n+1$ sur $[x_0; x_n]$, et ξ dépend de x .

Pour minimiser cette erreur, nous proposons de décomposer le chemin non linéaire d'une ligne donnée en un ensemble de petits tronçons linéaires pour pouvoir tracer la courbe d'une

façon plus proche de la réalité, figure (3.9). Ici, nous définissons un pas " H " exprimant la longueur de chaque tronçon que nous faisons varier pour avoir une erreur d'interpolation minimale.

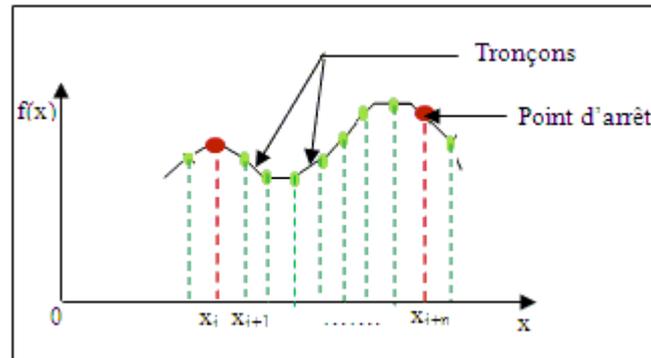


Figure 3.9 : Décomposition du chemin en un ensemble de tronçons

Dans le milieu urbain, plusieurs contraintes influent sur la vitesse de circulation des véhicules. Dans notre étude, Sur chaque segment linéaire du trajet, figure (3.9), la vitesse de circulation des véhicules varie d'un point à un autre avec une accélération fixe par segment, figure (3.10).

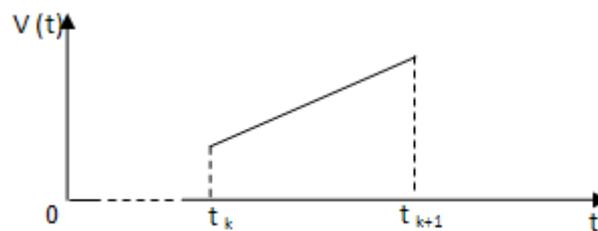


Figure 3.10 : Modélisation de la vitesse $V(t)$ sur un segment du trajet

La vitesse $V(t)$ du bus sur le trajet est variable La vitesse varie avec une accélération A fixe par segment (tronçon). V_0 représente la vitesse initiale du véhicule. La vitesse commerciale $V(t)$ est limitée à 50 km/h.

La vitesse dépend de l'accélération et de la nature de la ligne. L'accélération est définie expérimentalement en fonction des variables appelées perturbateurs qui peuvent arriver au cours d'une course par exemple : la densité de la circulation, les intempéries, un accident de la route, flux important de passagers, une panne ou immobilisation temporaire (avarie) d'un véhicule, heures de pointes, évènements spéciaux (passage d'un cortège VIP, fêtes, travaux), etc.

Dans notre étude, une course est définie comme étant une course partielle, c'est-à-dire, le trajet entre deux terminus extrêmes (en aller ou en retour). Le modèle proposé permet de modéliser le déplacement d'un bus durant tout le trajet à partir de l'arrêt de départ jusqu'à l'arrêt terminus d'arrivée, cela signifie qu'il suffit juste d'incrémenter le nombre de courses à chaque fois que le bus en question arrive à l'arrêt terminus pour connaître le nombre de courses effectuées par ce dernier au cours de la journée.

L'autre objectif du modèle proposé est de modéliser le fonctionnement d'un *RTU* avec une optimisation de la rentabilité économique qui est un des thèmes les plus posés par les transports en commun, notamment en milieu urbain. En effet, la rentabilité du point de vue économique est souvent considérée comme impossible ou très difficile à atteindre. Mais il semble que l'on puisse aborder d'avantage la viabilité d'un réseau, en le considérant de plusieurs points de vue, notamment par rapport au service qu'il apporte à chacun et à la communauté, en plus de la valeur en espace urbain, où on parle de la rentabilité socio-économique

A cet effet, le calcul de la recette *RC* d'un bus pendant sa mise en service au cours d'une journée est établie selon l'équation ci-dessous, où *NPB* représente le nombre de personnes qui montent à bord à chaque fois que le bus arrive à un arrêt et *PU* indique le prix unitaire qu'un voyageur doit payer.

$$RC_{vl} = RC_{vl} + (NPB * PU)$$

3.3 Etude comparative des modèles proposés

Comme toute modélisation, la modélisation d'un réseau de transport urbain répond avant tout à un besoin de connaissances du phénomène étudié car le modèle permet de donner une représentation simplifiée d'un phénomène complexe, permettant une meilleure compréhension de ses mécanismes internes et des paramètres qui déterminent son évolution. Plusieurs modèles cités précédemment, ont été proposés dans la littérature. Le tableau (3.1) reprend les précédents modèles et les nouveaux identifiés dans la littérature. Les paramètres de comparaison adoptés sont les mêmes que ceux proposés dans [Fayech, 03] [Bouamrane, 06].

	Multimodalité	Surveillance	Demande	Horaires	Itinéraires	Dynamique	Rentabilité économique
Courses				x		x	
Débit	x		x		x		
Itinéraires			x		x		
RdP		x	x		x		
SMA		x		x		x	
ACF	x			x	x		
UML					x		
Réseau		x					
BCMP							
Modèle mathématique		x		x	x	x	x

Tableau 3.1 – Comparaison entre les modèles des réseaux de transport proposés

[Fayech, 03] [Bouamrane, 06]

L'observation du Tableau (3.1) permet de constater qu'aucun modèle n'est adapté à la régulation des réseaux de transport multimodal. Une modélisation hybride serait donc souhaitable. Vu le caractère distribué des réseaux de transport, une modélisation SMA semble efficace, d'autant plus que ce genre de système a déjà fait ses preuves.

Le modèle de représentation du réseau de transport proposé est inspiré des travaux de ChihaiB-Bouzbouz [ChihaiB, 02] concernant une approche floue pour la régulation multimodale dans les RTU appliqués aux interstations et des travaux de Fayech [Fayech, 03] exploitant un algorithme évolutionniste pour la régulation multimodale, des travaux de [Bouamrane, 06] concernant la régulation d'un réseau de transport urbain bi-modal en exploitant un système expert et un raisonnement à base de cas. Notre contribution se situe principalement dans la proposition d'une nouvelle approche pour la régulation d'un RTU. Cette approche à la différence des autres travaux a été adaptée aussi à la reconfiguration du réseau en modélisant l'action « changement d'itinéraires », ce qui n'a jamais été possible jusqu'à maintenant. En effet, tous les travaux recensés font appel à des approches différentes pour traiter la régulation et la reconfiguration. De plus, nous avons pris en considération, les

critères d'évaluation des actions de régulation d'un RTU. Nous les avons implémentés et comparés pour identifier la réalité des évaluations théoriques considérés par les régies de transport et utilisés par les régulateurs. L'annexe (A) est dédiée à la présentation du modèle utilisé.

3.4 Conclusion

Comme toute modélisation, la modélisation du réseau de transport urbain répond avant tout à un besoin de connaissances. Le modèle donne une représentation d'un phénomène complexe, permettant une meilleure compréhension de ses mécanismes internes et des paramètres qui déterminent son évolution.

A travers ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les modélisations des réseaux de transport urbain, et nous avons présenté également une comparaison entre ces modèles afin de nous permettre de choisir, lequel exploité dans notre présente étude.

A travers, les différents critères, il s'avère qu'une modélisation par SMA s'avère adéquate, compte tenu de la distribution du domaine abordé, et des travaux antérieurs aux quels nous référons.

Chapitre 4

Le moteur d'inférence cellulaire pour la régulation d'un réseau de transport urbain

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons une première contribution, en exploitant la machine cellulaire, tout particulièrement le moteur d'inférence cellulaire (Cellular Inference Engine : CIE) à la place et lieu d'un système expert classique, afin d'assurer la régulation d'un RTU. Tout d'abord, il s'agit de montrer qu'il est possible de passer d'une formulation algorithmique (procédurale) vers une formulation sous forme de règles cellulaires (CIE), d'assurer le passage de cette formulation algorithmique vers la règle cellulaire, de montrer l'exploitation de la machine cellulaire pour la régulation d'un RTU, d'illustrer l'ensemble par un exemple de fonctionnement. Enfin, de proposer une étude comparative entre le moteur d'inférence classique et le moteur d'inférence cellulaire.

Actuellement, le réseau de transport urbain considéré dans cette étude est régulé en exploitant différents modules (SBC, RBC classique,...) implémentées dans la plateforme SARRT [Bouamrane et al, 07]. La régulation via un moteur d'inférence cellulaire nécessite une étape de codification que nous présentons dans la section suivante.

4.2 Passage des algorithmes de régulation vers la nouvelle codification (règles cellulaires)

Nous proposons ci-dessous les algorithmes de régulation sous forme procédurale [Bouamrane, 06] et leur équivalent sous forme de règle cellulaire.

Avant de proposer chaque algorithme et sa codification, nous donnons aussi sa définition. Le passage nécessite une étape de codification résumé dans le tableau (4.1).

Paramètres	Notation	Valeurs
Type de perturbation	X1	X1=0 : Panne X1=1 : Retard. X1=2 : Avance.
Intervalle de temps (lt) En minute	X2	X2=0 : lt=2 min X2= 1 : 2<lt=4 min

		X2= 2 : $lt > 4$ min X2= 3 : $lt = < \text{fréquence}$ X2= 4 : $lt = > \text{temps battement}$
Période	X3	X3= 0 : Pointe X3= 1 : Creuse X3= 2 : Relève
Type de transport	X4	X4=0 : Bus X4=1 : Tramway
Capacité	X5	X5=0 : $Ch > CG$ X5=1 : $Ch = < CG$
N°arrêt	X6	X6=0 : N° Arrêt perturbation est donné X6=1 : N° Arrêt perturbation n'est pas donné X6=2 : Arrêt terminus X6=3 : Arrêt Simple
Classe	y	Algo1,Algo2,Algo3,Algo4,Algo5, Algo6,Algo7 ,Algo8,Algo9, A1,A2,A3,A4,A5

Tableau 4.1 : Codification des variables [Amrani et Bouamrane, 10]

Notations :

Capacité : différente d'un véhicule à un autre (standard ou articulé).

CG : charge générale= Capacité/2

Ch : charge du véhicule

Temps de battement : temps d'arrêt d'un véhicule au terminus

An : action de régulation N°n.

Algo N° : Algorithme de régulation N°.

HP : Horaire Perturbation

HR : Horaire Reprise

LigneP : N° Ligne perturbée

NumAR : Numéro Arrêt Reprise

Retard : Durée en minute

Période : Période de la journée (Pointe,

NumAP : Numéro Arrêt Perturbation creuse ou relève)

Remarque : les sorties peuvent être des actions combinées (Algo1, Algo2,...Algo9) ou bien des actions simples (A1, A2,..., A5) [Bouamrane, 06]

4.2.1 Algorithmes de régulation (algorithmes combinés) [Bouamrane, 06]

Les différentes actions implémentées et leur contribution dans les différentes stratégies de régulation sont décrites ci-dessous. Les variables et notations utilisés dans les algorithmes sont proposés en Annexe (B). La règle cellulaire est inscrite après la description de chaque algorithme.

a) Algorithme 1 : Direct en ligne

Définition :

La voiture suit l'itinéraire de la ligne en assurant uniquement les arrêts de descente pour les clients à bord. Elle reprend un service normal (montée et descente de voyageurs) dès que le retard sera résorbé.

Fonction utilisée :

Arret_reprise (Retard, numéro_arrêt_perturbation, numéro_ligne_perturbé) : fonction permettant de retourner l'arrêt de reprise de V_i .

Procédure DirectEnLigne (Entrée : V_i , HP, LigneP, Retard, Période, NumAP ; **Sortie :** HR, NumAR)

Début

Si (V_i à un Retard $\in [2, 4]$ min) **Et** (Période = « creuse ») **Alors**

NumAR = ArretReprise (Retard, NumAP, LigneP) ;

V_i poursuit son itinéraire en assurant uniquement les arrêts de descente jusqu'à un arrêt NumAR;

Déterminer horaire de reprise HR de V_i à l'arrêt NumAR à partir du TM⁴

Fsi

Fin.

Fonction ArretReprise (Retard, NumAP, LigneP): String

⁴ TM : tableau des arrêts avec horaires correspondants.

Var N; // Nombre d'arrêts à ne desservir qu'en descente ;

Début

$N = \text{Retard} / (\text{moitié du temps d'arrêt par station})^5 ;$

$\text{NumAR} = \text{NumAP} + N ;$

Si $\text{NumAR} < T2$

Alors retourner (Rechercher dans TM, l'arrêt NumAR de la ligne LigneP)

Sinon retourner (T2)

Fsi

Fin.

En se référant au tableau (4.1), la règle cellulaire s'énonce tout simplement :

R1 : Si (X1=1) et (X2=1) et (X3=1) alors Algo1.

Où « Algo1 » correspond à un direct en ligne.

b) Algorithme 2 : Demi-tour en ligne

Définition :

Suppression d'une partie de course pour remettre une voiture sur son horaire théorique à un point de retournement, suite à un retard important de cette voiture.

Procédure DemiTourEnLigne (Entrée : V0, V1, V2, HP, LigneP, Retard, ChV1, ChV2 ;

Sortie : HRV0, HRV1, HRV2, NumAR)

Début

Si (V_i à un Retard \approx ⁶ Fréquence) **Et** ($\text{ChV1} \leq \text{Capacité}_1/2$)⁷

Alors Si VérifierCharge (ChV1, ChV2) **Alors**

V_i transborde ses voyageurs vers V_2 ⁸ qui continue jusqu'à T2; V_i fait demi-tour et prend le prochain départ programmé NumAR dans TM à T1;

⁵ Le temps d'attente par arrêt est supposé fixe sur l'ensemble des arrêts du réseau.

⁶ Le retard est équivalent à la fréquence ou ce qui correspond au fait que V2 à rejoint V1,

⁷ La capacité des véhicules est supposée connue pour chaque type de bus (standard ou articulé)

⁸ Si V2 est moins chargé, c'est lui qui transbordera ces voyageurs vers V1.

Retarder départ V_0 à T2 : $HRV_0 = \text{horaire départ programmé TM} + (\text{Retard}/2)$,
 V_0 garde ce retard jusqu'à T1 et reprend départ programmé dans TM;
 Avancer départ V_2 à T2 : $HRV_2 = \text{horaire départ programmé TM} - (\text{Retard}/2)$,
 V_2 garde cette avance jusqu'à T1 et reprend départ programmé dans TM ;

Fsi

Fsi

Fin.

Fonction VérifierCharge (ChV1, ChV2): Booléen

Début

$ChV2 = ChV2 + ChV1$

Retourner ($ChV2 \leq \text{Capacité}_2$)

Fin.

Ceci se traduit en utilisant la codification du tableau (4.1) par :

R2 : Si (X1=1) et (X2=3) et (X5=1) alors Algo2

c) Algorithme 3 : Demi-tour en ligne avec échange de conducteurs et de véhicule

Définition :

La voiture en retard V_1 est rattrapée par la suivante moins chargée V_2 et à l'heure. V_2 transborde ses clients sur la voiture en retard avec échange de conducteurs.

Procédure DemiTourEnLigneEchange (Entrée : $V_0, V_1, V_2, HP, \text{LigneP}, \text{Retard}, ChV1, ChV2, \text{NumAP}, HP$; **Sortie** : HR, NumAR)

Début

Si (V_1 à un Retard \approx Fréquence) **Et** ($ChV1 \leq \text{Capacité}_1/2$)

Alors Si VérifierCharge ($ChV2, ChV1$) **Alors**

V_2 transborde ses voyageurs vers V_1 ⁹ ;

Permutation des numéros véhicules (V_1 devient V_2 et V_2 devient V_1) ;

Permutation des conducteurs de V_1 et V_2 ;

V_2 continue selon horaire TM jusqu'à T2;

⁹ Si V_1 est moins chargé, c'est lui qui transbordera ces voyageurs vers V_2 .

V_i fait demi-tour vers T1 et prend un départ programmé dans TM,
NumAR = NomRepriseC (Retard, HP, NumAP) ;
Déterminer horaire de reprise HR de V_i à l'arrêt NumAR à partir du TM.

Fsi

Fsi

Fin.

Fonction NomRepriseC (Retard, HP, NumAP): String

Var

HorAr // Horaire estimé arrivé V_i après demi-tour,
DurN // Durée estimée du trajet de retour incluant le retard.

Début

DurN= Retard + durée trajet V_i jusqu'à T1 (calculer à partir de TM) ; HorAr = HP +
DurN ;

Si HorAr \in [horaire d'arrivée V_i à T1, horaire départ V_i à T1]

Alors retourner (T1)

Sinon retourner (Rechercher dans TM l'arrêt de départ de
 V_i correspondant à HorAr)

Fsi

Fin.

Ceci se traduit en utilisant la codification du tableau (4.1) par :

R3 : Si (X1=1) et(X2=3) et (X5=1) et(X6=0) alors Algo3

d) Algorithme 4 : Dépassement et service en descente uniquement

Définition :

Une voiture en retard est rattrapée par la suivante à l'heure. La deuxième passe devant la première et assure le service normalement. La voiture dépassée continue la course mais n'assure que les arrêts en descente.

Procédure DépassementEtServiceEnDescenteUniquement (Entrée : V0, V1, V2, HP, LigneP, Retard ; Sortie: HA, HRV1)

Var

HA // Horaire arrivé,

HPgm // Horaire programmé départ dans TM,

Début

Si V1 à un (Retard \approx Fréquence) **Et** (Fréquence élevée (≤ 8 minutes))

Alors

V₂ dépasse V₁ et continue son itinéraire jusqu'à T2 ;

V1 n'assure que les arrêts en descente jusqu'à T2 et retourne HLP au terminus T1 ;

Déterminer horaire arrivé (HA) de V1 à T1 ;

Fsi

Si HA \leq HPgm

Alors HRV1 = HPgm;

Sinon Répéter

Retard1 = Retard - TempsB

Retarder tous les bus qui suivent le véhicule perturbé de Retard1 en gardant le même intervalle (entre les bus)

Jusqu'à résorber le retard engendré;

HRV1 = HPgm + Retard1

Fsi**Fin.**

Ceci se traduit en utilisant la codification du tableau (4.1) par :

R4 : Si (X1=1) et(X2=3) alors Algo4

e) Algorithme 5 : Départ retardé au terminus**Définition :**

Dans le cas où une voiture à un retard supérieur à son temps de battement au terminus d'arrivée, on retarde la voiture précédente au terminus d'arrivée de la moitié de la valeur du retard réel au départ réel de la voiture en retard.

Procédure DépartRetardéTerminus (Entrée : V1, LigneP, Retard ; **Sortie** : HRV0, HRV1)

Début

Si V1 à un (Retard \geq TempsB) **Et** (Retard \leq Fréquence) **Alors**

Retarder V₀ à T2 de Retard/2,

HRV0 = Horaire départ programmé à T2 + Retard/2, V₀ gardera ce retard jusqu'au retour à T1;

V1 continuera jusqu'à T2, reprend aussitôt des voyageurs (pas de temps de battement) et retourne vers T1,

HRV1 = Horaire départ programmé à T2 - Retard ;

Fsi

Fin.

Ceci se traduit en utilisant la codification du tableau (4.1) par :

R5 : Si (X1=1) et(X2=4) et (X2=3) alors Algo5

f) Algorithme 6 : Echange conducteurs et véhicules

Définition :

Une voiture en retard est rattrapée par la voiture qui la suit. Transbordement des voyageurs de la seconde voiture vers la première qui est plus chargée et échange de conducteurs et des numéros véhicules.

Procédure EchangeConducteursVéhicules (Entrée : Retard, ChV1, ChV2 ; Sortie : HRV1)

Var

HA // Horaire arrivé,

HPgm // Horaire programmé départ dans TM,

Début

Si V_1 à un (Retard \approx Fréquence) **Et** (VérifierCharge (ChV1, ChV2))¹⁰ **Alors**
 V_2 transborde ses voyageurs vers V_1

Permutation des numéros de véhicules (V_2 devient V_1 , et V_1 devient V_2)
 V_1 retourne HLP et HRV1 = Départ programmé au TM à T1 ;

Fsi

Fin.

Ceci se traduit en utilisant la codification du tableau (4.1) par :

R6 : Si (X1=1) et(X2=3) et X5 alors Algo6

¹⁰ Voir b) demi-tour en ligne pour la fonction VérifierCharge (ChV1, CHV2)

g) Algorithme 7 : Remise à l'heure par réserve et disponible**Définition :**

Injection d'une réserve (véhicule) et d'un disponible (conducteur) sur l'horaire théorique d'une voiture en retard ou en panne.

Algorithme_remise_heure_reserve_disponible (Entrée : V1, LigneP, Panne ;
Sortie HRV1)

Début

Si V_i en panne

Alors

Déterminer la réserve la plus proche du lieu de la perturbation (terminus ou dépôt) ;

Injecter réserve sur horaire de V1 (HRV1) à partir du TM et transbordement de voyageurs vers la réserve;

Permuter numéro réserve avec numéro du véhicule V1.

Fsi**Fin.**

Ceci se traduit en utilisant la codification du tableau (4.1) par :

R7 : Si (X1=0) alors Algo7

h) Algorithme 8 : Départ programmé (Régulation en terminus) [Cure et Foraste, 84]**Début**

Si Retard >= temps Battement **Et** Prochain Arrêt = Terminus **Alors**

« Retarder tous les bus qui suivent le véhicule perturbé en gardant le même intervalle (entre les bus) jusqu'à résorber le retard engendré »

Fsi**Fin.**

Ceci se traduit en utilisant la codification du tableau (4.1) par :

R8 : Si (X2= 4) et (Arrêt = Terminus) alors algo8

i) Algorithme 9 : Régulation en ligne [Cure et Foraste, 84] se traduit conformément au tableau (4.1) par **R9 : Si (X2= 4) et (Arrêt < Terminus) alors algo9**

4.2.2 Actions de régulation (Action simple)

Les différentes actions proposées ci-dessous sont extraites des travaux de [Bouamrane, 06]. Leur traduction en règle cellulaire est comme suit :

a) Action 1 : Avancer le véhicule (attendu)

Demander au conducteur d'accélérer afin de résorber son retard à la correspondance, se traduit par **R10 : Si (X1=1) alors A1**

b) Action 2 : Retarder le véhicule

Demander au conducteur de ralentir suite à une avance par rapport à l'heure théorique, et ainsi arriver juste à l'heure de la correspondance. Cette action se traduit par

R11 : Si (X1=2) alors A2.

c) Action3 : Injecter un véhicule

Le régulateur demande l'injection d'un véhicule, en cas d'absence de véhicule assurant la correspondance ou si le véhicule a atteint une charge maximale se traduit par

R12 : Si (Demd Trpt) alors A4

d) Action 4 :N'appliquer aucune action

Aucune action n'est prise si la perturbation avec un retard ne dépasse pas le temps de battement. Cette action se traduit par **R13 : Si (X1=1) et(X2=0) alors A3**

e) Action 5: Injecter un conducteur

Le régulateur demande l'injection d'un conducteur en cas d'absence de conducteur ou un malaise rencontré. Cette action est équivalente à **R14 : Si (Pers Cond) alors A5**

4.3 Exploitation du Moteur d'inférence cellulaire

La base de connaissances est représentée par les couches *Celfait* et *Celrègle*. Initialement, toutes les entrées des cellules dans la couche *Celfait* sont passives ($EF = 0$), exceptées celles qui représentent la base des faits initiale ($EF(1) = 1$).

En considérant la machine cellulaire CASI et le tableau (4.1) où nos variables d'entrées et de sorties sont identifiées à l'avance, les relations d'entrée et de sortie seront notées comme suit [Amrani et Bouamrane, 10]:

- la relation d'entrée, notée $i RE j$, est formulée comme suit : $\forall i \in [1; 33], \forall j \in [1; 14]$, si (le Fait i e à la Prémisse de la règle j) alors $RE(i; j) \leftarrow 1$.
- la relation de sortie, notée $i RE j$, est formulée comme suit : $\forall i \in [1; 33], \forall j \in [1; 14]$, si (le Fait i e à la Conclusion de la règle j) alors $RS(i; j) \leftarrow 1$.
- les matrices d'incidence RE et RS représentent la relation entrée/sortie avec 33 faits et 14 règles.

Représentation des règles cellulaires (codifiées) à partir des algorithmes de régulation, tableau (4.2).

➤ Matrice d'incidence d'entrée (RE)

RE	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14
X1=0							1							
X1=1	1	1	1	1	1	1		1		1				
X1=2									1					
X2=0										1				
X2=1	1													
X2=2														
X2=3		1	1	1	1	1								
X2=4					1								1	1

X3=0														
X3=1	1													
X3=2														
X4=0														
X4=1														
X5=0														
X5=1		1	1											
X6=0			1											
X6=1														
X6=2												1		
X6=3													1	
Algo1														
Algo2														
Algo3														
Algo4														
Algo5														
Algo6														
Algo7														
Algo8														
Algo9														
A1														
A2														
A3														
A4														
A5														

Tableau 4.2 : Matrice d'incidence d'entrée

➤ **Matrice d'incidence de sortie (RS)**

RS	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14
X1=0														
X1=1														
X1=2														
X2=0														

X2=1														
X2=2														
X2=3														
X2=4														
X3=0														
X3=1														
X3=2														
X4=0														
X4=1														
X5=0														
X5=1														
X6=0														
X6=1														
X6=2														
X6=3														
Algo1	1													
Algo2		1												
Algo3			1											
Algo4				1										
Algo5					1									
Algo6						1								
Algo7							1							
Algo8								1						
Algo9									1					
A1										1				
A2											1			
A3												1		
A4													1	
A5														1

Tableau 4.3 : Matrice d'incidence de sortie

Les 33 faits et les 14 règles apparaissant dans les intervalles sont extraits du tableau (4.1)

[Amrani et Bouamrane, 10].



4.4 Exemple de fonctionnement

Pour illustrer l'architecture et le principe de fonctionnement de l'automate cellulaire, nous proposons l'exemple de la figure (4.1).

<p>Base de connaissance</p> <p>R1 : Si (X1=1) et (X2=1) et (X3=1) alors Algo1</p> <p>R2 : Si (X1=1) et(X2=3) alors Algo4</p> <p>R3 : Si (X1=0) alors Algo7</p> <p>R4 : Si (X1=1) alors A1</p> <p>R5 : Si (X1=2) alors A2</p>
--

Figure 4.1 : Base de connaissances symboliques

Les données relatives à cette base de connaissances, figure (4.1) sont représentées sous forme de règles codifiées au niveau des matrices d'incidence d'entrée et de sortie, tableau (4.4) et tableau (4.5).

Les données relatives à cette base de connaissances sont détaillées ci-dessous :

- **Si (X1=1) et (X2=1) et (X3=1) alors Algo1**

Type de perturbation : Retard (X1=1).

Valeur retard =3minutes. (X2=1).

Retard<= Fréquence (X2=3).

Période : Creuse (X3= 1).

Type de transport : Bus (X4=0).

- **Si (X1=1) et(X2=3) alors Algo4**

Type de perturbation : Retard (X1=1).

Retard<= Fréquence (X2=3).

Type de transport : Bus ($X4=0$).

- Si ($X1=0$) alors Algo7

Type de perturbation : Panne ($X1 =0$).

- Si ($X1=1$) alors Act1

Type de perturbation : Retard ($X1=1$).

- Si ($X1=2$) alors Act2

Type de perturbation : Avance ($X1=2$).

	R1	R2	R3	R4	R5
X1=0			1		
X1=1	1	1		1	
X1=2					1
X2=1	1				
X2=3		1			
X3=1	1				
Algo1					
Algo4					
Algo7					
A1					
A2					

Tableau 4.4 : Matrice d'incidence d'entrée RE

	R1	R2	R3	R4	R5
X1=0					
X1=1					
X1=2					
X2=1					
X2=3					
X3=1					
Algo1	1				
Algo4		1			
Algo7			1		
A1				1	
A2					1

Tableau 4.5 : Matrice d'incidence de sortie RS

Pour rappel, les notations suivantes sont adoptées dans l'ensemble de cette étude.

EF : entrée du fait ;

ER : entrée de la règle.

IF : état interne du fait ;

IR= état interne de la règle (1: par défaut

(correspond au coefficient de probabilité) ;

SF : sortie du fait ;

SR : sortie de la règle (SR=1 : toute règle est candidate

Supposons que la perturbation est relative aux données suivantes :

Panne (X1=0) ;

Retard (X1=1) ;

Retard =4min (X2=2) ;

Fréquence =15min (X2=3).

Dans la configuration initiale, uniquement les faits (X1=0), (X1=1), (X2=2), (X2=3) sont établis, donc EF[i]=1 ;

Le tableau (4.6) correspond à la phase d'initialisation du moteur d'inférence cellulaire.

	EF	IF	SF
X1=0	1	1	0
X1=1	1	1	0
X1=2	0	1	0
X2=2	1	1	0
X2=3	1	1	0
X3=1	0	1	0
Algo1	0	1	0
Algo4	0	1	0
Algo7	0	1	0
A1	0	1	0
A2	0	1	0

Celfait

	ER	IR	SR
R1	0	1	1
R2	0	1	1
R3	0	1	1
R4	0	1	1
R5	0	1	1

Celrègle

Tableau 4.6 : Configuration initiale de CASI

4.4.1 Application de la fonction de transition δ fait

Par l'application de la procédure de CASI (la sélection), seuls les faits établis et non incertains peuvent participer à l'étape de filtrage, le SF (sortie des faits) reçoit la valeur initiale d' EF (entrée des faits), tableau (4.7).

Le ER (entrée des règles) est obtenu selon la règle δ fait : $ER = ER \text{ (initiale)} + (R^T E * EF)$, comme le montre le tableau (4.7),

	EF	IF	SF
X1=0	1	1	1
X1=1	1	1	1
X1=2	0	1	0
X2=2	1	1	1
X2=3	1	1	1
X3=1	0	1	0
Algo1	0	1	0
Algo4	0	1	0
Algo7	0	1	0
Act1	0	1	0
Act2	0	1	0

Celfait

	ER	IR	SR
R1	0	1	1
R2	1	1	1
R3	1	1	1
R4	0	1	1
R5	0	1	1

Celrègle

Tableau 4.7 : Configuration d'évaluation, sélection et filtrage après δ fait

Dans l'étape « filtrage » de CASI, le moteur d'inférence compare la partie déclencheur des règles par rapport à l'ensemble des faits établis.

Dans l'exemple proposé, nous avons obtenu par le biais du système deux règles R2, R3, candidates (donc leurs états d'entrée (ER) reçoivent la valeur 1), tableau (4.8).

4.4.2 Application de la fonction de transition δ règle (exécution)

Cette étape permet de fixer une ou plusieurs règles qui doivent être effectivement déclenchée. Dans notre cas ce sont les règles R2, R3 qui ont été sélectionnées. Par conséquent, la sortie SR de ses règles reçoit la valeur 0, tableau (4.8).

	EF	IF	SF
X1=0	1	1	1
X1=1	1	1	1
X1=2	0	1	0
X2=2	1	1	1
X2=3	1	1	1
X3=1	0	1	0
Algo1	0	1	0
Algo4	0	1	0
Algo7	0	1	0
Act1	0	1	0
Act2	0	1	0

	ER	IR	SR
R1	0	1	1
R2	1	1	0
R3	1	1	0
R4	0	1	1
R5	0	1	1

Celrègle

Celfait

Tableau

4.8 : Configuration de l'exécution après δ règle

Le système d'aide à la régulation obtient le résultat sous forme codifiée qui sera transformé sous forme textuelle pour être exploité par le régulateur. Enfin, c'est au régulateur de choisir la solution la plus adéquate compte tenu de son savoir-faire et des évaluations qui lui sont proposées. Les évaluations portent sur cinq critères comprenant : le gain en ponctualité, le gain en régularité, le gain en correspondance, cout commercial et satisfaction passagers [Bouamrane et al, 07].

4.5 Etude comparative entre moteur d'inférence classique et cellulaire.

Afin d'établir cette comparaison, nous avons jugé utile de déclencher pour la même perturbation le moteur d'inférence classique et le moteur d'inférence cellulaire. Les résultats obtenus sont exposés ci-dessous.

4.5.1 Scénario

Soit une perturbation qui touche le véhicule N° V25 sur la ligne avec un retard équivalent à 11 min et une charge en passagers correspondant à 11 passagers. Ces informations sont accessibles via le système d'aide à l'exploitation [Cure et Foraste, 84] du réseau de transport urbain.

4.5.2 Résultats obtenus

Le moteur d'inférence cellulaire nous propose quatre solutions :

- Demi-tour en ligne
- Demi-tour en ligne avec échange de conducteur et de véhicule
- Echange conducteur et véhicules
- Régulation en ligne

A la différence, le moteur d'inférence classique, propose uniquement trois solutions :

- Echange conducteur et véhicules,
- Remise à l'heure et disponible,
- Régulation en ligne.

Le premier constat concernant le nombre de solutions est justifié par le fait que le moteur d'inférence cellulaire déclenche toutes les règles potentielles sans se soucier du détail de la configuration. Ceci est pallié en intégrant une fonction de probabilité pour la classification des décisions en fonction des critères d'évaluation proposés [Bouamrane et al, 05].

Le second constat concernant la différence dans certaines solutions, est dû principalement au fait que les règles du moteur d'inférence classique prennent en considération tous les paramètres de régulation envisagés dans les procédures de régulation utilisées pour la

construction du MI classique à la différence du moteur d'inférence cellulaire qui lui déclenche toutes les règles potentielles.

4.5.3 Synthèse

La comparaison entre le moteur d'inférence classique et le moteur d'inférence cellulaire d'un point de vue représentation de connaissances, moyens contrôles et mécanismes d'inférence nous a permis de souligner les points suivants :

- 1) Du point de vue représentation des connaissances, et en tenant compte que le moteur d'inférences classique traite les connaissances dans leurs états symboliques, nous remarquons que le moteur d'inférence cellulaire n'exploite ces connaissances qu'à travers leurs codes, ce qui permet de gagner de l'espace mémoire.
- 2) En ce qui concerne les opérations du moteur d'inférence classique (opération d'adjonction, de suppression) et les actions de contrôle (le chaînage avant, le chaînage arrière et l'arrêt définitif de l'inférence), CASI a pu les réaliser, et donc il fournit à l'utilisateur des moyens de contrôle pour gérer sa base de connaissances.
- 3) Enfin, pour les mécanismes d'inférences, nous devons remarquer une richesse non négligeable du côté du moteur d'inférence cellulaire CIE, ceci est visible à travers les schémas d'inférence : le chaînage arrière dans CIE utilise les mêmes procédures que le chaînage avant avec une simple permutation au niveau des matrices d'entrée/sortie. Par contre, le moteur d'inférence classique nécessite un algorithme de chaînage arrière complètement différent de celui du chaînage avant. En plus de cela, CIE offre à l'utilisateur un choix concernant le mode de fonctionnement à utiliser : il fonctionne avec une stratégie révoicable, comme il peut fonctionner en mode irrévocable, tandis que le moteur classique ne fonctionne qu'avec un régime irrévocable.

4.6 Conclusion

Au terme de ce chapitre nous avons présenté, la description des différents algorithmes de régulation, le tableau de correspondance entre actions de régulation classique et règles cellulaire, et enfin, la mise en application du Moteur d'inférence cellulaire.

Un exemple illustratif et une étude comparative, nous ont permis de situer l'apport du moteur d'inférence cellulaire par rapport au moteur d'inférence classique.

Le chapitre suivant est consacré à l'exploitation de la machine cellulaire pour simuler le raisonnement à base de cas.

clickours.com

Chapitre 5

Introduction générale

Ce chapitre se décline en deux parties, la première partie est consacrée à la régulation, en adoptant la machine cellulaire au raisonnement à base de cas. La deuxième partie par contre, est consacrée à la reconfiguration du réseau de transport urbain, et ceci à travers l'exploitation de la machine cellulaire pour implémenter une action de déviation (modification de l'itinéraire commercial) qu'est le « changement d'itinéraire ».

Partie 1 : Exploitation de l'indexation cellulaire pour un Raisonnement à Base de Cas

5.1 Introduction

L'objectif de cette partie est de proposer notre deuxième contribution consistant en l'amélioration de l'indexation des cas en exploitant la machine cellulaire pour un raisonnement à base de cas. Le résultat du calcul de similarité entre les perturbations est affiné par un processus d'indexation cellulaire. Ce raffinement se fait par un langage de modélisation booléenne (BML) adopté par un moteur d'inférence cellulaire (CIE) cœur de la machine CASI (Cellular Automaton for Symbolic Induction), [Atmani et Beldjilali, 07]. La finalité de cette démarche booléenne est double : d'une part, réduire la complexité de stockage et le temps de réponse [Amrani et al, 09b] [Amrani et Bouamrane, 10]

Le chapitre aborde tout d'abord, l'exploitation du RBC avec une indexation classique. Ensuite, le passage vers une indexation cellulaire. Nous présentons les modifications apportées à la machine CASI afin de pouvoir prendre en considération le processus d'indexation. Enfin, nous terminons par une interprétation des résultats sur la base des résultats expérimentaux obtenus.

Ce module a fait l'objet d'une modification majeure au niveau d'une de ses phases de fonctionnement en intégrant une indexation cellulaire [Amrani et al, 11] au lieu d'une indexation par situation comportementale

5.2 Exploitation d'un RBC avec une indexation classique : Exemple illustratif

Le raisonnement à base de cas a été exploité par différents auteurs [Brezillon et al, 03] [Brezillon et al, 00] [Brezillon et al, 99] [Fuchs et al, 99] [Fuchs et al, 97].

La plateforme SARRT, intègre actuellement un module de régulation via un raisonnement à base de cas (RBC), [Bouamrane et Amrani, 07]. Ce module RBC intègre actuellement au niveau de l'étape recherche et classification, une indexation par situation comportementale [Jaczynski et al, 97]. Nous proposons, dans ce travail de modifier cette méthode par une indexation cellulaire en exploitant la machine cellulaire CASI. Dans ce qui suit nous montrons le fonctionnement du RBC avec une indexation classique, ensuite une indexation cellulaire avec le même exemple illustratif.

La construction d'un système à base de cas passe par cinq étapes [Lamontagne et Lapalme, 02]. A cet effet, nous proposons l'exemple illustratif ci-dessous qui reprend en détail ces étapes.

Soit une perturbation qui affecte le bus N° 02 sur la ligne N°11, les conséquences de cette perturbation est un retard du véhicule à quelques mètres du prochain arrêt appelé « Valéro».

5.2.1 Construction des cas (cas = perturbation)

La construction des cas correspond à la localisation de la perturbation à traiter ainsi que ces différentes caractéristiques obtenues via le SAE. Nous pouvons citer parmi ces caractéristiques : la même ligne, l'arrêt suivant, la durée, la période de la journée, etc.

N°d'ordre	Ligne	N° véhicule	Arrêt suivant	perturbation	durée	Horaire
06	11	02	Valéro	retard	10	13 : 53 : 04

Tableau 5.1 : Paramètres de la perturbation issue du SAE ou appel Radio
(Identification de la perturbation)

5.2.2 La recherche ou remémoration

Il s'agit de rechercher les cas similaires. Cela se traduit comme suit : Etant donné $Pb1$, une nouvelle perturbation acquise (*cible*) via le SAE ou un appel radio et $Pb2$, la perturbation présente dans la base de cas (*source*).

Chaque cas-source (perturbation) enregistré devient une solution source pour la base de cas. A ce stade, on lui associe un index $indx(source)$. Une solution source est ajoutée à la

hiérarchie en considérant un seuil à partir duquel elle peut être retenue dans la hiérarchie. Ce seuil est établi sur la base d'un certain nombre de paramètres, tableau (5.2).

Paramètres	Retard	Localisation	Période	Mode de transport
Seuil	± 2 min	\pm soit un arrêt précédent, soit un arrêt suivant sauf si c'est le terminus	même période (horaire de la perturbation)	même mode de transport

Tableau 5.2 : Paramètres et seuils adoptés pour l'étape recherche

Le calcul de la similarité dans le cas de la régulation d'un RTU est basé sur six données, les quatre proposées dans le tableau (5.2), plus deux paramètres concernant le calcul des distances par rapport au prochain arrêt et au prochain terminus [Amrani et al, 11].

Cette étape consiste à chercher les cas similaires dans la base de cas (**base-de-cas**). Deux cas sont dits similaires s'ils présentent des valeurs identiques pour les paramètres de similarité (**N° ligne, type de la période, type de la perturbation, type de véhicule et durée de la perturbation ± 2 min**).

La recherche des cas similaire

Entrée : Paramètres de similarité

1. Rechercher la table (Tab) des cas similaires \in Base-de-cas qui présentent des valeurs identiques à ceux de la perturbation (paramètres de similarité).
 2. **Si** Tab $\neq \emptyset$ **alors**
 3. Afficher « pas de cas similaire (s) »
 4. **Sinon** afficher « le(s) cas similaire(s) sont : »
-

Dans le cas de notre exemple, la recherche des perturbations similaires en exploitant les paramètres du tableau (5.2) a permis :

- de trouver trois cas dont les numéros d'ordre dans la liste des perturbations sont (34, 36, 37), figure (5.1).
- Les autres cas ne sont pas retenus, car ils ne correspondent pas aux critères comme par exemple : le cas N°38 ou la durée n'appartient pas à l'intervalle [8min, 12min] correspondant à l'ajout et la soustraction de 2 min par rapport à 10 min de retard détectée.

N°ordre	Ligne	N°véhicule	Arré-suiv	Type	Durée	Période
70	34	6	IGMO	retard	10	H.pointe

Base de cas

N°ordre	Ligne	N°véhicule	Arré-suiv	Type	Durée	Période
33	34	23	Elmorchid	panne	13	H.creuse
34	34	5	CPA	retard	8	H.pointe
35	U	111	IGMO	retard	10	H.creuse
36	34	13	Cherfaoui	retard	12	H.pointe
37	34	98	Valéro	retard	10	H.pointe
38	11	16	ADL	retard	4	H.pointe

Figure 5.1 : Identifier les perturbations similaires

Ensuite, nous procédons à la recherche des *solutions* des cas similaires trouvés, en fonction du N° ordre (N° index), dans notre exemple, pour la ligne N° 34, nous avons deux solutions pertinentes (échange conducteurs et véhicules, demi-tour en ligne), figure (5.2).

5.2.3 Adaptation

Dans la phase d'adaptation, le système RBC aide l'utilisateur à modifier et à réutiliser les solutions de ces cas pour résoudre son problème courant.

Le RBC choisit le cas similaire le plus proche : par exemple, dans notre cas le véhicule N° 34 est le plus proche. Enfin, le RBC propose sur la base d'une approche multicritère, la solution la mieux adaptée au cas le plus proche du module RBC implémenté sur la plateforme SARRT. Nous schématisons l'indexation des solutions par la structure proposée dans la figure (5.2).

Sélection du cas similaire le plus proche

Entrée : La table (Tab) des cas similaire

Sortie : N°d'ordre du cas similaire le plus proche

1. Rechercher le cas similaire \in Tab le plus proche
/* la durée détermine le cas similaire le plus proche */
 2. **Retourner** le N°d'ordre du plus proche cas
-

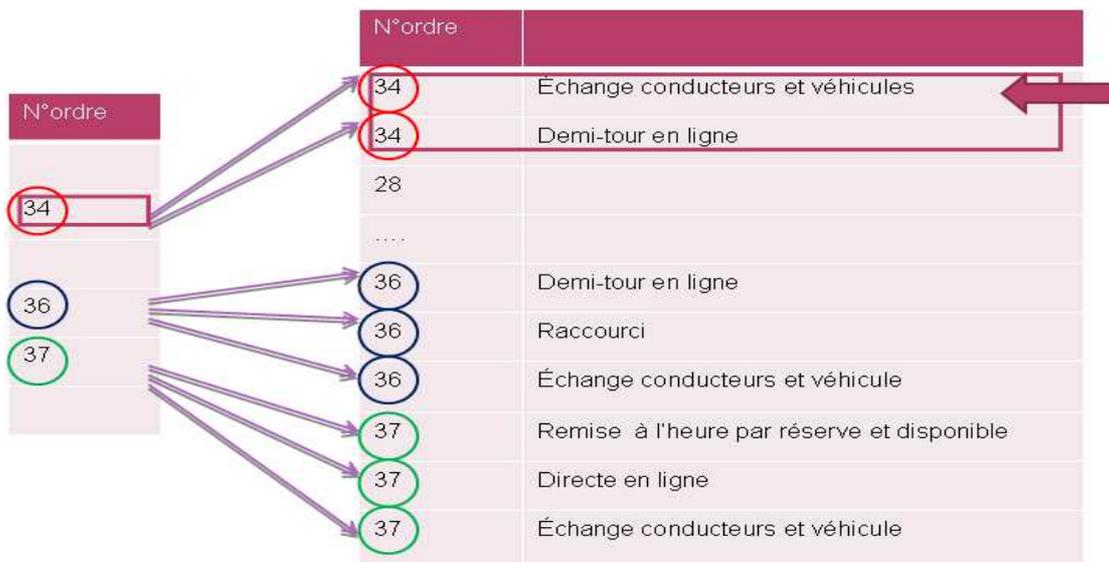


Figure 5.2 : Fonctionnement du RBC classique

Dans la figure (5.3), les P_i représentent les perturbations et les A_i (N° ordre) représentent les solutions (les actions de régulation).

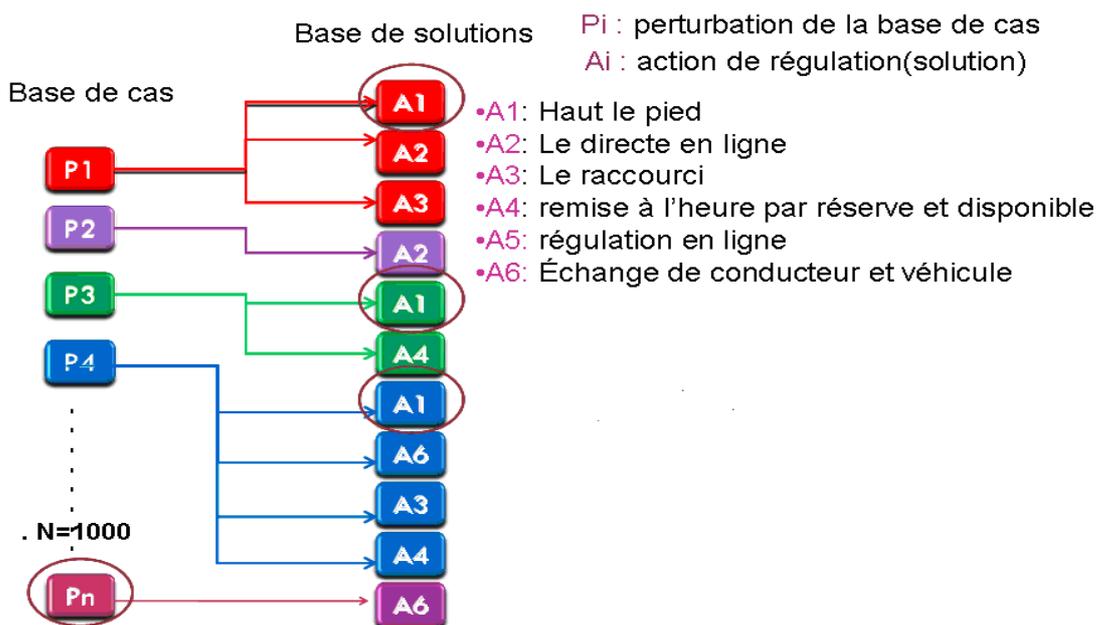


Figure 5.3 : Indexation classique dans un RBC

La figure (5.3) nous permet d'identifier deux problèmes que pose l'indexation classique :

- La duplication : les solutions (actions de régulations) se répètent plusieurs fois dans la base de solutions, exemple de des cas A1, A2 ou A3.

- La saturation de la base de solution : puisque chaque cas (perturbation) peut posséder plusieurs solutions (actions de régulation). Ceci peut induire une explosion combinatoire.

Pour pallier à ces deux problèmes, nous recourons aux automates cellulaires, et tout particulièrement la machine cellulaire CASI. Cette dernière nous évitera l'utilisation de la base de solutions, afin de dépasser les limites de l'indexation classique.

5.2.4 Révision ou Vérification

Cette étape poursuit deux buts complémentaires [Lamontagne et Lapalme, 02] à savoir : évaluer la pertinence de la solution proposée selon des critères de réussite spécifiques au problème et vérifier que la solution ne contredit pas des règles générales qui doivent toujours être vérifiées par exemple. Dans le cadre du RBC classique proposé pour la régulation, la révision consiste à évaluer de nouveaux les trois indicateurs permettant d'assurer la qualité de service à savoir le gain en ponctualité, le gain en régularité et le gain en correspondance.

5.2.5 Maintenance ou Apprentissage

Les concepteurs doivent préconiser certaines stratégies pour intégrer de nouvelles solutions dans la base de cas et pour modifier les structures du système RBC pour en optimiser les performances. Dans le cas actuel du travail, l'ensemble des solutions adaptées et révisées sont incluses dans la base de cas en respectant l'index de la perturbation.

5.3 Passage d'une indexation par situation comportementale à une indexation cellulaire

Tout en gardant le même exemple illustratif, nous proposons ci-dessous comment assurer le passage d'une indexation classique vers une indexation cellulaire. Pour cela, il faut d'abord construire des règles (en spécifiant la prémisse et la conclusion de chaque règle).

Règle : prémisse → conclusion

La prémisse représente la perturbation et la conclusion représente les solutions de cette perturbation.

La représentation la plus logique serait d'affecter à chaque cas une règle, soit par exemple, le cas P1, ses solutions sont par exemple A1, A2, A3 (pour illustrer notre proposition). Avec Ai, les actions de régulation, par conséquent, la règle devient $P1 \rightarrow A1, A2, A3$, figure (5.4).

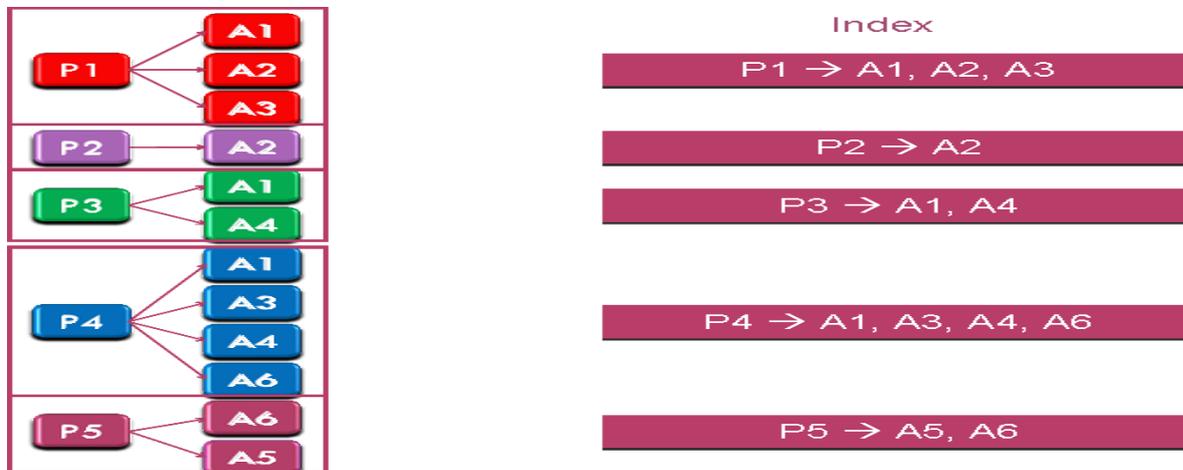


Figure 5.4 : Construction de la base d’indexation en considérant la représentation classique des perturbations/actions [Amrani et Bouamrane, 10]

Dans ce qui suit, nous décrivons le déroulement du processus d’indexation sur un exemple. Le processus d’indexation ne concerne que la phase « recherche » du cycle d’un RBC (section 5.2.2). Supposons que notre base d’indexation se compose de 5 perturbations et 6 actions qui se répartissent sur 5 règles. La figure (5.5) récapitule l’exemple de la base de connaissances.

Base perturbation/solutions		
P1	$\rightarrow A1, A2, A3$	I1
P2	$\rightarrow A2$	I2
P3	$\rightarrow A1, A4$	I3
P4	$\rightarrow A1, A3, A4, A6$	I4
P5	$\rightarrow A6, A5$	I5

Figure 5.5 : Un exemple de base de connaissances

En exploitant le principe cellulaire, avec ces 5 règles, nous obtenons la configuration initiale du CIE. Nous utilisons la notation d'index I1, I2, I3, I4 et I5, figure (5.6) pour respecter la terminologie du RBC. Ainsi que l'appellation Celindex au lieu de Celrègle. Pour Celfait, nous gardons la même dénomination.

1 Initialisation		Celfait			Celindex		
		EF	IF	SF	EI	I1	S1
(I1)	P1 → A1, A2, A3	0	1	0	I1	0	1
(I2)	P2 → A2	0	1	0	I2	0	1
(I3)	P3 → A1, A4	0	1	0	I3	0	1
(I4)	P4 → A1, A3, A4, A6	0	1	0	I4	0	1
(I5)	P5 → A5, A6	0	1	0	I5	0	1
	A1	0	1	0			
	A2	0	1	0			
	A3	0	1	0			
	A4	0	1	0			
	A5	0	1	0			
	A6	0	1	0			

Figure 5.6 : Configuration initiale du CIE/ Passage de l'indexation classique vers l'indexation cellulaire [Amrani et Bouamrane, 10]

La figure (5.6), montre comment la base de connaissance extraite à partir de la base d'indexation est représentée par les couches Celfait et Celindex. Initialement, toutes les entrées des cellules dans la couche Celfait sont passives (EF = 0), exceptées celles qui représentent la base des faits initiale (EF(1) = 1).

La figure (5.7) et la figure (5.8) représentent respectivement la matrice d'incidence d'entrée RE, et la matrice de sortie RS, de l'automate.

		Matrice d'entrée				
		I1	I2	I3	I4	I5
(I1)	P1 → A1, A2, A3	1	0	0	0	0
(I2)	P2 → A2	0	1	0	0	0
(I3)	P3 → A1, A4	0	0	1	0	0
(I4)	P4 → A1, A3, A4, A6	0	0	0	1	0
(I5)	P5 → A5, A6	0	0	0	0	1
	A1	0	0	0	0	0
	A2	0	0	0	0	0
	A3	0	0	0	0	0
	A4	0	0	0	0	0
	A5	0	0	0	0	0
	A6	0	0	0	0	0

Figure 5.7 : Matrice d'entrée RE du CIE [Amrani et Bouamrane, 10]

	Matrice de sortie				
	I1	I2	I3	I4	I5
(I1) P1 → A1, A2, A3	0	0	0	0	0
(I2) P2 → A2	0	0	0	0	0
(I3) P3 → A1, A4	0	0	0	0	0
(I4) P4 → A1, A3, A4, A6	0	0	0	0	0
(I5) P5 → A5, A6	0	0	0	0	0
A1	1	0	1	1	0
A2	1	1	0	0	0
A3	1	0	0	1	0
A4	0	0	0	1	0
A5	0	0	0	0	1
A6	0	0	0	1	1

Figure 5.8 : Matrice de sortie RS du CIE

5.4 Modification de la machine cellulaire proposée pour l'indexation cellulaire

La matrice d'incidence d'entrée (RE), est toujours diagonale pour l'adaptation de la machine cellulaire à une base de cas, car le nombre de perturbations qui appartient à la prémisses est toujours égal à 1, et chaque index à sa propre perturbation.

A titre illustratif, nous avons:

- (I1): (P = 01) ⇒ A1, A2, A3
 (I2): (P = 02) ⇒ A2
 (I3): (P = 03) ⇒ A1, A4
 (I4): (P = 04) ⇒ A1, A3, A4, A6
 (I5): (P = 05) ⇒ A5, A6

$$\|Prémisse(I1)\| = \|Prémisse(I2)\| = \dots = \|Prémisse(Ii)\| = 1.$$

Puisque initialement, on a les deux matrices d'incidences « RE, RS ». La matrice RE étant diagonale, figure (5.7), on peut utiliser seulement la matrice RS, figure (5.8), pour extraire les actions de régulation sans passer par les étapes d'inférence et sans exécuter les fonctions &règle et &fait comme préconisée dans CASI [Atmani et Beldjilali, 07].

Pour cela, nous adoptons les règles suivantes :

- (1) : Si (P = n) alors (I = n) // n = N° d'ordre, Ii = Index(i)
 (2) : Si (I = n) alors « extraire les actions de l'index n »

Par transitivité entre (1) et (2) : Si (P = n) alors « extraire les actions de l'Index n ».

L'enregistrement d'un nouveau cas correspond à ajouter à la matrice d'incidence de sortie RS un nouvel index avec ses actions de régulation. De plus, nous inversons la matrice RS pour accéder directement aux actions de régulation à travers leur index, Tableau (5.3).

Nous avons choisi une codification en **ASCII** parce qu'actuellement, le nombre total des actions de régulation est connu (égale à 16). Par conséquent, aucune perte d'espace « gain maximum d'espace ». Puisqu'il existe des caractères qui sont invisible dans le fichier, on a sauvegardé les caractères qui représentent les index avec leurs actions dans un fichier « on sauvegarde les caractères en binaire sur le disque dur, même s'ils sont invisibles».

Chaque index avec ces actions de régulation est représenté sur le fichier par deux caractères « 2octets ».

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
I1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
I2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I3	1	0	1	0	0	0	0	0	0
I4	1	0	1	1	0	1	0	0	0
I5	0	0	0	0	1	1	0	0	0

Tableau 5.3 : Matrice d'incidence de sortie inversée

Le pseudo algorithme ci-dessous, montre comment nous procédons à l'extraction des actions de régulation :

Algorithme extract (N° ordre)

Entrée : N° ordre

Début

1. Accéder directement aux caractères de position : $((2*i)-1)$ et $(2*i)$ // $i = N^{\circ}$ ordre.
2. Convertir les deux caractères en nombre décimal.
3. Convertir les deux nombres décimaux en binaire.
4. Tirer les actions correspondant à I_i (index i).
5. Afficher « les actions de régulation »

Fin.

Dans notre exemple, le cas similaire le plus proche est celui dont le numéro d'ordre est égal à 4.

Par conséquent :

1. Les caractères de position : $((2*i)-1) = 3$ et $(2*i) = 4$.
2. Les deux caractères sont : \emptyset // : Caractère invisible.
3. Les nombres décimaux sont : 216 0
4. Représentation en binaire des :

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
I2	1	0	1	1	0	1	0	0	0

Tableau 5.4 : Actions de régulation correspondantes à l'index 2

Du tableau (5.4), découle les informations suivantes concernant les actions. Nous avons donc : A1, A3, A4, A6. Les solutions sous forme textuel sont facilement récupérables pour être affichées au régulateur.

5.5 Interprétation des résultats relatifs à l'indexation cellulaire et à la nouvelle codification

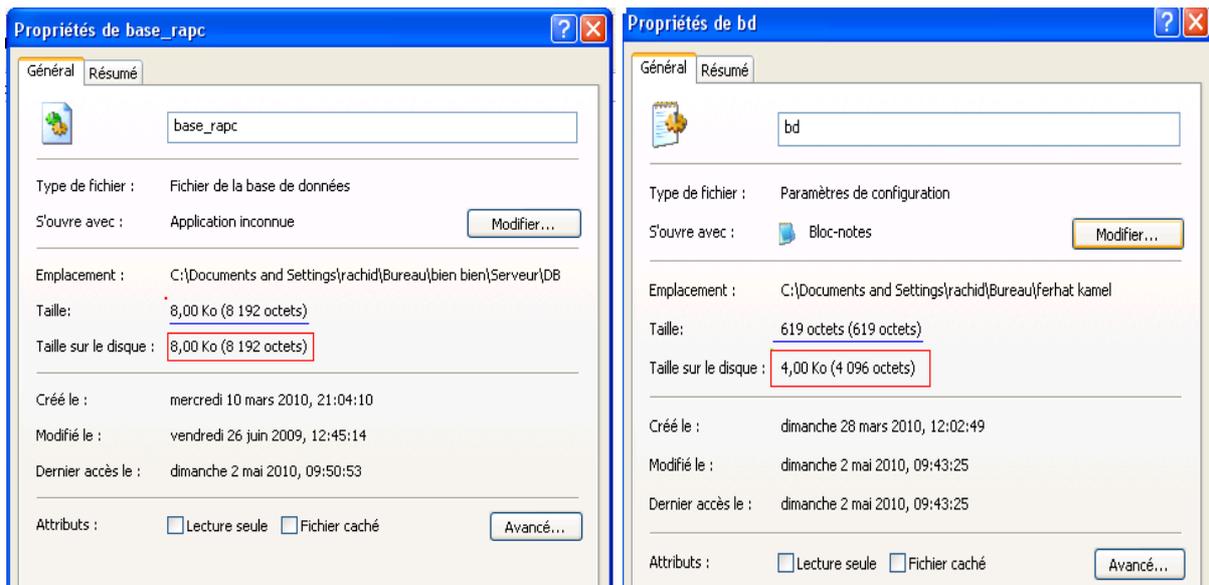
La mise en œuvre de la nouvelle approche d'indexation cellulaire au niveau du RBC, nous a permis de constater ce qui suit :

- Au niveau de la phase remémoration, le passage de l'indexation classique de la base de cas vers une indexation cellulaire, a permis un gain substantiel de l'espace de stockage grâce au stockage binaire des différentes perturbations, ainsi que de leurs solutions. Au niveau adaptation, c'est encore le régulateur qui visuellement choisit la solution à adapter.
- L'enregistrement de la nouvelle perturbation dans la base de cas codifié déclenche systématiquement la mise à jour de certains fichiers spécifiques. Nous proposons dans ce qui suit d'exposer les nouveaux résultats obtenus suite à la nouvelle codification.

5.5.1 Espace mémoire de la base de cas et base de solutions

La comparaison entre le « RBC cellulaire codifié » et le « RBC cellulaire non codifié » permet de mieux illustrer l'intérêt d'utiliser la nouvelle codification.

Nous abordons dans ce qui suit, la codification proposée à la section (5.4) en exploitant les résultats obtenus dans [Amrani et al, 11] par rapport à ceux présentés dans [Amrani et Bouamrane, 10] où la codification n'était pas encore activée.



(a)

(b)

Figure 5.9 : Taille réelle de la base de cas du RBC cellulaire non codifié (a) et du RBC cellulaire codifié (b)

Nous remarquons que le gain d'espace dans la base de cas codifié par rapport à la base de cas non codifié est égale à : Taille réelle ((RBC non codifié) / taille réelle (RBC codifié)), ce qui nous procure un gain d'espace approximativement 13 fois supérieur, figure (5.9).

$$\text{Gain d'espace (base de cas)} = (8 \times 1024 / 619) = 13,23$$

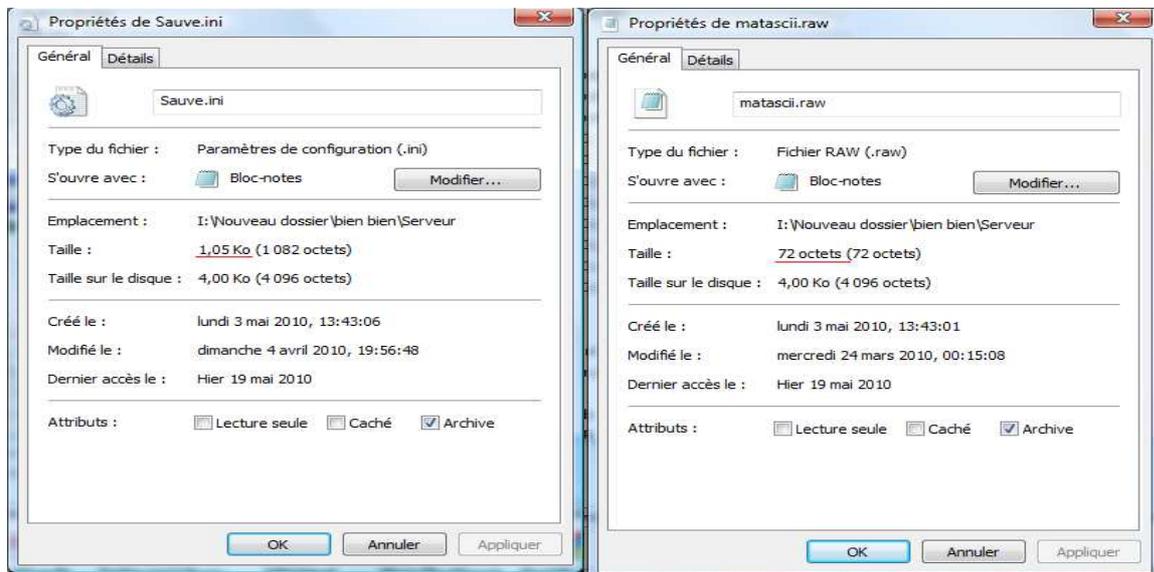


Figure 5.10 : La taille réelle de la base de solutions du RBC cellulaire (sauve.ini) et du RBC cellulaire codifié (matascii.raw).

Le gain d'espace sur *disque* (fichier enregistré sur disque) dans la machine cellulaire modifiée par rapport à la machine cellulaire présentée dans [Amrani et Bouamrane, 10] est égale à la : (taille réelle (machine cellulaire modifiée) / taille réelle (machine cellulaire)) est pratiquement 15 fois supérieur, figure (5.10).

$$\text{Gain d'espace sur disque} = (1,05 \cdot 1024) / 72 = 14,93.$$

5.5.2 Temps de réponse

En ce qui concerne le gain de temps, alors qu'il était de 0,009 unités de temps dans le RBC cellulaire proposé dans les travaux de [Amrani et Bouamane, 10]. Il est dans le RBC codifié de l'ordre de 0,001 (unités de temps).

5.6 Synthèse des résultats obtenus

La comparaison entre le module « RBC classique » et le module « RBC cellulaire », permet de mieux illustrer l'intérêt d'utiliser l'approche à base d'automate cellulaire pour l'indexation des solutions.

Le Tableau (5.5) synthétise cet intérêt en considérant deux points : la représentation des connaissances et la recherche des solutions.

	Le RBC classique	Le RBC cellulaire
La représentation des connaissances	Les solutions de chaque cas-source sont indexées dans une base de données (Base-de-solution)	Le RBC n'exploite pas une base de solution. L'indexation des solutions est codée ; ce qui permet de gagner de l'espace mémoire
La recherche des solutions	La recherche consiste à consulter la base-de-solutions pour extraire les solutions du cas similaire trouvé	La recherche se traduit par l'exécution d'un seul cycle du moteur d'inférence cellulaire.

Tableau 5.5 : Comparaison entre le « RBC » classique et le « RBC » cellulaire

5.7 Conclusion

Nous avons proposé dans ce chapitre, une de nos plus importantes contributions dans le cadre de cette thèse à savoir le passage d'une indexation classique vers une indexation cellulaire adaptée à la régulation d'un réseau de transport urbain. En effet, nous avons montré le fonctionnement de la machine cellulaire pour l'indexation des solutions des perturbations à travers les modifications apportées à la codification.

Le chapitre est terminé par des résultats expérimentaux, ainsi qu'une synthèse indiquant de façon explicite les différences entre le RBC classique et le RBC cellulaire des points de vue représentation des connaissances et recherche des solutions. Le gain en espace de stockage, et en temps de réponse étant largement à la faveur du RBC cellulaire.

Dans le chapitre suivant, nous nous intéressons à notre troisième contribution concernant la mise en œuvre dans le même environnement de l'action de régulation particulière relative au changement d'itinéraire.

Partie 2 : Reconfiguration d'un réseau de transport urbain via la machine cellulaire

5.8 Introduction

Nous abordons dans cette partie notre troisième contribution identifiée en l'exploitation de la machine cellulaire pour la reconfiguration des réseaux de transport urbain, il s'agit de l'action « changement d'itinéraire » qui consiste en une action où le véhicule emprunte un itinéraire différent de l'itinéraire habituel (commercial) de la ligne.

Nous introduisons tout d'abord, les travaux antérieurs réalisés dans le cadre des la reconfiguration des RTU. Ensuite, nous expliquons en quoi consiste cette notion de reconfiguration, ainsi que l'existence d'itinéraire de déviation. L'exploitation de la machine cellulaire pour la reconfiguration, ainsi que l'interprétation des résultats font l'objet des sections suivantes. Nous terminons ce chapitre par discuter l'intégration de la machine cellulaire dans la plateforme SARRT, une synthèse sur l'apport de cette action, et enfin une conclusion.

5.9 Travaux antérieurs sur la reconfiguration d'un RTU

Deux travaux majeurs parmi ceux déjà proposé ont abordé cette notion de changement d'itinéraire. Le premier travail est celui de Fayeche [Fayeche, 03] qui propose des décisions spatiales en indiquant uniquement le passage ou pas par une station en exploitant une approche à base d'algorithmes génétiques. Par contre, dans le cas de perturbations complexes, le régulateur définit en temps réel des nouveaux itinéraires optimaux pour les véhicules de la zone perturbée. Le second travail est celui de Zidi [Zidi, 07] qui propose la reconfiguration

spatiale d'une partie ou de la totalité du réseau. Pour cela, il utilise une approche de recherche d'itinéraires dans un graphe de transport multimodal en exploitant une métaheuristique spécialement développée à cet effet. Il s'agit d'un algorithme de colonie de fourmis pour la reconfiguration spatiale appelé « ACFRS ».

En plus de ces travaux, il faut noter que les algorithmes standards tel que celui du plus court chemin ne permettent pas de résoudre efficacement ce genre de problématique. Le souci étant aussi de trouver un nouvel itinéraire différent en minimisant dans un premier temps le nombre de stations à ne pas desservir tout en respectant les horaires de passage des véhicules. Ceci implique de prendre en compte des contraintes non prévues dans des algorithmes où l'essentiel est d'arriver d'un point A vers un point B en parcourant la plus petite distance.

5.10 Notion de reconfiguration pour un réseau de transport urbain

Ces dernières années, la complexité des réseaux de transport a eu un effet très important sur les perturbations. En effet, il y a eu l'apparition des incidents très compliqués où il y a plusieurs zones concernées et surtout un blocage d'itinéraire pour une période de temps importante. Afin de pallier à ces incidents qui affectent sérieusement le trafic d'un réseau de transport urbain, d'éventuelles modifications des itinéraires des véhicules peuvent s'avérer nécessaires [Zidi, 07]. 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 des véhicules de réserve.

Les exploitants des réseaux de transport ont été obligés d'utiliser ce type de décision de régulation pour ces cas difficiles. Il s'agit de la reconfiguration.

Cette manœuvre consiste à refaire la planification spatiale et temporaire de toute la zone perturbée en temps réel.

Nous pouvons citer quelques cas d'incidents où il faut appliquer une reconfiguration [Zidi, 07].

- *Plusieurs perturbations simultanées* : un régulateur peut se trouver dans une situation où il y a plusieurs perturbations simultanées. Il doit donc donner les décisions adéquates pour chaque perturbation. Mais les zones perturbées peuvent se chevaucher et la complexité est d'autant plus élevée que la partie du réseau perturbée est importante. Les manœuvres de régulation ne peuvent pas servir dans cette situation.

Pour diminuer le temps d'attente, le régulateur doit assurer une absorption des retards et de flux des passagers. Il doit proposer les itinéraires secondaires les plus courts et les plus rapides.

- *Des itinéraires bouchés* : l'encombrement des véhicules dans un réseau routier peut affecter la circulation dans un itinéraire et créer un bouchon.

Le régulateur doit proposer d'autres itinéraires plus rapides pour servir le maximum des passagers et absorber les retards. Dans ces cas perturbés, le régulateur peut proposer à un ou plusieurs véhicules de ne pas passer par certaines stations.

- *Un flux de passagers très important* : lors d'une manifestation quelconque (un match de foot par exemple), le flux des passagers dans les stations autour de la zone concernée peut être très important. Le nombre de voyageurs dépasse la capacité des stations et des véhicules. Le régulateur doit réagir pour plus de confort et de sécurité. En absence ou insuffisance de véhicules de réserve, il sera obligé de détourner certains véhicules de leurs parcours initiaux. Il doit donc proposer les parcours optimaux de point de vue temps et distance de parcours et surtout nombre de passagers servis.
- *Un retard très important* : certains incidents de trafic provoquent des retards très importants qui peuvent conduire à la formation de trains de bus. Afin de résoudre ces problèmes, le régulateur doit changer l'itinéraire de certains véhicules. Il commande ce type de manœuvre pendant une période au bout de laquelle le fonctionnement normal sera rétabli.

5.11 Existence d'itinéraires de déviation [Zidi, 07]

Deux cas peuvent se présenter : véhicule bloqué en charge sur l'itinéraire normal et départ à effectuer en un point précis de la ligne.

Lorsqu'un véhicule est bloqué sur l'itinéraire normal, l'existence d'un itinéraire de déviation donne la possibilité au régulateur de commander la déviation du (des) véhicule(s) suivant(s) en charge. Lorsqu'il y a une faible perturbation et que l'on a besoin d'amener un véhicule en un point précis de la ligne afin qu'il effectue un départ dans l'autre sens (sens de la charge),

l'existence d'un itinéraire de déviation permet au régulateur de commander un HLP¹¹ sans voyageur par un itinéraire différent de l'itinéraire normal.

5.12 Exploitation de la machine cellulaire pour le changement d'itinéraire

Pour illustrer le fonctionnement du CIE pour le changement d'itinéraire, nous exploitons la figure (5.11) représentant une portion du réseau du RTU d'Oran.

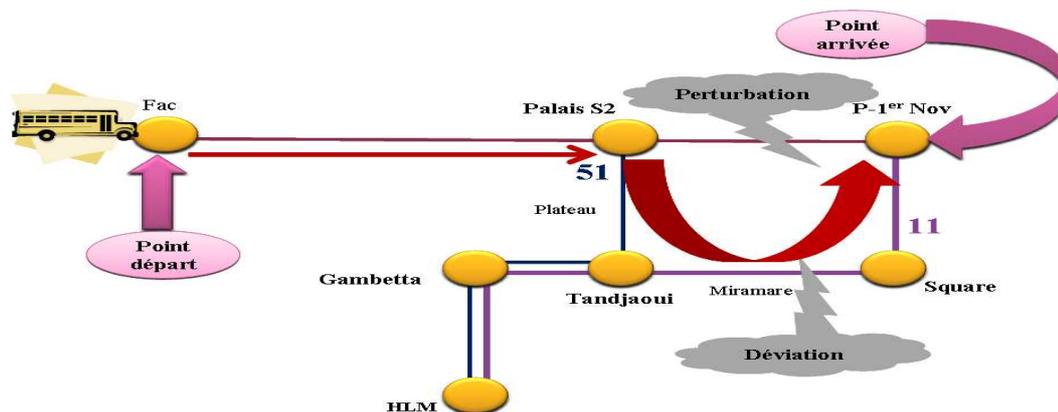


Figure 5.11 : Exemple d'une portion du réseau de la ville d'Oran

La figure (5.12) nous permet d'identifier le réseau de la figure (5.11) comme étant un graphe où les stations représentent les sommets (partie fixe) et les chemins entre stations, les arcs. (Partie dynamique)

Station	Sommet
Faculté des sciences	A
Palais Sport	B
Place -1er Novembre	C
Tandjaoui	D
Square	E

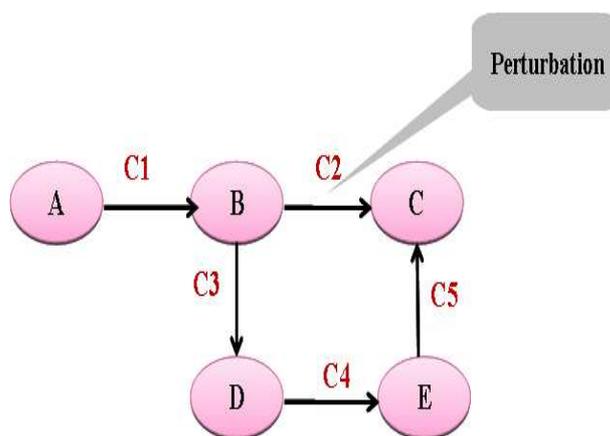


Figure 5.12 : Graphe représentant la portion du réseau avec les correspondances stations/sommets

¹¹ HLP : Haut le Pied : Descente sans voyageurs et sans s'arrêter.

La configuration initiale du CIE, figure (5.13) est obtenue en utilisant les stations A, B, C, D et E ainsi que les chemins C1, C2, C3, C4 et C5.

De même, pour être conforme à la terminologie du changement d'itinéraire, nous utiliserons cette fois-ci l'appellation *Celstation* au lieu de *Celfait* et *Celchemin* au lieu de *Celrègle*.

	EF	IF	SF
A	1	1	0
B	0	1	0
C	0	1	0
D	0	1	0
E	0	1	0

	ER	IR	SR
C1	0	1	1
C2	0	1	1
C3	0	1	1
C4	0	1	1
C5	0	1	1

Celstation
Celchemin

Figure 5.13 : Configuration initiale du CIE pour le graphe de la figure (5.11).

La figure (5.13), montre comment la base de connaissance extraite à partir du graphe de la figure (5.12) est représentée par les couches *Celstation* et *Celchemin*. Initialement, toutes les entrées des cellules dans la couche *Celstation* sont passives ($EF = 0$), exceptées celles qui représentent la base des stations initiale ($EF(1) = 1$).

Pour trouver les solutions, le ou les nouveaux chemin(s), nous devons exécuter *δfait* et *δrègle*. En utilisant maintenant le principe cellulaire, la figure (5.14) présente l'état global des deux couches, *Celstation* et *Celchemin*, après évaluation, sélection et filtrage en mode synchrone : application de la première loi de transition *δfait*.

	EF	IF	SF
A	1	1	1
B	0	1	0
C	0	1	0
D	0	1	0
E	0	1	0

	ER	IR	SR
C1	1	1	1
C2	0	1	1
C3	0	1	1
C4	0	1	1
C5	0	1	1

Celstation
Celchemin

Figure 5.14. Configuration G'0 du CIE obtenue avec *δfait*

Le résultat de la figure (5.14) est obtenu après l'exécution de l'algorithme de sélection et l'algorithme de filtrage ci-dessous :

Algorithme de filtrage :

- ```

/* N=N°d'ordre + Nact*/
1. Pour i =1, N faire
2. SF[i] = EF[i]
 /* SF : vecteur qui représente les états de sortie */
3. Fin faire
4. Pour i = 1, N°d'ordre faire
5. Pour j = 1, N faire
6. RE'[i][j] = RE [i][j] /* RE: la matrice d'incidence d'entrée
7. Fin faire
8. Fin faire
9. Pour i = 1, N°d'ordre faire
10. Pour j = 1, N faire
11. A[i] = A[i] ou (RE' [i][j] et EF[j])
12. Fin faire
13. EI[i] = EI[i] ou A[i]
14. Fin faire

```

De même, après l'application de la seconde loi de transition, *δrègle*, nous obtenons la configuration G1 qui est illustrée par la figure (5.15). La fonction  $\Delta$  constitue une loi de transition globale en chaînage avant qui transforme itérativement notre automate cellulaire d'une configuration initiale G0 en une configuration finale G1.

|   | EF | IF | SF |    | ER | IR | SR |
|---|----|----|----|----|----|----|----|
| A | 1  | 1  | 1  | C1 | 1  | 1  | 0  |
| B | 1  | 1  | 0  | C2 | 0  | 1  | 1  |
| C | 0  | 1  | 0  | C3 | 0  | 1  | 1  |
| D | 0  | 1  | 0  | C4 | 0  | 1  | 1  |
| E | 0  | 1  | 0  | C5 | 0  | 1  | 1  |

Celstation

Celchemin

Figure 5.15. Configuration G1 du CIE obtenue avec *δrègle*

La figure (5.15) est obtenue après exécution de l'algorithme ci-dessous.

### Algorithme d'exécution :

1. **Pour**  $i = 1, N$  **faire**
2.  $SR[i] = \text{non } ER[i]$   
/\* SF : le vecteur qui représente les états de sortie des différentes cellules de la couche « CELREGLE » \*/
3. **Fin faire**
4. **Pour**  $i = 1, N$  **faire**
5. **Pour**  $j = 1, N^{\circ}$  d'ordre **faire**
6.  $A[i] = A[i] \text{ ou } (RS [i][j] \text{ et } EI[j])$  /\*  $R_S$  : la matrice d'incidence de sortie
7. **Fin faire**
8.  $EF[i] = EF[i] \text{ ou } A[i]$
9. **Fin faire**

|   | EF       | IF | SF |
|---|----------|----|----|
| A | 1        | 1  | 1  |
| B | 1        | 1  | 1  |
| C | 1        | 1  | 1  |
| D | 1        | 1  | 1  |
| E | <b>1</b> | 1  | 1  |

Celstation

|    | ER | IR | SR       |
|----|----|----|----------|
| C1 | 1  | 1  | 0        |
| C2 | 1  | 1  | <b>1</b> |
| C3 | 0  | 1  | 0        |
| C4 | 1  | 1  | 0        |
| C5 | 1  | 1  | 0        |

Celchemin

Figure 5.16 : Solutions obtenues

La figure (5.16) montre le résultat obtenu qui a été rajouté à la base de faits, par conséquent, il est démontré. Elle montre aussi que le chemin C2 est impraticable.

### **5.13 Interprétation des résultats pour l'action « changement d'itinéraire »**

A travers l'exemple illustratif, figure (5.11), nous avons montré la possibilité de modéliser un réseau de transport urbain en exploitant la machine cellulaire CASI. De même, que la possibilité de programmer la manœuvre particulière « changement d'itinéraire ». Le constat, est que la possibilité de représenter un graphe sous forme booléenne, nous permet lors d'un changement d'itinéraire uniquement d'identifier les nouveaux sommets par lesquels va passer le véhicule. Cette transformation rapide des « 0 » en « 1 » et des « 1 » en « 0 » à impliquer une rapidité de réponse qui a donné des résultats prometteurs quant à l'utilisation de cette approche. En ce sens, nous avons introduit une minuterie pour comparer les résultats obtenus avec l'action de changement d'itinéraire implémentée via CASI par rapport à la pratique courante à savoir, le recours par le régulateur à l'identification d'un chemin bis compte tenu de sa connaissance du réseau. En effet, les résultats obtenus avec la machine cellulaire sont très significatifs alors qu'il faut 10 secondes au régulateur (en omettant le temps

d'identification de la perturbation) pour obtenir un chemin permettant le détournement du véhicule en garantissant un maximum de confort aux voyageurs, la machine cellulaire a obtenu le même résultat pratiquement en 1/100 de secondes.

### 5.14 Intégration du module de changement d'itinéraire dans la plateforme de régulation SARRT

La plateforme SARRT a été initialement développée pour la supervision et la régulation d'un RTU collectif [Bouamrane et al, 07]. Cependant, le module régulation ne proposait pas la possibilité de changer d'itinéraire qui est une action particulière et importante.

Le module « changement d'itinéraire », vient enrichir cette panoplie avec une nouvelle action de régulation qui n'était pas disponible à l'origine. L'intégration de cette action en tant que module est illustrée dans la figure (5.17). Cette dernière propose l'interface principale de la plateforme SARRT avec l'ensemble des outils implémentés.

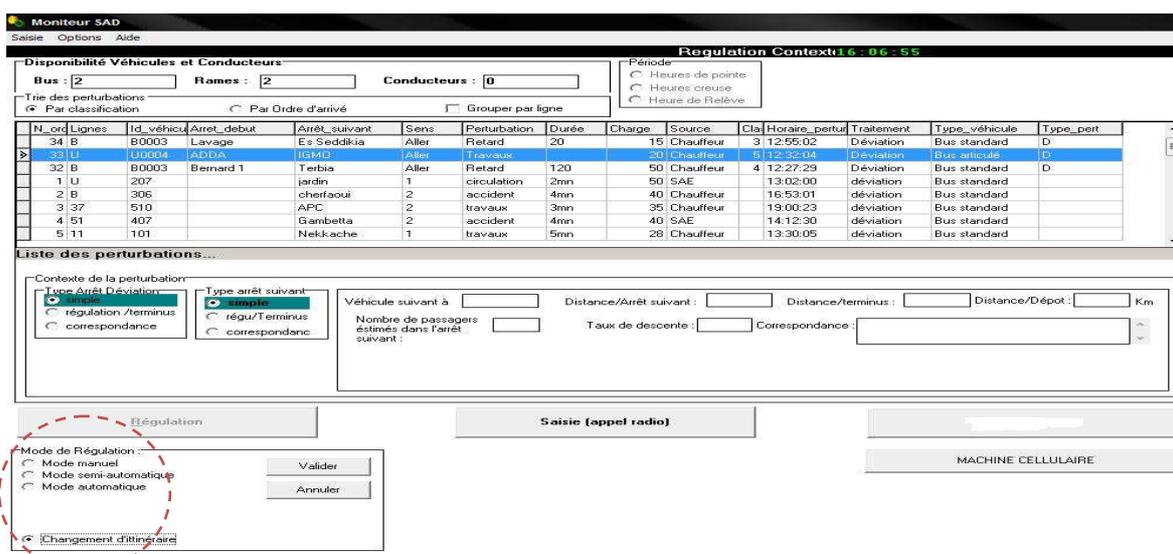


Figure 5.17. Interface principale de la plateforme SARRT

Pour illustrer le fonctionnement du système d'aide à la régulation, un deuxième exemple est proposé en considérant certaines phases du processus décisionnel du régulateur identifiées dans [Bouamrane et al, 05].

#### Phase 1 et 2 : Acquisition de la perturbation et Identification du contexte

Une perturbation est détectée à 12:32:04 sur la ligne dénommée U (Ligne Université). La perturbation est un retard de 3 min dû à un arrêt causé par un embouteillage. Le bus affecté

par la perturbation est le N° U0004. L'arrêt début de la perturbation est « ADDA » et l'arrêt qui suit la perturbation est « IGMO ».

Il est à noter que nous exploitons des informations partielles concernant le réseau d'Oran.

La sélection d'une perturbation nous donne le type de l'arrêt de déviation et le type de l'arrêt suivant, figure (5.17).

### Phase 3 et 4 : Choix de la décision et Action

Afin de traiter les perturbations, le module « Régulation », et particulièrement l'action de régulation « *changement d'itinéraire* » est sollicité par le régulateur pour la recherche d'un autre chemin.

Un graphe partiel du RTU d'Oran est proposé au régulateur, figure (5.18) comprenant cinq lignes (U, B, 37, 11, 51) actuellement. La figure (5.18) indique au régulateur, le N° de la ligne vers laquelle il va dévier, mais aussi le nom de l'arrêt « *début de déviation* » et l'arrêt « *fin de déviation* ».

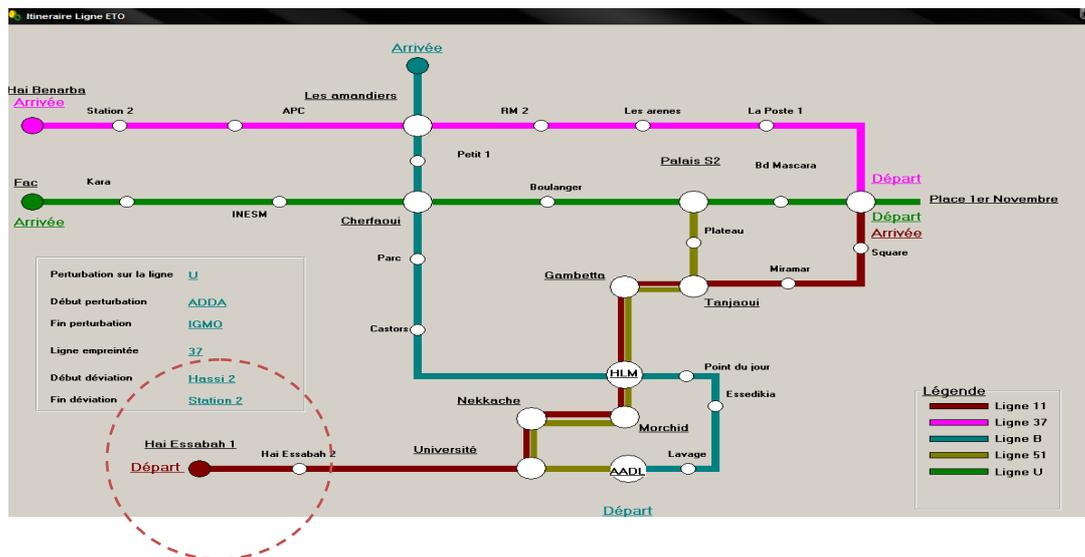


Figure 5.18 : Affichage de l'interface correspondant au graphe partiel du réseau d'Oran avec cinq lignes

Le fonctionnement de la machine cellulaire sollicitée, pour obtenir ces résultats est présenté dans la figure (5.19). Néanmoins, cette étape reste invisible au régulateur.

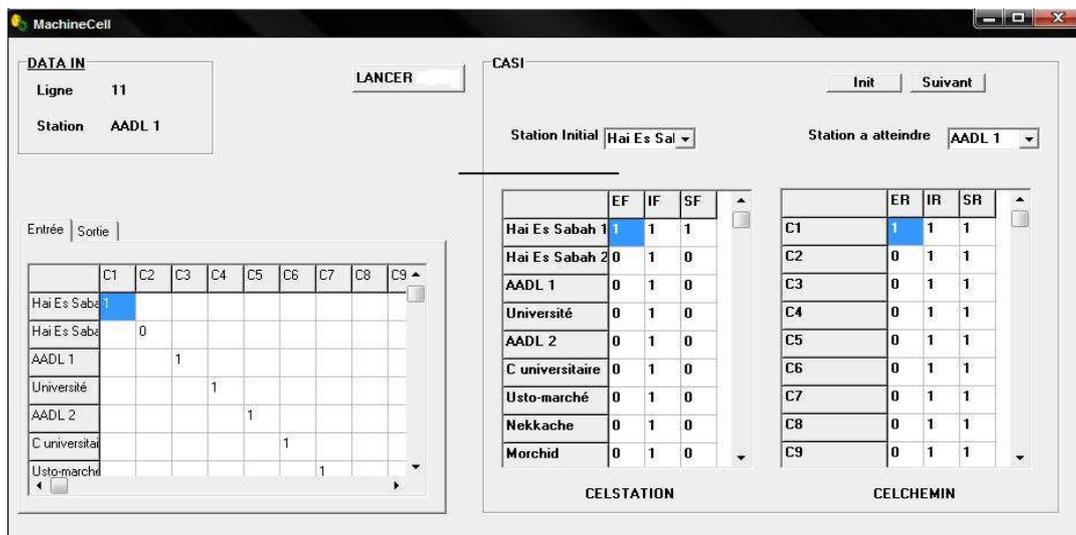


Figure 5.19. Affichage de l'interface de la machine cellulaire : extrait du fonctionnement de la machine cellulaire.

### 5.15 Synthèse sur l'apport de l'action changement d'itinéraire

Les motivations qui nous ont amenés à exploiter le principe cellulaire c'était la possibilité d'avoir une représentation booléenne du réseau de transport urbain (graphe) qui peut être exploitée dans la plateforme de régulation SARRT. En effet, nous avons souhaité avoir une représentation dynamique des différents chemins et stations, le changement d'itinéraire étant équivalent à l'obtention d'un nouveau graphe. De là, nous pouvons récapituler les avantages de l'approche basée sur le principe CASI comme suit :

- La représentation du graphe ainsi que son contrôle sont simples, sous forme de stockage binaire exigeant un prétraitement minimal.
- La facilité de l'implémentation des fonctions de transition qui sont de basse complexité, efficaces et robustes concernant des valeurs extrêmes.
- Les résultats de la reconfiguration sont simples pour être réorganisé et réutilisé par le régulateur.

La matrice d'incidence  $RE$  facilite la transformation des liens entre perturbations (blocage induisant le changement d'itinéraire) dans des expressions équivalentes booléennes, qui nous permettent d'utiliser l'algèbre de Boole élémentaire pour examiner des simplifications.

Les avantages de la méthode basée sur les automates cellulaires peuvent être récapitulés comme suit [Abdelouahab et al, 08] :

- L'acquisition de l'information ainsi que son contrôle sont simples, sous forme de matrices binaires exigeant un prétraitement minimal.
- La facilité de l'implémentation des fonctions de transition qui sont de basse complexité, efficaces et robustes concerne des valeurs extrêmes. D'ailleurs, elles sont bien adaptées aux situations avec beaucoup d'attributs.
- Les résultats sont simples pour être inséré et utiliser par un système expert.
- Le système de prédiction est un modèle cellulaire composé d'un ensemble simple de fonctions de transition et de règles de production, qui permettent non seulement de décrire le problème actuel mais d'établir également une fonction de classification pour la prévision.
- La matrice d'incidence, *RE*, facilite la transformation de règles dans des expressions équivalentes booléennes, qui nous permet d'utiliser l'algèbre de Boole élémentaire pour examiner d'autres simplifications.

## 5.16 Conclusion

Au terme de ce chapitre, nous avons présenté un apport dans le cadre de la régulation des réseaux de transport urbain, dans la mesure où pour la première fois dans la littérature, la même approche est exploitée pour la régulation, et pour la reconfiguration. Bien sur, ceci en apportant des modifications en fonction des circonstances à la machine cellulaire, cœur de ce travail.

Le changement d'itinéraire a été illustré via un exemple de fonctionnement qui permet aussi de montrer le fonctionnement de la machine cellulaire pour ce cas d'action particulière.

Dans le chapitre suivant, nous allons nous intéresser à la mise en œuvre d'un système d'évaluation des actions de régulation, afin d'aider le régulateur dans le choix de ces décisions.

## ***Evaluation des Critères pour la Prise de Décisions dans un Système d'Aide à la Régulation***

### **6.1 Introduction**

La régulation du trafic est une tâche difficile, où chaque décision est prise en fonction de la situation en cours. C'est pourquoi, les exploitants des réseaux de transport essaient de trouver des solutions de plus en plus efficaces. Ils rencontrent de nombreuses difficultés, pour assurer un trafic urbain stable en générale. Les difficultés rencontrées sont dues aux mauvaises conditions de circulation, aux manques de personnel et de matériel, absence d'un conducteur ou panne d'un véhicule, et aux correspondances non assurées entre les véhicules d'un même mode de transport différents. Pour mieux assurer la régulation, l'apparition des Systèmes d'Aide à l'Exploitation (SAE) a beaucoup aidé les opérateurs de régulation. Les SAE permettent le suivi en temps réel de l'exploitation d'un réseau de transport urbain.

A cet effet, un Système d'Aide à la décision pour la Régulation (SAR) est nécessaire afin d'aider les régulateurs à prendre des décisions pertinentes pour la régulation du trafic, en cas d'éventuelles perturbations. Plus généralement, le SAR a pour rôle de les assister dans leurs activités quotidiennes, sans prendre de décision à leur place. Le SAR a fait l'objet des trois derniers chapitres.

Parmi les modules qu'exploite le SAR, nous nous intéressons dans le cadre de ce chapitre à l'évaluation des actions de régulation (décision) générées par ce dernier.

Le SAR exploité est basé sur une approche cellulaire [Amrani et al, 11] qui permet un gain en temps de réponse et un gain d'espace de stockage [Amrani et Bouamrane, 10] pour le régulateur, afin de satisfaire les usagers du transport urbain.

Ce chapitre présente dans la section 2, la problématique et la contribution des auteurs. En section 3, nous retrouvons l'architecture fonctionnelle de la plateforme de régulation SARRT [Bouamrane et Amrani, 07]. La section quatre nous permet d'identifier les critères d'évaluation des décisions (action de régulation). La section cinq propose l'élaboration des décisions et leurs évaluations. La sixième section présente la formulation algorithmique des

critères. La section sept, propose une étude de cas détaillée avec discussion des résultats. Enfin, la section huit détaille la mise en œuvre et les résultats obtenus.

## **6.2 Problématique et Contribution**

Même assisté par des systèmes d'aide à la régulation, le régulateur se trouve confronté au choix de l'action de régulation adéquate ou celle qui minimise la majorité des critères retenus.

Actuellement, certaines entreprises proposent à leurs régulateurs une appréciation des différentes actions de régulation, basée sur le retour d'expérience et le savoir faire de différents régulateurs qui se sont succédé à ce poste de supervision. Cependant, ces appréciations (Bonne, mauvaise, médiocre,..) sont loin de représenter dans leur majorité une réelle évaluation des actions appliquées pour la régulation du réseau de transport urbain. C'est ce que nous allons tenter de montrer dans ce papier.

L'objectif de ce travail est donc d'identifier les critères pertinents permettant l'évaluation des actions de régulation tout en s'inspirant des critères adoptés par certaines compagnies de transport, de les formaliser algorithmiquement pour pouvoir les implémenter sur la base d'une formulation mathématique proposée dans les travaux [Certu, 97] [Laichour, 02] [Fayech, 03] [Bouamrane et al, 05]. Ensuite, nous procédons à une étude comparative entre les résultats obtenus par simulation aux appréciations des évaluations disponibles sous forme documentaire au niveau des compagnies de transport urbain.

Afin de pouvoir effectuer cette étude, nous disposons d'une plateforme de régulation « SARRT » [Bouamrane et Amrani, 07], à laquelle, a été intégré ce module chargé de l'évaluation des critères.

## **6.3 Architecture fonctionnelle de la plateforme SARRT**

La plateforme SARRT [Bouamrane et Amrani, 07] intègre un SAR conçu comme un gestionnaire de modèles, figure (6.1). Ces derniers intègrent une même architecture multi-agents et partagent la même base de données (Tableau de Marche). Chaque modèle sélectionné par le régulateur propose une à plusieurs solutions. Le régulateur sur la base de

son expérience du terrain, et sur la base des évaluations à priori, choisi la solution, la plus appropriée [Amrani et al, 11][Bouamrane, 06].

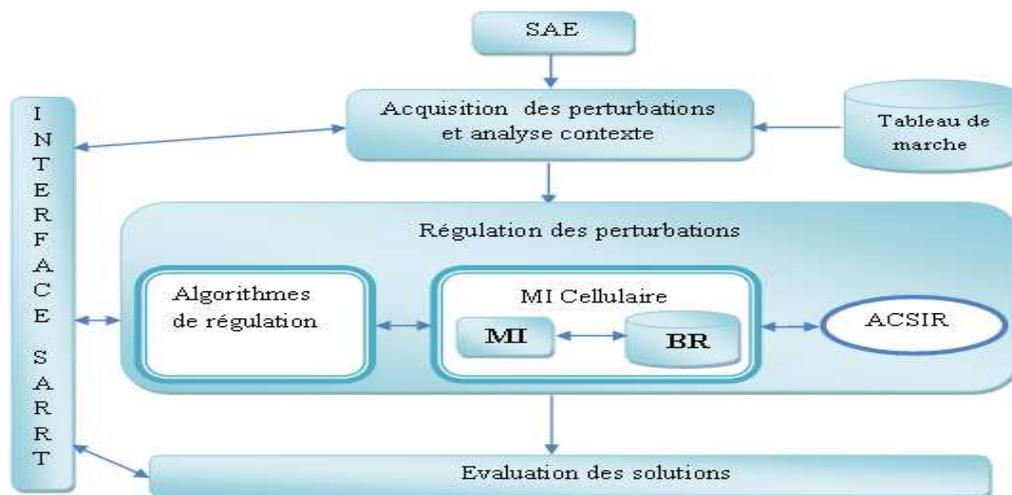


Figure 6.1. Architecture de plateforme SARRT

La plateforme « SAART » est un outil informatique d’aide à la prise de décision pour la régulation du trafic. Il est conçu comme un conseiller expert, mais son rôle est de soutenir le régulateur dans ses activités quotidiennes sans prendre de décision à sa place. Il permet de traiter et de donner des décisions, aux différentes perturbations, dans le domaine de la régulation d’un réseau de transport urbain collectif

### 6.3.1 Module d’acquisition des perturbations

Ce module est connecté directement au « SAE » qui permet de localiser les véhicules sur le réseau de transport urbain en temps réel. Le « SAE » lui même est en relation avec une base de données correspondante au tableau de marche théorique (horaires de passage des véhicules aux stations). La communication entre le « SAE » et le module d’acquisition des perturbations est assurée par l’intermédiaire d’un réseau de communication. Par contre, les perturbations reçues par phonie sont saisies directement par le régulateur à l’aide d’une interface dédiée.

### 6.3.2 Module régulation des perturbations

Ce module comprend deux sous-modules :

- Le sous-module « Algorithmes de régulation ». Ces algorithmes sont proposés au régulateur à travers les actions de régulation en **mode manuel**.

- Le sous-module « moteur d'inférence cellulaire » qui est exploité en **mode automatique**.

### 6.3.3 Module régulation des perturbations

Pour toute action de régulation proposée par ce système, une évaluation systématique est déclenchée. Cette évaluation repose sur des critères de qualité de service. La détermination de ces critères a été établie à partir des objectifs fixés par le régulateur c'est-à-dire des logiques de régulation, nous citons à titre d'exemple : le critère de régularité.

### 6.4 Identification des critères d'évaluation des décisions

Le système d'aide à la régulation proposé, identifie pour chaque décision (solution) proposée une évaluation selon un certain nombre de critères présentés ci-dessous.

Le choix des critères pertinents a été effectué selon une double analyse :

- le cas d'application constitué par les réseaux de transport d'Oran et de Valenciennes [Bouamrane, 06].
- une étude bibliographique des travaux dans le domaine, particulièrement [Laichour, 02] [Fayech, 03].

Cinq critères rationnels ont été retenus [Bouamrane et al, 05b] afin de réduire le plus possible la subjectivité. Ces critères sont structurés selon trois classes :

**Essentiels** : critères sans lesquels le régulateur ne peut avoir une idée précise sur la qualité de la solution proposée. Cette catégorie comprend trois critères :

- la ponctualité,
- la régularité,
- les correspondances (respect des correspondances).

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

**Importants** : Critères apportant au régulateur des informations complémentaires sur les conséquences de la solution proposée ou en cours. C'est le critère relatif à la *satisfaction des passagers* qui est retenu.

Ce critère prend en compte les aléas rencontrés au cours d'un trajet par les voyageurs tels que les transbordements, etc...

**Accessoires** : Critères n'influant pas sur la décision du régulateur : l'indicateur considéré est le *coût de la solution*.

Ce critère inclut le nombre de kilomètres commerciaux effectués en plus, par rapport au trajet normalement programmé. Les entreprises de transport étant à vocation « service public », le coût n'influe pas sur la qualité de service offerte aux voyageurs.

### **6.5 Elaboration des décisions et leurs évaluations**

L'élaboration des décisions réalisables se fait via un raisonnement inductif en exploitant un moteur cellulaire « CIE » [Atmani et Beldjillai, 07] qui à partir d'une base de connaissance, génère les solutions réalisables. Les différentes décisions et leurs évaluations sont discutées ci-dessous.

- *Le direct en ligne* : La voiture suit l'itinéraire de la ligne en assurant uniquement les arrêts de décente pour les clients à bord.
- *Le demi-tour en ligne* : Suppression d'une partie de course pour remettre une voiture sur son horaire théorique à un point de retournement.
- *Le demi-tour avec échange de conducteurs et de véhicules* : La voiture en retard V1 est rattrapée par la suivante moins chargée V2 et à l'heure. V2 transborde ses clients sur la voiture en retard avec échange de conducteurs.
- *Dépassement et service en descente uniquement* : Une voiture en retard est rattrapée par la suivante à l'heure. La deuxième passe devant la première et assure le service normalement. La voiture dépassée n'assure que les arrêts en descente.
- *Départ retardé au terminus* : Dans le cas où une voiture a un retard supérieur à son temps de battement au terminus d'arrivée, on retarde la voiture précédant au terminus de la moitié de la valeur du retard.
- *Echange de conducteurs et de véhicules* : Une voiture en retard est rattrapée par la suivante. Transbordement des voyageurs de la seconde vers la première et échange de conducteurs et des numéros véhicules.
- *Remise à l'heure par réserve est disponible* : Injection d'une réserve (véhicule) et d'un disponible (conducteur) sur l'horaire théorique d'une voiture en retard ou en panne.
- *Régulations en terminus* : Retarder deux à trois voitures devant une voiture en retard puis retarder deux à trois voitures derrière la voiture en retard.
- *Régulation en ligne* : Retarder tous les voitures qui suivent le véhicule perturbé en gardant le même intervalle jusqu'à résorber le retard engendré.
- *Haut le pied hors ligne* : mise hors service d'une voiture sur un parcours ou partie de parcours qui emprunte un itinéraire plus rapide hors ligne.

## 6.6 L'évaluation des décisions

Comme nous l'avons mentionné précédemment, notre étude porte essentiellement sur l'étape d'évaluation des décisions pour aider le régulateur dans ses choix.

Les régulateurs disposent d'un tableau qui regroupe les différentes appréciations des actions en fonction des critères mentionnés dans le tableau (6.1). Ces appréciations représentent un

guide dans le choix des actions de régulation en fonction du contexte de la régulation pour les régulateurs [Semurval, 04].

| Critère                                                         | Régularité | Ponctualité | Correspondance | Cout Commercial       | Satisfaction passagers |
|-----------------------------------------------------------------|------------|-------------|----------------|-----------------------|------------------------|
| Actions                                                         |            |             |                |                       |                        |
| <b>Le direct en ligne</b>                                       | Mauvais    | Mauvais     | Mauvais        | Mauvais <sup>12</sup> | Médiocre               |
| <b>Le demi-tour en ligne</b>                                    | Mauvais    | Mauvais     | Mauvais        | Mauvais               | Mauvais                |
| <b>Le demi-tour avec échange de conducteurs et de véhicules</b> | Mauvais    | Mauvais     | Mauvais        | Mauvais               | Médiocre <sup>13</sup> |
| <b>Dépassement et service en descente uniquement</b>            | Médiocre   | Médiocre    | Médiocre       | Mauvais               | Bon                    |
| <b>Départ retardé au terminus</b>                               | Bon        | Médiocre    | Médiocre       | Mauvais               | Bon                    |
| <b>Echange de conducteurs et de véhicules</b>                   | Médiocre   | Médiocre    | Médiocre       | Mauvais               | Médiocre               |
| <b>Remise à l'heure par réserve est disponible</b>              | Bon        | Bon         | Bon            | Médiocre              | Très Bon               |
| <b>Régulations en terminus</b>                                  | Très Bon   | Médiocre    | Médiocre       | Mauvais               | Bon                    |
| <b>Régulation en ligne</b>                                      | Très Bon   | Médiocre    | Médiocre       | Mauvais               | Bon                    |
| <b>Haut le pied hors ligne</b>                                  | Mauvais    | Mauvais     | Mauvais        | Mauvais               | Mauvais                |

Mauvais : signifie que les critères ne sont pas calculés, ils prennent la valeur «0 ».

Tableau 6.1 : Appréciation des actions en fonction des critères [Semurval, 04]

### 6.7 Formulation algorithmique des critères

La formulation des critères résume les objectifs de qualité de service (régularité, ponctualité, respect des correspondances, satisfaction des passagers et cout commercial) souhaités par toute compagnie de transport. Nous proposons ci-dessous la formulation algorithmique de ces critères.

<sup>12</sup> Pas de véhicule supplémentaire.

<sup>13</sup> Sera appliqué puisqu' elle fait un transbordement.

### 6.7.1 Critère de régularité

Ce critère (Reg) est relatif à la régularité des intervalles de temps qui séparent les passages successifs des véhicules à un même arrêt. Il est relatif à la minimisation de l'attente des voyageurs aux arrêts du réseau.

#### Algorithme régularité ()

/\*  $a[i][j]$ : Variable représente le choix des arrêts par lesquels les véhicules vont passer.

$\mu$  : Taux d'arrivée des personnes à un arrêt, cette donnée se trouve dans la matrice origine-destination.

$\Delta t[k]$  : L'échantillonnage de  $\Delta t$  par 4 min. \*/

1. **Début**
2.  $AT=0$  ;
3. **Pour**  $i=0$ ,  $nbre\_st$  **faire** /\*  $nbre\_st$  : Le nombre de station affectés\*/
4. **Pour**  $j=0$ ,  $nbre\_veh$  **faire** /\*  $nbre\_veh$  : Le nombre de véhicules affectés\*/
5. **Pour**  $k=0$ ,  $nbre\_ech$  **faire** /\*  $nbre\_ech$  : Le nombre d'échange à faire, L'échantillonnage sur 4 min\*/
6.  $AT=AT+ a[j][i] \times \mu \times \Delta t[k] \times at\_moy$ ; /\*  $at\_moy$  : Attente moyenne à un arrêt \*/
7. **Fin Faire**
8. **Fin Faire**
9. **Fin Faire**  
/\* $som$  : somme des échantillonnages ;  $nbre\_ech$  : nombre d'échantillonnage \*/
10. **Pour**  $i=0$ ,  $nbre\_ech$  **faire**
11.  $som=0$  ;  $at\_moy=0$  ;
12. **Pour**  $j=i+1$ ,  $nbre\_ech$  **faire**
13.  $som= som+\Delta t[j]$ ;
14. **Fin Faire**
15.  $at\_moy=(\Delta t[i]/2)+som$ ;
16. **Fin Faire**
17. **Fin**

### 6.7.2 Critère de ponctualité

Ce critère (Ponc) est associé au respect des horaires de passage et par conséquent celui 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). Le critère de ponctualité est en fonction de la charge des véhicules affectés et ses durées du trajet.

Pour ce critère, nous avons recours d'abord à la formulation de l'algorithme calcul de la charge ci-dessous.

### Algorithme calcul de la charge ()

**/\* Veh[i]** : tableau contient les véhicules affectés  
**Nveh** : le véhicule perturbé  
**tauxDesc** : le taux de descente, cette donnée se trouve dans la matrice origine/ destination  
**TCharge[j][i]** : la charge de véhicule i dans l'arrêt j  
**Nmont[j][i]** : le nombre de montée, déjà calculé (régularité)  
**Ndesc[j][i]** : le nombre de descente, déjà calculé (régularité) \*/

1. **Début**
2. Charge=20 ; /\*charge initial, terminus de départ selon exemple\*/
3. **Pour** i =0, nbre\_veh **faire**
4.     **Pour** j=0, nbre\_st **faire**
5.         **Si** Veh[i] == Nveh **alors**
6.             Charge = Charge  $\times$  tauxDesc ;         /\* il fait juste la descente\*/
7.             TCharge[j][i]= charge ;
8.         **Sinon**
9.             Charge= Charge +Nmont[j][i]-Ndesc[j][i] ;
10.             TCharge[j][i]= charge ;
11.         **Fin si**
12.     **Fin faire**
13. **Fin faire**
14. **Fin**

### Algorithme ponctualité ()

**/\*TD :** durée de trajet entre arrêt j+1 et j\*/

1. **Début**
2. **Pon=0** ;         /\*initialisation de la ponctualité\*/
3. **Pour** i =0, nbre\_veh **faire**
4.     **Pour** j=0, nbre\_st **faire**
5.         TD=td[j+1][i]-td[j][i] ; /\* td[j][i] : le temps départ \*/
6.         Pon = Pon + a[j][i] x Charge[j][i] x TD;
7.         **Fin faire**
8.     **Fin faire**
9. **Fin.**

### 6.7.3 Critère de correspondance

Ce critère (Corr) est associé à la durée des transferts entre les véhicules à un pôle d'échange.

Il s'agit alors de calculer la durée des correspondances dans l'horizon  $H$ .

### Algorithme correspondance ()

**/\*correspondance :** variable booléenne indique s'il y'a une correspondance ou non\*/

*/\*veh\_corr : variable booléenne indique si le véhicule assure une correspondance\*/*

*/\* W[k][j][i] : le nombre de personne en correspondance \*/*

*/\* taux\_corres : taux de correspondance (matrice d'origine-destination)\*/*

1. **Début**
2. TT=0 ;
3. Nbre\_veh2 =0 ; */\*nombre de véhicule affectés de la 2<sup>ème</sup> ligne\*/*
4. **Pour** i=0, nbre\_veh **faire**
5.     **Pour** k=0, nbre\_st **faire**
6.         déterminer les arrêts de correspondance  
*/\* à partir de matrice d'origine-destination \*/*
7.         **Si** correspondance == faux **alors**  
           **afficher** ("il n'y a pas de correspondance") ;
8.         **Sinon**
9.             Déterminer si le véhicule fait correspondance  
           **Si** veh\_corr == faux **alors**  
               **afficher** ("véhicule hors service") ;
10.         **Sinon**  
           Calculer ta[k][i] ;  
*/\* L'horaire d'arrivé du véhicule i « horaire régulé » \*/*
11. Déterminer la 2eme ligne de correspondance  
*/\*à partir de la matrice d'origine-destination\*/*
12. Déterminer le véhicule j de la 2eme ligne  
*/\* Véhicule j : fait la correspondance avec le véhicule i\*/*
13. Nbre\_veh2++ ;  
*/\*calculer le nombre de personne (s) en correspondance\*/*
14. Calculer Charge[k][j] ;
15. Ndesc[k][j]= Charge[k][j] x tauxDesc ;
16. Nbre\_corr= Ndesc [k][j]x taux\_corres ;
17. W[k][j][i]= Nbre\_corr ;
18. Calculer td[k][j] ; */\*td[k][j] : l'horaire de départ du véhicule j\*/*
19. Dt= ta[k][i] – td[k][j] ;
20. DT[k][j][i] = Dt; */\*DT[j][i] :la durée de transfert\*/*
21. TT=TT+ W[k][j][i] x DT[k][j][i];
22.             **Fin si**
23.             **Fin si**
24.             **Fin faire**
25.     **Fin faire**
26. **Fin**

#### 6.7.4 Critère de satisfaction de passagers

La satisfaction des passagers (SP) est fonction du nombre de voyageurs en attente, de la durée de leur attente au-delà des durées estimées, du transbordement ou pas de ces voyageurs ainsi

que de leur sécurité lors de ses transbordements ou pendant les horaires de début et fin de journée.

**Algorithme satisfaction des passagers ()**

/\*Nbp : nombre de passagers en attente

Nbt : nombre de transbordement

CS : coefficient de sécurité\*/

1. **Début**

2. Sp =0 ;

3. CS=1 ;

4. Nbt=0 ; /\*pas de transbordement\*/

5. Calculer Nbp ;

6. **Pour** i=0, nbre\_veh **faire**

7. **Pour** j=0, nbre\_st **faire**

8.  $\Delta t = t_{a[j+1][i]} - t_{d[i][j]}$  /\*  $\Delta t$  : Durée attente à un arrêt\*/

9.  $Sp = Sp + (\Delta t \times Nbp) + (Nbt \times CS)$

10. **Fin faire**

11. **Fin faire**

12. **Fin.**

**6.7.5 Critère de coût commercial**

Le coût commercial (CC) est exprimé en fonction, du nombre de véhicules engagés, du nombre de conducteurs sollicités ainsi que du prix au kilomètre parcouru. Compte tenu qu'il n'y a pas de voitures supplémentaires ou de conducteurs sollicités, ou de kilomètre supplémentaire parcouru au de-là de ce qui a été prévu alors le cout commercial égale « 0 ».

**6.8 Etude cas : Discussion des résultats**

Le scénario illustré par le tableau (6.2) décrit la présence d'un incident de type «retard bus».

L'heure de l'incident correspond à une heure « creuse »

| N° ligne | N° Veh | Arrêt suivant | Nature Pert° | Durée en min | Horaire Pert° | Type Veh     |
|----------|--------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| 11       | 9      | St Waast      | Retard       | 10           | 11:35:33      | Bus standard |

Tableau 6.2 : Scenarion de perturbation

Le SAR exploitant un moteur d'inférence cellulaire [Amrani et al, 11] fournit les solutions affichées au tableau (6.3).

| N° | Solution (s)                                          |
|----|-------------------------------------------------------|
| 1  | Demi-tour en ligne                                    |
| 2  | Demi-tour avec Echange de conducteurs et de véhicules |
| 3  | Dépassement et service en descente uniquement.        |
| 4  | Echange conducteurs et véhicules                      |
| 5  | Régulation en ligne                                   |

Tableau 6.3: Les solutions proposées

Parmi les actions de régulation proposées (solutions), nous choisissons celle qui consiste en un « Dépassement et service en descente uniquement », il s'agit de la solution N°3.

Toutes les données concernant les véhicules affectés (horaires d'arrivés aux différents arrêts) se trouvent dans le tableau de marche théorique. Les données concernant les stations affectées (le taux de descente à chaque arrêt, s'il y a correspondance ou non, le taux de passagers en correspondance) sont sauvegardées dans une matrice d'origine-destination<sup>14</sup>.

En complément des informations reçus du SAE, la plateforme SARRT fournit au régulateur les informations illustrées dans la figure (6.2) :

Figure 6.2 : Contexte de la perturbation

Après calcul, nous déterminons le pourcentage de dégradation de chaque critère en prenant en considération la formulation mathématique traduite en algorithme.

| N° sol | Reg      | Ponc     | Corr     | CC          | SP  |
|--------|----------|----------|----------|-------------|-----|
| 3      | 29       | 64       | 10       | 0           | 36  |
|        | Médiocre | Médiocre | Médiocre | Mauvais (0) | Bon |

Tableau 6.4 : Les valeurs obtenus pour les cinq critères après calcul pour la solution proposée « Dépassement et service en descente »

<sup>14</sup> La matrice origine-destination est exploitée sous forme d'un tableau Excel qui contient toutes les informations qui peuvent servir pour la régulation.

Le tableau (6.4) présente les valeurs sont obtenues par calcul, et les appréciations (Médiocre, Mauvais, Bon, ...) disponible au Tableau (6.1).

La comparaison entre les résultats obtenus suite à la formulation et l'implémentation des critères de régulation et les appréciations proposées aux régulateurs, Tableau (6.1) montre qu'il y a une différence sur un ensemble de critères.

A titre d'exemple le critère de régularité avec une dégradation de 29% est Bon, par contre le critère de ponctualité est réellement médiocre avec une valeur estimée à 64%. Toutefois, avec 10% de dégradation pour les correspondances, cette valeur reste bonne au lieu de médiocre comme indiqué dans le Tableau (6.1). Enfin, la satisfaction des passagers est bonne avec uniquement 36% des passagers insatisfaits.

Même chose pour le reste des actions du tableau (6.3) avec quelques différences, car chaque action de régulation (solution) à ses particularités. Les différents résultats obtenus pour les cinq solutions sont illustrés au tableau (6.5).

| N° Sol | Reg | Ponc | Corr | CC | SP |
|--------|-----|------|------|----|----|
| 1      | 0   | 0    | 0    | 0  | 0  |
| 2      | 0   | 0    | 0    | 0  | 98 |
| 3      | 29  | 64   | 10   | 0  | 36 |
| 4      | 31  | 48   | 24   | 0  | 37 |
| 5      | 48  | 61   | 14   | 0  | 36 |

Tableau 6.5 : Les valeurs des différents critères pour l'ensemble des actions de régulation proposés par CASI dans la plateforme SARRT.

A partir de ces résultats, le régulateur pourra choisir l'action de régulation à exécuter, du moment qu'il peut cerner les critères selon leurs importances et leur impact sur le trafic.

### **6.9 Mise en œuvre**

Nous proposons dans ce qui suit d'autres expérimentations, qui nous permettent de conforter les résultats obtenus.

Le scenario est présenté à la figure (6.3) :

| N_Ordre | Lignes | Id_Vehicule | Type_Vehicule | Arrêt_suivant     | Perturbation | Durée | Charge | Source    | Horaire_perturbation | Classi | Sens |
|---------|--------|-------------|---------------|-------------------|--------------|-------|--------|-----------|----------------------|--------|------|
| 67      | 16     | 25          | Bus Standard  | Faubourg de Paris | Retard       | 11    | 70     | Chauffeur | 20.06:55             | 1      | 1    |

Figure 6.3 : Exemple de scenario de perturbation

Les solutions proposées par le module des critères d'évaluation sont illustrées à la figure (6.4)

|   |                                               |
|---|-----------------------------------------------|
| 1 | Dépassement et service en descente uniquement |
| 2 | Echange conducteurs et véhicules              |
| 3 | Régulation en ligne                           |

Figure 6.4 : Solutions proposées

Les évaluations obtenues pour chacune des 3 actions de régulation proposées par le SAR sont présentées à la figure (6.5).

|   | Regularite | ponctualite | correspondan | CoutComm | SatisPass |
|---|------------|-------------|--------------|----------|-----------|
| 1 | 64         | 26          | 0            | 0        | 0         |
| 2 | 77         | 13          | 0            | 0        | 98        |
| 3 | 27         | 39          | 0            | 0        | 19        |

Figure 6.5 : Les valeurs d'évaluation pour les différentes solutions

Une analyse des résultats de la figure (6.5), par rapport aux appréciations du tableau (6.1) destinées aux régulateurs, nous permet de remarquer à titre d'exemple, ce qui suit :

Tout d'abord, en ce qui concerne le critère de régularité, pour la troisième solution avec une dégradation de 27%, cela est loin d'être « T. Bien » comme mentionné dans le tableau (1). Pour le critère de ponctualité, la solution (1) et (2) avec respectivement 26% et 13% de dégradation, ces valeurs sont loin d'être médiocre comme indiqué dans le tableau (6.1). Pour le critère de correspondance, aucune dégradation constatée. Une stricte correspondance entre le calcul et le tableau (6.1), en ce qui concerne le cout commercial, qui peut être justifié par le fait qu'il s'agit de comptabiliser le nombre de véhicule à ajouter, ainsi que le nombre de kilomètres supplémentaires, ce qui n'est pas le cas pour ces trois actions. Enfin, pour le critère Satisfaction de passagers, la solution (1) est évaluée à 0, ce qui correspond à « Très bon », or celle-ci est évaluée à Bonne dans le tableau (6.1), la solution (2) avec 98% de dégradation est

forcément mauvaise, or, elle est indiquée « Médiocre », et la solution (3) avec 19% de dégradation, peut être considérée comme bonne, conformément au tableau (6.1).

Nous observons qu'en général, les résultats obtenus ne reflètent pas l'appréciation affectée aux actions dans le tableau (6.1). Ce qui nous amène à dire que cette appréciation reste assez sommaire par rapport à la réalité des calculs entrepris dans le cadre de cette étude. Par conséquent, le régulateur pourra établir le choix de sa décision de régulation (solution) en ayant connaissance de l'exacte évaluation des différents critères en relation avec le terrain (réseau de transport urbain), et non pas sur la base d'appréciations générales.

### **6.10 Conclusion**

Nous avons à travers ce chapitre explicité formellement et mathématiquement tous les critères proposés pour l'évaluation des actions de régulation d'un réseau de transport urbain. Nous avons proposé les critères et les hypothèses sur lesquelles se sont basées ces formulations.

De plus, nous avons proposé les algorithmes correspondant à ces formulations, nous les avons implémentés en les intégrant comme module dans une plateforme de régulation SARRT afin de pouvoir procéder à l'évaluation des actions de régulation obtenues par le module de régulation. Enfin, en obtenant les résultats formels, nous les avons comparés aux appréciations théoriques proposées par les compagnies de transport à leurs agents de régulation.

Le module d'évaluation développé, et intégré à la plateforme SARRT, a permis de l'enrichir, et de donner une autre vision des résultats obtenus aux régulateurs, en leur permettant d'apprécier exactement les solutions obtenues en fonction des valeurs réelles du terrain.



## ***Conclusion générale et Perspectives***

Jusqu'à l'heure actuelle, les opérateurs disposaient de moyens de communication pour acquérir des informations sur le réseau et pour diffuser leurs suggestions. Les exploitants des compagnies de transport ont pensé à aider leurs agents (régulateurs) par des outils informatiques. La discipline représentant le mieux cette notion d'aide est identifiée par l'intelligence artificielle, d'où la notion d'aide à la décision (chapitre 1, "**Introduction aux réseaux de transport urbain**").

Dans l'objectif d'assurer la régulation et la reconfiguration du réseau de transport urbain, nous avons adopté dans cette thèse, une approche cellulaire identifiée en la machine CASI. Cette dernière a été présentée succinctement en détaillant ses différentes caractéristiques et fonctionnalités (Chapitre 2, **La machine cellulaire CASI**).

Dans la présente étude, un modèle basé agents a été proposé pour décrire, en détails, aussi bien l'aspect structurel que comportemental d'un réseau de transport urbain en vue de la régulation des perturbations. Différents travaux dans le domaine ont exploité les systèmes multi agents et ont confirmé leur adaptation à la modélisation de tels systèmes la fois ouverts et distribués (Chapitre 3, "**Modélisation d'un Réseau de Transport Urbain**").

Ensuite, nous avons montré la possibilité d'appliquer la machine cellulaire pour la régulation en remplacement du moteur d'inférence classique, tout en ayant recours uniquement à une formulation symbolique (Chapitre 4, **Le moteur d'inférence cellulaire pour la régulation d'un RTU**).

L'amélioration de l'indexation des solutions dans un raisonnement à base de cas avec deux évolutions successives ont été montrés à travers des études comparatives. La reconfiguration d'un réseau de transport urbain en exploitant la machine cellulaire CASI a été également détaillée dans ce chapitre (chapitre 5, **Apport de la machine cellulaire dans la régulation et la reconfiguration**).

Toute action de régulation nécessite une évaluation à travers des critères pertinents. A cet effet, un objectif spécifique de cette étude est de mettre l'accent sur la différence entre une

implémentation réelle des formulations mathématiques des actions de régulation, et les tableaux estimatifs proposés par les compagnies de transport à leurs régulateurs (Chapitre 6, **Evaluation des critères pour la prise de décision dans un système d'aide à la régulation**)

Au terme de ce travail, nous pouvons dire que nous avons exploité, une approche cellulaire pour la régulation et la reconfiguration d'un réseau de transport urbain collectif qui remplace, à elle seule et complètement, les différents modèles préalablement existants (le module à base de connaissance et le module raisonnement à base de cas) dans la plateforme SARRT originale.

L'expérimentation d'une approche cellulaire pour la régulation et la reconfiguration d'un RTU a permis, dans le contexte de cette étude :

- L'utilisation de moyens de contrôle pour gérer la base de connaissances,
- Une représentation booléenne de données,
- La possibilité de tester un nouveau modèle qui permet un gain substantiel en temps de réponse et en espace mémoire.

La plateforme SARRT, intègre complètement le principe cellulaire qui cohabite avec les systèmes classiques pour une période de transition permettant de compléter les tests au-delà des résultats préliminaires satisfaisants déjà obtenus.

Le travail présenté dans cette thèse est le fruit d'une collaboration étroite entre le laboratoire d'informatique d'Oran (Université d'Oran) et l'entreprise de transport d'Oran (ETO) par le biais de différents stages effectués par les ingénieurs du laboratoire au sein de cette entreprise de transport.

La réalisation du système d'aide à la régulation et à la reconfiguration basé sur la machine cellulaire CASI est fondée sur une architecture SMA.

Différentes perspectives peuvent être envisagées :

- Améliorer les algorithmes de régulation en s'intéressant plus aux correspondances et aux lignes à antennes.
- Améliorer la communication et la coopération entre les agents SUPERVISEUR, DIAGNOSTIC et CONSTRUCT en adoptant des protocoles de négociation. Ceci, dans le but de prendre en compte les priorités données par le régulateur aux nœuds de correspondances selon l'importance du trafic dans ces nœuds.

- Considérer des modèles d'estimation statistiques ou basés sur la théorie de la logique floue afin de tenir compte des incertitudes liées à ces données.

Enfin, nous espérons valider notre système en l'intégrant avec le module de simulation du futur réseau d'Oran, une fois que le redéploiement du réseau Bus par rapport à celui du tramway sera rendu public.



## Références Bibliographiques

- [Aamodt et al, 94] A. Aamodt et E. Plaza. "Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System ". AI Communications, 7(1) :36–59, March 1994.
- [Abbas-Turki et al, 02] A. Abbas-Turki, O. Grunder, R. BouyKhek, A. EL Moudni, "Modular Controlled Stochastic Petri nets for the connection monitoring", 4<sup>th</sup> International Symposium on Intelligent automation and Control, ISIAAC030, Florida, 2002.
- [Abdelouhab et Atmani, 08]F. Abdelouhab, B. Atmani, « Intégration automatique des données semi-structurées dans un entrepôt cellulaire ». Troisième atelier sur les systèmes décisionnels, 10 et 11 octobre 2008, Mohammadia – Maroc, pp. 109-120.
- [Amrani et al, 11] F. Amrani, K. Bouamrane, B. Atmani, D. Hamdadou. Une nouvelle approche pour la régulation et la reconfiguration spatiale d'un réseau de transport urbain collectif. Journal of decision systems, Vol 20 (2011), Number 2, pp.207-239
- [Amrani et Bouamrane, 10] F. Amrani, K. Bouamrane. In A. Respicio et al. (eds). Towards a cellular indexing in a case based reasoning approach : application to an urban transportation system regulation". Bridging the socio-technical gap in decision Support systems, 2010, pp 321-332.
- [Amrani et al, 09a] F. Amrani, K. Bouamrane, B. Atmani, « Vers un système de régulation cellulaire : cas d'un réseau de transport urbain ». Colloque sur l'Optimisation et les Systèmes d'Information, COSI'2009, 25-27 Mai 2009, Annaba, Algérie, Université Badji Mokhtar , Département Informatique (Poster).
- [Amrani et al, 09b] F. Amrani, K. Bouamrane, B. Atmani « Vers une indexation cellulaire dans les approches à raisonnement à base de cas: Application à la régulation d'un réseau de transport urbain collectif ». Atelier des systèmes Décisionnels ASD 2009, 10-11 Novembre 2009, Jijel (Algérie). p161-171.
- [Atmani et Beldjillai, 07]B. Atmani, B. Beldjilali, « Knowledge Discovery in Database : Induction Graph and Cellular Automaton". Computing and Informatics Journal, Vol. 26 N°2 171-197.
- [Balbo, 00] F. Balbo "ESAC : Un modèle d'interaction Multi-agent utilisant l'environnement comme support actif de communication : Application à la gestion des transports urbains", Thèse de doctorat, Université PARIS IX Dauphine, 28 janvier 2000.
- [Barigou et al, 11] F. Barigou, B. Atmani, N. Barigou. Un Automate Cellulaire pour la Détection de Spam, EGC'2011, Atelier Extraction de Connaissance et Santé.
- [Benamina et Atmani, 08]M. Benamina, B. Atmani. « WCSS: un système cellulaire d'extraction et de gestion des connaissances ». Troisième atelier sur les systèmes décisionnels, 10 et 11 octobre 2008, Mohammadia – Maroc, pp. 223-234.
- [Bomarius, 92] F.A. Bomarius, "Multiagent approach towards modeling urban traffic scenarios ". Technical Report RR-92-47, DFKI-GmbH, Germany, 1992.
- [Bouamrane et Beldjilali, 04] K. Bouamrane, B. Beldjilali, « A case-Based Reasoning for Regulation of an Urban transportation Network, Computer Science Journal of Moldavia, Vol 12, N°3(36), December 2004, pp 424-429

- [Bouamrane et al, 05] K. Bouamrane, T. Bonte, M. Sevaux, C. Tahon, "SART : Un système d'aide à la décision pour la régulation d'un réseau de transport bimodal", MHOSI'2005, Hammamet (Tunisie) 24-26 Avril 2005, pp187-192.
- [Bouamrane et al, 05b] K. Bouamrane, et al., "Etudes et recherches technologiques dans les transports terrestres", Rapport collectif sur la deuxième phase du projet coopératif SART : Système d'Aide à la Régulation de Trafic du réseau de transport Valenciennois et de ses pôles d'échanges, Juillet 2005.
- [Bouamrane, 06] K. Bouamrane. « Un système interactif d'aide à la décision pour la régulation d'un réseau de transport urbain bimodal: approche multi-agent et raisonnement à base de cas ». Thèse de doctorat d'état, Université d'Oran, Département Informatique, 2006.
- [Bouamrane et al, 06b] K. Bouamrane, A. Liazid, F. Amrani, "Modelling and Cognitive Simulation in Dynamic Situation: Decision-Making for Regulation of an Urban Transportation System", Proceeding de la 4th International conference on Computer science and Information technology, du 5-7 Avril 2006 Amman,- Jordanie.
- [Bouamrane et Amrani, 07a] K. Bouamrane, F. Amrani. "A proposed regulation strategy for an urban transportation system" HuMaN'07, Conférence Internationale sur l'Interaction Humain-Machine, pp 333-339, Timimoun, Algérie du 12-14 mars 2007.
- [Bouamrane et Amrani, 07b] K. Bouamrane, F. Amrani. « Un système d'aide à la régulation pour un réseau de transport urbain collectif : Vers une approche à base de cas » . Journal of Decision Systems, Vol 16 (2007), pp 469-504.
- [Bouamrane et al, 12] K. Bouamrane, HA. Beghdadi, N. Belayachi, "Towards a numerical model for the representation of an urban transportation system". In 4th International Conference on Web and Information Technologies ICWIT'2012, April 29-30, Sidi bel abbes, Algeria, pp 93-101
- [Brézillon et al, 03] P., Brézillon, « Représentation de pratiques dans le formalisme des graphes contextuels ». In: J.M.C. Bastien (Ed.), Actes des Deuxièmes Journées d'Etude en Psychologie Ergonomique – EPIQUE'2003, INRIA, pp.263-268.
- [Brézillon et al, 00] P. Brézillon, Naveiro R., Cavalcanti M. Pomerol J-Ch., "SART: An Intelligent Assistant System for Subway Control", Pesquisa Operacional, Vol. 20, No.2, 2000, p. 247-268.
- [Brézillon et al, 99] P. Brézillon, J-CH Pomerol, "Contextual knowledge sharing and cooperation in intelligent assistant systems". Le Travail Humain, 1999, 62(3): 223-246.
- [Castelain et al, 02] E. Castelain, K. Mesghouni, "Regulation of a Public transport network with consideration of the passenger flow: modelling of the system with high -level Petri-Nets", Proceeding of the IEEE SMC, conference, WA2C3, hammamet, Tunisia, 6-9 October 2002.
- [Certu, 97] Evaluation des transports en commun en site propre : Indicateurs transport pour l'analyse et le suivi des opérations ; Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et constructions publiques, Novembre 1997.
- [Chaib-draa, 95] B. Chaib-draa, "Industrial Applications of Distributed AI", Communications of the ACM, Vol 38, N° 11, pp49-53, November 1995.
- [Chaib-draa, 96] B. Chaib-draa, "Interaction between Agents in Routine, Familiar and Unfamiliar Situations", International Journal of Intelligent & Cooperative Informaion Systems, Vol 5(1), pp 1-25, 1996.

- [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, 18 décembre 2002.
- [Chihaib, 02] F. Chihaib Bouzbouz, "Approche floue pour la régulation multimodale dans les réseaux de transports urbains en mode perturbé ", thèse, université de Lille, décembre 2002.
- [Cure et Foraste, 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.
- [Dad, 11] Dad Djouhra. Modélisation et simulation du flux dans un réseau pour la régulation du trafic. Thèse de magister, Département d'informatique, Université d'Oran, Algérie, Juillet 2011.
- [DiCesare et al., 94] F. DiCesare, P. Kulp, K. Gile, and G. List. "The applications of Petri Nets to the Modeling Analysis and Control of Intelligent Urban Traffic Networks". Application and theory of Petri nets, 815 of Lecture Notes in Computer Science : 2–15, Jun 1994.
- [Durfee et al, 91] E.H.Durfee, V.R.Lesser, "Partial global planning: A coordination framework for distributed hypothesis formation", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1991.
- [El-Hadouaj et al, 00] S. El-Hadouaj, A. Drogoul, A. Espié, "How to combine reactivity and Anticipation : the case of Conflict Resolution in a Simulated road Traffic ". MABS'2000 Workshop, springer Verlag LNAI series, Boston, USA, 2000.
- [Espié, 02] S. Espié, "Approche multi-acteur dans la simulation de trafic automobile ",. Livre "Organisations et applications des SMA ", R. Mandiau, G. Le Strugeon, A. Péninou (edts) pp 259-278, Editions Hermes, 2002.
- [Ezzedine et al, 05] Ezzedine H., Kolski C., and Péninou A. Agent-oriented design of human-computer interface : application to supervision of an urban transport network. Engineering Applications of Artificial Intelligence, Elsevier, 18 : 255–270, 2005.
- [Farreny, 87] H. Farreny, M.Ghallab, " Elément d'Intelligence artificielle'', traiter de nouvelle technologie, Série intelligence artificielle, Edition Hermès, Paris 1987.
- [Farreny, 92] H. Farreny et M. Ghallab « Éléments d'intelligence artificielle », Edition Hermes, 1992
- [Fayech, 03] B. Fayech Chaar, "Régulation des réseaux de transport multimodal : Systèmes Multi-agent et algorithmes évolutionnistes ", Thèse de doctorat, Université de Lille, 2003.
- [Feigenbaum, 93] Edward A. Feigenbaum: Tiger in a Cage: The Applications of Knowledge-based Systems (1993) - Abstract. AAAI 1993: 852
- [Ferber, 95] J.Ferber, "Les systèmes Multi-Agents : Vers une intelligence collective", Informatique et Intelligence Artificielle, InterEditions, Paris, 1995.
- [Ferber, 97] J.Ferber, "les systèmes Multi-agents " : un Aperçu général ", TSI, Vol 16, N°8, pp979-1012, 1997.
- [Ferber et al, 98] J.Ferber, O.Gutknecht, "A meta-model for the analysis and design of organizations in multi-agent systems", Paris, 1998.
- [Fuchs, 97] B. Fuchs, "Représentation des connaissances pour le raisonnement à partir de cas ", Thèse de doctorat, 1997.

- [Fuchs et al, 99] B.Fuchs, J. Lieber, A. Mille et A.Napoli, "Vers une théorie unifiée de l'adaptation en raisonnement à partir de cas", Actes de RàPC99, Palaiseau, France, p. 77-85, 1999.
- [Fougères, 00] A.J Fougères, "Un système tutoriel intelligent pour la formation des régulateurs de trafic d'une compagnie de transport en commun ", colloque sur la multimodalité, IMAG, Grenoble, Mai 2000.
- [Gruer et al, 01] P. Gruer, V. Hilaire, A. Koukam, "Multi-Agent Approach to Modelling and Simulation of Urban Transportation Systems", Proceeding of 2001 IEEE SMC Conference, 6-10 October 2001, Tucson, Arizona, USA, pp 2499-2504.
- [Gutknecht et al, 00] O. Gutknecht, J.Ferber et F. Michel, "MADKIT : Une expérience d'architecture de plate forme multi-agent générique", Actes des journées francophones d'IAD et SMA, pp 223-236, France, 2-4 Octobre 2000.
- [Grady et al, 00] Grady Booch, James Rumbaugh, Ivar Jacobson (2000). Le guide de l'utilisateur UML (ISBN 2-212-09103-6)
- [Haghani et al, 02] A. Haghani, M. Banihashemi, "Heuristic approaches for Solving large-scale bus transit vehicle scheduling problem with route time constraints", transportation research, Part 36, pp 309-333, 2002.
- [Hernandez et al, 01] J.Z Hernandez, S. Ossowski, A. Garcia-Serrano, "On Multi-agent coordination architecture : A traffic management case study ", Proceedings of the 34<sup>th</sup> Hawaii International Conference on System Sciences (IEEEICSS'01), 2001.
- [Huissman et al, 02] D. Huissman, R. Freling, A.P.M Wagelmann, "A Dynamic Approach to Vehicle Scheduling", Econometric Institute, Erasmus. University of Rotterdam, Netherlands, report EI2001-17 (Accepted for transportation Science on august 22, 2002.
- [Jaczynski et al, 97] M. Jaczynski, B.Trousse, "CBR\*Tools : une bibliothèque objet pour l'indexation des cas par situation comportementale", Rapport de recherche INRIA, N° 3215, Juillet 1997.
- [Jennings et al, 98] N.R. Jennings, K.Sycara, M.J.Wooldridge, "A Roadmap of agent research and development", Autonomous Agents and Multi-Agents Systems, 1998.
- [Jovic, 92] F. Jovic, "Expert systems in Process Control", Chapman & Hall London 1992.
- [Kabachi et al, 96] N. Kabachi, L.Vincent, Y.Ouzrout, "Une société d'agents pour la prise de décision dans les organisations productive", actes des journées francophones d'IA Distribuée et SMA, pp 35-46, 1996.
- [Kabachi, 99] N.Kabachi, "Modélisation et apprentissage de la prise de décision dans les organisations productives : Approche Multi-agent", thèse de doctorat en informatique, Université Jean Monnet et Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 1999.
- [Kadem et Atmani, 10] H. Kadem et B. Atmani, « Conception d'une Plateforme Cellulaire Open Source d'Extraction et de Gestion des Connaissances : WS4KDM\_1.0 », 7<sup>ème</sup> séminaire National en Informatique Biskra, SNIB'2010, 2-4 Novembre 2010.
- [Khorovitch et al, 91] B.G. Khorovitch, G. Catalano, P. Höflinger, M. Leprince, "Aspects techniques et économiques de systèmes d'aide à l'exploitation ", Transport public, 91. Union Internationale des transports Publics (UITP 91), 49<sup>ème</sup> Congrès International, Stockholm, 1991.
- [Labidi et al, 93] S. Labidi, W. Lejouad, "De l'intelligence artificielle distribuée aux systèmes multi-agents ", Rapport de recherche INRIA, N°2004, Août 1993.

- [Lahlouhi, 01] A. Lahlouhi, "Méthodologie de développement d'environnements de développement de SMA ", Techniques et Sciences Informatiques, Vol 1, N°1, 2001.
- [Lamontagne et al, 02] L. Lamontagne, et L. Lapalme, "Raisonnement à base de cas textuels. Etat de l'art et perspectives ". RSTI – RIA. Volume 15 – n°3/2002, pp. 339 à 366.
- [Laïchour, 02] H. Laïchour, "Modélisation mutli-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, 20 décembre 2002.
- [Mansoul et Atmani, 09] A. Mansoul, B. Atmani: « Fouille de données biologiques: vers une Représentation Booléenne des Règles d'Association ». CIIA 2009
- [Menaouer et Atmani, 09] M. Brahami, B. Atmani. « Vers une Cartographie des Connaissances Guidée par la Fouille des Données ». CIIA 2009.
- [Nait-Sidi et al, 02] A. Nait Sidi Moh, M.A. Mainier, A. El Moudni, "A Controlled policy for public transport network modelled by Petri nets and max-Plus Algebra ", CD-ROM proceeding of World automation Congress, ISIAAC 028, WAC 2002, Orlando, Florida, USA, June 9-13, 2002.
- [Nakhaeizadeh, 94] G. Nakhaeizadeh. "Learning prediction from time series : a theoretical and empirical comparison of CBR with some other approaches". In topics in case-based reasoning, volume 837 of lecture Notes in artificial Intelligence, pages 65-76. Springer, 1994.
- [Ngamchai et al, 00] S. Ngamchai, D.J Lovell, "Optimal time transfer in bus transit route network design using genetic algorithms ", 8<sup>th</sup> International Conference CAPST, Computer Aided scheduling of Public transportation, Berlin, Germany, 21-23 June 2000.
- [Nguena et al, 07] Marius Nguena Kengni, Didier Buchs, and Ang Chen M. Projet de Bachelor, TPG Control Center : Tramway modeling and Simulation. Centre universitaire d'informatique, Université de Genève, 16 Novembre 2007.
- [Nguyen, 08] Khoat Nguyen Duc. Contribution à l'étude des problèmes de réordonnancement en cas de perturbation dans un système de transport de voyageurs dans une ville. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France, 2008.
- [Pasquier, 02] L. Pasquier. "Modélisation de raisonnements tenus en contexte. Application à la gestion d'incidents sur une ligne de métro ". Thèse LIP6, soutenue le 19/07/2002,
- [Pomerol, 93] J. Pomerol , " Les systèmes experts ", Collection CTP, Hermès, 1993.
- [Rizzi et Guichoux, 97] M. Rizzi, B. Guichoux "Systèmes d'information objet pour l'exploitation des réseaux de surface ". Documentation interne de la RATP, département Bus, Méthodes et systèmes d'exploitation, 1997.
- [Roozmond, 99] D.A Roozmond, "Using Intelligent agents for Urban traffic control systems ". In Proceedings of the 11<sup>th</sup> Mini-EURO conference on artificial intelligence in transportation systems and science, and 7<sup>th</sup> EURO working group meeting on transportation. Helsinki University of Technology, Helsinki, August 2-6, 1999.
- [Sabas, 01] A. Sabas, "Systèmes Multi-agents : une analyse coopérative des méthodologies de développement (Vers une convergence des méthodologies de développement et la standardisation des plates-formes SMA ", Maîtrise en

Mathématiques et informatiques appliquées. Université du Québec à Trois-rivières, 2000.

- [Sabri et Atmani, 10] M. Sabri, B. Atmani, « Système d'assistance aux recherches épidémiologiques et de surveillance des maladies : Modélisation Booléenne VSST'2010 », 25-29 Octobre 2010.
- [SAE, 02] Cahier des charges, Dossier N° A 61 SAE, Cahier des charges techniques particulières. Semurval, SITURV, Valenciennes, 2002.
- [Saussol et 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 ", juin 2000.
- [Semurval, 04] Document Semurval sur les actions de la régulation, reçu le 29 janvier 2004.
- [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 de l'université de Lille 1, janvier 2000.
- [Sycara, 98] K.P.Sycara, "Multi-agent Systems ", American Association for Artificial Intelligence, AI Magazine, pp 79-92, 1998.
- [Wang et al., 99] Wang J., Jin C., and Deng Y. Performance analysis of traffic networks based on stochastic timed Petri net models. IEEE ICECCS99 : 77-58, 1999.
- [Wynter et Lolito, 03] Wynter L. and Lolito P. Boîte `a outils, affectation du trafic de scilab : étude sur l'analyse de transport en région périurbaine. In 10<sup>ème</sup> rencontre INRIA Industrie., Application de l'informatique et de l'automatique aux transport, Paris-Rocquencourt, 16 Janvier 2003.
- [Zidi, 07] Zidi Saleh. Système d'Aide à la Régulation et la Reconfiguration des réseaux de transport multimodal. PhD thesis, Université des sciences et technologie de Lille, France, Juillet 2007.

## Signets

- [Hastus] [Http://www.gico.ca](http://www.gico.ca), consulté en octobre 2006.
- [Transports] [www.transports.equipement.gouv.fr](http://www.transports.equipement.gouv.fr), consulté le 05/03/2010.
- [Sipina, 12] [eric.univ-lyon2.fr/~ricco/sipina\\_download.html](http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/sipina_download.html) -, *consulté en avril 2012*

## ***Bibliographie Personnelle***

Dans le cadre de nos travaux pour la réalisation de cette thèse, nous avons publié et contribué à 09 articles dont deux dans des revues internationales, trois dans des Congrès ou Conférences internationales avec actes édités ISBN et quatre dans des conférences nationales/internationales, workshops et colloques.

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.

### **1. CSIT2006, avril 2006**

[Bouamrane & al, 06b] “*Modelling and Cognitive Simulation in Dynamic Situation: Decision-Making for Regulation of an Urban Transportation System*”, Proceeding de la 4<sup>th</sup> International conference on Computer science and Information technology, du 5-7 Avril 2006 Amman,- Jordanie.

Ce papier s’intéresse principalement à la modélisation cognitive et au comportement des régulateurs en PCC. Il a été le moteur de l’intérêt apporté dans cette thèse à certains aspects liés au régulateur dans le traitement des perturbations, vis-à-vis de la plateforme SARRT.

### **2. Human’07**

[Bouamrane et Amrani, 07a] “*A proposed regulation strategy for an urban transportation system*” **HuMaN’07**, Conférence Internationale sur l’Interaction Humain-Machine, pp 333-339, Timimoun, Algérie du 12-14 mars 2007.

Cet article marque le début de nos travaux. En effet, il y a été exposé le système d’aide à la régulation dont nous nous sommes inspirés, et qui a représenté les perspectives sur lesquelles nous nous sommes basés pour effectuer notre étude.

Cet article est lié aux chapitres 4,5 et 6.

### **3. JDS’2007**

[Bouamrane et Amrani, 07b] *Une nouvelle approche pour la régulation et la reconfiguration spatiale d’un réseau de transport urbain collectif*

**Journal of decision systems JDS, Volume 20, Number 2, pp.207-239, 2011 - (ISSN 1246-0125)**

Clicours.COM

Cet article dans lequel, nous avons contribué au début de notre thèse, nous a permis d'identifier les problèmes inhérent au SAR proposé dans la thèse de Mr Bouamrane [Bouamrane, 06], et de réfléchir aux moyens d'y remédier. Cet article est lié à l'ensemble de la thèse.

#### **4. COSI' 2009**

[Amrani et al, 09a] *Vers un système de régulation cellulaire : cas d'un réseau de transport urbain*. Colloque sur l'Optimisation et les Systèmes d'Information, COSI'2009, 25-27 Mai 2009, Annaba, Algérie, Université Badji Mokhtar , Département Informatique (Poster).

Cet article présente notre première contribution basée sur un moteur d'inférence cellulaire. Il a contribué à la rédaction du chapitre 4.

#### **5. ASD' 2009**

[Amrani et al, 09b] *Vers une indexation cellulaire dans les approches à raisonnement à base de cas : Application à la régulation d'un réseau de transport urbain collectif*. Quatrième Atelier des Systèmes Décisionnels, pp 161-171, ASD 2009, **10 et 11 Novembre 2009, Jijel, Algérie**. (ISBN 978-9961-9913-0-5).

Cet article présente les premières ébauches de notre deuxième contribution relative au raisonnement à base cas cellulaire. Il a contribué à la rédaction du chapitre 5.

#### **6. DSS'2010**

[Amrani et Bouamrane, 10] *Towards a cellular indexing in a case based reasoning approach: application to an urban transportation system regulation*". Bridging the socio-technical gap in decision Support systems: Challenges for the next decade,

A. Respicio et al. (eds), Vol (212), **Frontiers in Artificial Intelligence and Applications**, IOS Press, Juillet 2010, pp 321-332

Ce papier, qui a été présenté au DSS'2010 au Portugal, s'intéresse à la formulation de la problématique de régulation et propose l'intégralité de notre contribution concernant l'indexation cellulaire pour un raisonnement à base de cas.

Cet article a contribué à la rédaction du chapitre 5. Nous y exposons un scénario de perturbation régulé via un RBC cellulaire.

## **7. JDS'2011**

[Amrani et al, 11] *Une nouvelle approche pour la régulation et la reconfiguration spatiale d'un réseau de transport urbain collectif*

Journal of decision systems JDS, Volume 20, Number 2, pp.207-239, 2011 - (ISSN [1246-0125](#))

Cet article, représente une synthèse de l'ensemble de nos contributions dans le cadre de la régulation ou la reconfiguration d'un RTU. Nous y exposons, tous les résultats obtenus avec des études comparatives. Il a contribué à la rédaction des chapitres 4 et 5.



# *Modélisation du RTU par les SMA*

## **A.1 Introduction**

L'Intelligence Artificielle (IA) qui est apparue au début des années 60 avait pour objectif d'aborder des problèmes complexes par la modélisation et la simulation de comportements humains dits intelligents. Les approches proposées reposaient sur une centralisation des connaissances et des traitements au sein d'entités uniques. Les problèmes liés à l'accumulation des connaissances de nature diverse sont rapidement apparus et ont guidé les chercheurs vers de nouvelles voies.

Les travaux menés au début des années 70 sur la concurrence et la distribution ont contribué à la naissance d'une nouvelle discipline nommée l'Intelligence Artificielle distribuée (IAD) [Labidi et al, 93]. Ce paradigme s'éloigne de la problématique du penseur unique pour s'intéresser aux difficultés de la cohabitation d'une communauté de penseurs.

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

- La résolution distribuée de problèmes (RDP) qui étudie comment distribuer des compétences au niveau de chaque partie du système, de façon à ce qu'il soit globalement plus compétent que chacune de ses parties
- La simulation des systèmes complexes (SSC) qui concerne plus particulièrement les SMA. Les SMA traitent le comportement d'un ensemble d'agents autonomes qui essaient de résoudre un problème commun.

La différence notable entre la RDP et les SMA est que la RDP est une approche descendante (Top down) et les SMA représente une approche ascendante (Bottom up)

L'intérêt est porté sur le paradigme multi-agent dont l'objectif est de permettre à un ensemble d'agents intelligents de fonctionner en commun à partir d'un contrôle décentralisé. Le paradigme multi-agent combine de nombreux avantages :

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

Les RTU formant des systèmes ouverts, distribués et complexes, leur gestion par des Systèmes Multi-Agents (SMA) est bien adaptée. Ainsi, cette annexe présente un Système Multi-Agent d'aide à la régulation pour un RTU dénommé : SARRT (Système d'Aide pour la Régulation d'un Réseau de Transport).

La section deux aborde les applications des SMA, et tout particulièrement dans le domaine des transports. Enfin, la troisième section est consacrée à la description du SMA proposé ainsi qu'aux comportements et rôles des différents agents le composant. Le choix d'une architecture multi-agents a

été adopté suite à de nombreux travaux réalisés [laichour, 02] [fayech, 03][Bouamrane et al, 04a] [Bouamrane et al, 05c; Bouamrane et al, 05e].

## **A.2 Application des SMA**

### **A.2.1 Applications générales**

Les SMA possèdent des applications diverses qui ont évolué avec le développement des outils technologiques et surtout de l'Internet [Chaib-draa, 95] [Jennings et al, 98] [Syscara, 98].

En ce qui concerne les :

- applications industrielles, nous retrouvons la gestion de production manufacturière [Kabachi et al, 96], contrôle et commande des processus (accélérateur de particule), télécommunication (gestion et contrôle des réseaux, transmission, etc.) et systèmes de transport (surveillance des véhicules automatisés (DVMT : « Distributed vehicle Monitoring Task », etc.),
- 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.

### **A.2.2 Applications dans le domaine des transports**

Compte tenu de la nature distribuée des systèmes de transport, différents travaux ont vu l'application des SMA pour diverses problématiques telles que :

- la surveillance des véhicules automatisés [Durfee et al, 91],
- les systèmes d'aide au pilotage des avions militaires [Chaib draa, 95].

En ce qui concerne le trafic aérien, il existe le système SMA, nommé OASIS<sup>15</sup> proposé par [Ljungberg et al, 92], 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.

F.A.Bomarius [Bomarius, 92] propose une modélisation multi-agent des scénarii du trafic urbain au niveau des carrefours. Dans sa modélisation, il y a trois types d'agents : des agents véhicules, des agents feux (feux de signalisation) et des agents parking. Au niveau d'un carrefour, il existe quatre agents feux.

MARS [Fischer et al, 95] est une plate-forme de simulation multi-agent pour le transport de 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 transports et aux camions.

Chaib-draa [Chaib-draa, 95] présente dans ses travaux un cadre pour concevoir un système multi-agent dans lequel les agents sont capables de coordonner leurs activités dans des situations de routines familières ou non familières. il propose le modèle S-R-K (Compétences, Règles, Connaissances) inspiré du modèle de Rasmussen. La partie compétences représente les réflexes d'un agent. La partie

---

<sup>15</sup> Optimal Aircraft Sequencing using Intelligent Scheduling

règles contient un ensemble de règles résultant d'actions préalablement enregistrées permettant ainsi à un agent, dans le cadre d'une situation familière, de retrouver le plan et de le mettre en œuvre. La partie connaissances intervient dans des situations non familières. Ces trois parties sont reliées les unes aux autres de façon hiérarchique figure (A.1). Il démontre à travers quelques scénarii de trafic urbain, l'applicabilité des concepts qu'il développe [Chaib-draa, 96]

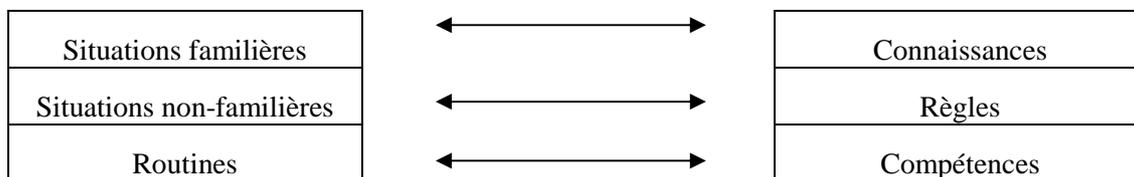


Figure A.1 : Modèles S-R-K de coordination multi-agent à trois niveaux

[Gruet et 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.

[Saussolet et 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, STATION, SECTION, DEPOT ou INTERFACE.

[Balbo, 00] propose aussi un SMA d'aide à la décision pour la régulation d'un réseau de transport par bus. Il est composé d'agents : ARRET, BUS, INCIDENT et ZONEARRET.

Dans le cadre de la régulation toujours, [Laichour, 02] propose un modèle multi-agent qui se base sur trois types d'agents : ACQUISITION, CORRESPONDANCE et SUPERVISEUR et traite particulièrement les perturbations aux pôles d'échanges.

Enfin, [Fayech, 03] propose un SMA couplé à une approche évolutionniste, elle se base sur cinq types d'agents : VEHICULE, ARRET, INCIDENT, ZONEPERT, ZONEREG. ZONEREG étant l'agent chargé de la régulation en exploitant un algorithme génétique.

D'autres travaux dans le domaine existent, nous citons :

- Régulation du trafic urbain [Roozmond, 99]
- La simulation des comportements des conducteurs humains [El-hadouaj et al, 00] [Espié, 02][Champion et al, 01]
- Formation des régulateurs de trafic d'une compagnie de transport en commun [Fougères, 00]
- La gestion du trafic urbain [Hernandez et al, 01]

### A.2.3 Discussion

Les réseaux de transport urbain étant des systèmes dont les informations sont dispersées et où la télécommunication est mobile, ceci induit que leur modélisation par des systèmes distribués soit recommandée. Par conséquent le choix d'une modélisation du réseau urbain basée sur une approche Agent est bien approprié, d'autant plus que son efficacité a été démontrée par plusieurs applications dans le domaine du transport [Gruet et al, 01].

Pour la modélisation du système proposé d'aide à la régulation pour un réseau de transport, le choix s'est porté sur une approche multi-agent.

Pour concevoir le SMA d'aide à la régulation, nous nous sommes inspirés de la méthodologie de conception proposée par Ferber [Ferber et al, 98] et Gutknecht [Gutknecht et al, 00]. En effet, la décomposition modulaire du processus de régulation résulte en un grand nombre de tâches qui peuvent être associés à des rôles :

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

Par conséquent, en fonction des différentes analyses effectuées concernant les différentes architectures SMA pour la régulation d'un réseau de transport [Bouamrane, 06], un **Système Multi-Agent d'Aide à la Régulation pour un Réseau de Transport Urbain (SARRT)** conçu pour la régulation d'un réseau de transport est proposé.

### **A.3 Le modèle SMA d'aide à la décision proposé**

Les réseaux de transport urbain formant des systèmes ouverts, distribués et complexes, leur gestion par les SMA est bien adaptée. Un Système d'aide à la régulation pour un réseau de transport « SARRT » basé sur une approche multi-agent intégrant des modules de régulation à base de raisonnement mathématiques, de raisonnement à base de cas (RBC) et exploitant un système à base de connaissance (SBC) est proposé [Bouamrane et Beldjilali, 04; Bouamrane et al, 05c; Bouamrane et al, 05e]. Le protocole de communication adopté est KQML "Knowledge Query and Manipulation Language [Labrou et al, 97].

#### **A.3.1 Description de SARRT**

##### *a) Rôle de SARRT*

Pour réguler un réseau de transport urbain, il est proposé au régulateur dans son PCC, un système d'aide à la régulation SARRT qui a pour rôle de l'assister dans les différentes tâches de :

- surveillance,
- diagnostic,
- décision.

Le régulateur supervise l'exploitation du réseau en s'appuyant sur les données reçues du SAE qui sert alors comme support. Il peut aussi s'appuyer sur les informations qu'il reçoit par le biais du téléphone de la part des conducteurs [Bouamrane & al, 05c]. Le régulateur reçoit directement les perturbations captées par le SAE dans son PCC, il peut aussi saisir au niveau du SARRT toute perturbation transmise par téléphone de la part des conducteurs.

Le régulateur dispose d'un choix concernant les modes de régulation en fonction de son savoir-faire concernant la régulation. En effet, il peut choisir de réguler seul (mode manuel), en mode semi-

automatique (choix de logique de régulation) ou bien de façon automatique (aucune intervention du régulateur). Le SARRT, sur la base d'un choix de mode de régulation effectué par le régulateur, soit il affiche la solution construite par le régulateur dans le cas du mode manuel ou bien une ou plusieurs solutions dans le cas semi-automatique et automatique.

A ce stade, les communications entre les différents modules en précisant la position du SARRT par rapport au SAE sont illustrées figure (A.2) :

- Régulateur-SARRT : dans ce sens, elle représente la mise à jour de quelques données relatives aux perturbations (fournies par les conducteurs), demande ou validation des actions de régulation, dans l'autre sens, la proposition de solutions en cas de demande.
- SARRT-SAE : application des actions de régulation retenues et validées par le régulateur. Mise à jour du tableau de marche et des données propres aux agents dans l'autre sens. Dans l'autre sens, par l'envoi de l'ensemble des perturbations détectées suite à un écart entre l'horaire théorique et l'horaire réel.

En ce qui concerne la relation régulateur-SAE, celle-ci est représentée par la saisie en différé par le régulateur en personne ou par le service graphico du TM.

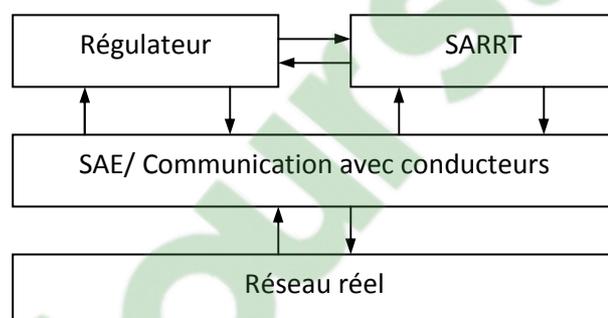


Figure A.2 : Intégration du SARRT dans le processus global de contrôle du réseau

#### b) Les agents de SARRT

Le SARRT est composé de deux modules distincts :

- 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 fonctionne dans les conditions normales et perturbées. Il est constitué des agents :

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

**Remarque :** le véhicule peut être un bus, un tramway et éventuellement un métro dans le cas d'un réseau multimodal.

Le module de régulation traite les perturbations concernant les modes de transports bus et tramway (Dans notre étude, on se contente des véhicules de type Bus). Ce sont seulement les actions de régulation qui diffèrent entre les différents modes. Le module de régulation n'opère qu'en mode perturbé. Il est créé à l'apparition d'une perturbation. Les agents qui le compose sont :

- SUPERVISEUR : responsable de la gestion des perturbations (identification, médiation entre les autres agents et le régulateur, demande de validation des solutions proposées, etc.)
- DIAGNOSTIC : responsable du diagnostic des perturbations, l'identification des contraintes et le choix des agents de régulation CONSTRUCT et RBCC.
- CONSTRUCT : responsable de la construction des nouvelles solutions par le régulateur, l'exploitation du moteur d'inférence cellulaire.
- RBCC : responsables de la résolution avec une approche à base de Cas (avec dans le cadre de notre étude, l'intégration d'une indexation cellulaire). Ainsi, que de l'exploitation de l'action de régulation « changement d'itinéraire » (Déviation).

Ces agents coopèrent entre eux avec ceux du module de surveillance pour analyser, évaluer et traiter les différents incidents affectant le trafic du réseau. Une synthèse de cette coopération est proposée dans le tableau (A.1).

| <b>Modules</b>             | <b>Agents</b>       | <b>Rôles</b>                                                                                               |
|----------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Module surveillance</b> | VEHICULE et STATION | Surveillance et détection                                                                                  |
| <b>Module régulation</b>   | SUPERVISEUR         | Identification du contexte et Suivi de la régulation                                                       |
|                            | DIAGNOSTIC          | Diagnostic des perturbations et sélection des agents pour la régulation                                    |
|                            | CONSTRUCT           | Régulation en exploitant le moteur d'inférence cellulaire                                                  |
|                            | RBCC                | Régulation en exploitant une base de cas (Indexation cellulaire) et le module « changement d'itinéraire ». |

*Tableau A.1 : Identification des agents par leur rôle.*

### *c) Organisation du SARRT*

En situation normale, le SARRT a recours au module de surveillance. Ceci correspond à l'organisation statique caractérisée par la gestion des horaires de passage des véhicules aux différents arrêts. Les agents s'échangent des informations afin de vérifier le respect des TM 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 STATION. L'organisation dynamique ne prend effet que suite à la détection d'une perturbation pour gérer la perturbation. Ainsi, le module de régulation à une organisation dynamique. En fait, sa composition dépend des perturbations et de leurs évolutions dans le temps et dans l'espace. La figure (A.3) donne un aperçu de l'organisation du SARRT.

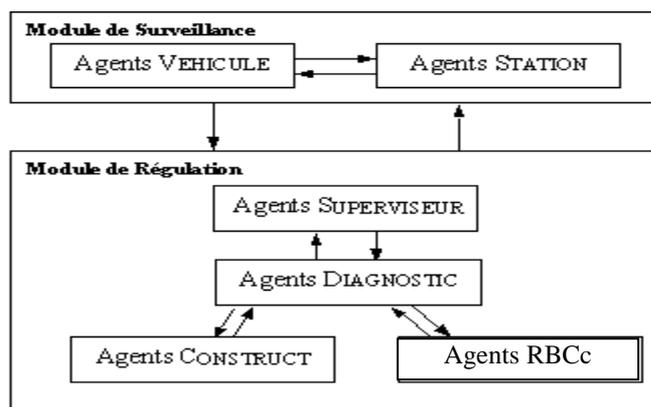


Figure A.3: Organisation des agents du SARRT

#### d) Architecture des agents

Le modèle interne des agents du SARRT contient une base de connaissances, une base d'objectifs et des modules de communication, de raisonnement et de contrôle. Ainsi un agent possède :

- Une base de connaissances contenant les données propres à cet agent ainsi que les autres agents.
- Une base d'objectifs contenant les buts à atteindre par l'agent.
- Un module de communication responsable de la réception/émission des messages provenant ou en direction de l'environnement ou des autres agents.
- Un module de raisonnement contenant les méthodes de raisonnement de l'agent pour prendre des décisions. Il exploite pour cela, les données provenant de la base des connaissances.
- Un module de contrôle chargé de gérer les différents modules internes et la mise à jour des connaissances. Ainsi que la gestion des actions associées aux messages d'émission/réception.

Pour assurer le dialogue entre le régulateur et le système multi-agent, un agent appelé SUPERVISEUR est défini. Il est chargé de l'échange d'informations décisionnelles entre les agents DIAGNOSTIC, CONSTRUCT, RBCC et le régulateur.

### A.3.2 Comportement des différents agents

#### a) Agent VÉHICULE

A chaque véhicule  $V_i^l$  est associé un agent. Chaque agent a pour but d'appliquer le TM qui le concerne. Il doit aussi appliquer les actions de régulation qui sont sélectionnées et validées par le régulateur

La base de connaissances des agents VEHICULE comprend les différentes informations qui décrivent leurs courses et caractéristiques (phase 1 et 2 du processus décisionnel):

- un numéro d'identification unique (N° véhicule),
- sa capacité et sa charge (La charge étant calculée grâce aux données de l'enquête Origine-Destination),
- son itinéraire et la ligne du réseau qu'il dessert,
- le prochain arrêt à desservir et la distance le séparant de cet arrêt,
- le prochain terminus à desservir et la distance le séparant de ce terminus,

- le dépôt le plus proche et la distance le séparant du dépôt,
- son TM (les horaires théoriques de passage relatifs à son itinéraire et les correspondances),
- etc.

Ces agents intègrent principalement les actions suivantes :

- Déplacer : action à réaliser quand le véhicule est en interstations,
- 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 connaissance (*Exemple* : pour le Réseau de MontBéliard<sup>16</sup>, la mise à jour est au maximum toutes les 10 secondes).

La mise à jour des données est une conséquence directe de l'exécution des actions de régulation imposées au véhicule. En effet, les actions agissent sur les horaires de passage, et les durées d'arrêt (arrêt de régulation et terminus) et de parcours, qui sont inclus dans la base de connaissances de l'agent. La figure (A.4) présente le comportement de l'agent VEHICULE selon un formalisme Réseau de Petri.

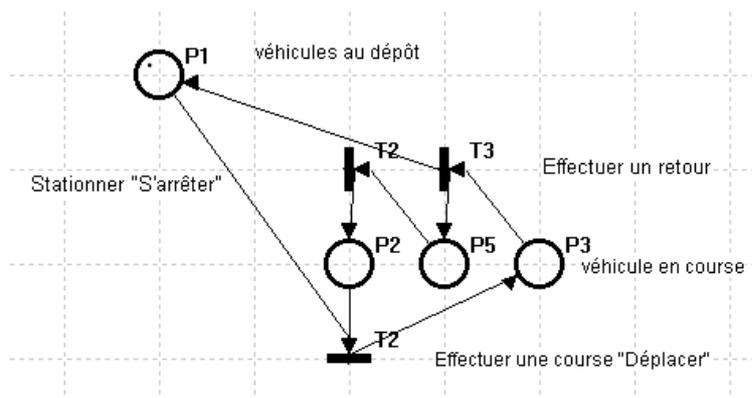


Figure A.4 : Comportement des agents VEHICULE

Les agents VEHICULE fournissent, en cas de demande, des informations telles leurs positions, une estimation de leurs horaires d'arrivée ou des retards éventuels. Ces deux dernières données sont calculées à travers le franchissement T2 (« Déplacer »).

L'heure estimée d'arrivée d'un véhicule à un arrêt est donné généralement par le SAE, tel est le cas dans cette étude. Néanmoins celui-ci peut être calculé en considérant la distance séparant les arrêts, la vitesse moyenne du véhicule et l'heure de départ de l'arrêt précédent. Cet horaire peut aussi être saisi par le régulateur au niveau du SARRT, ensuite transféré vers le SAE dans le cas où il a des informations plus précises sur l'état des véhicules.

<sup>16</sup> Le réseau de MontBéliard (France) gérée par la CTPM (Compagnie de Transport du pays de MontBéliard) à fait l'objet des études de [Saussol, 98] [Soulhi, 00] et [Laichour, 02]

*Agent STATION*

Relatif à tout type d'arrêt (simple, régulation, terminus, correspondance). Il connaît sa position dans le réseau en tant que représentant d'un arrêt de régulation.

Les agents STATION prennent en charge l'enregistrement des paramètres liés aux passages des véhicules aux arrêts, afin de répondre aux requêtes des agents SUPERVISEUR. Ces derniers ont besoin de connaître les positions des véhicules dans le réseau et des informations concernant ces véhicules. Ces agents ne possèdent pas d'acointances, ils répondent seulement aux requêtes faites par les agents SUPERVISEUR.

De même que pour les agents VEHICULE, ces agents représentent la composante statique du réseau. Ces agents associés à chaque arrêt, possèdent une base de connaissances relatives à :

- la référence de l'arrêt (nom de la station ou numéro), de la ligne (nom de la ligne ou numéro),
- la nature de l'arrêt (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 STATION ont pour rôle de :

- assurer le respect du TM,
- détecter les écarts entre les horaires théoriques de passage et les horaires réels de passage,
- créer un agent SUPERVISEUR pour gérer la perturbation,
- signaler les perturbations éventuelles aux arrêts suivants,
- communiquer avec les autres agents STATION et VEHICULE pour s'informer des horaires de passages,
- enregistrement des horaires des passages des véhicules et les informations concernant ces véhicules (nombre de passagers à bord, etc.),
- mise à jour des informations concernant les passages du véhicule,
- traitement des requêtes des agents SUPERVISEUR.

Les actions que peuvent accomplir ces agents sont par conséquent :

- Surveiller : correspondant à l'attente d'un message du véhicule qui est en route annonçant son arrivée.
- Estimer Retard : pour détecter les perturbations
- Créer l'agent SUPERVISEUR : lorsqu'une perturbation est détectée
- Mettre à jour les connaissances : de même que pour l'agent VEHICULE

En réalité, les agents STATION surveillent les passages des véhicules afin de détecter les éventuels écarts entre les horaires réels et ceux des passages théoriques.

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

- l'heure théorique d'arrivée  $ta_{ij}^l$  théorique,
- l'heure réel  $ta_{ij}^l$  réel.

La figure (A.5) représente le comportement d'un agent STATION. Avant l'arrivée du véhicule, le calcul du retard est réalisé à travers le franchissement « Tester\_Retard ». En fait, ce calcul se base sur

l'échange des informations entre les agents STATION et les agents VEHICULE. De ce fait, les agents STATION déclenchent une alarme pour les perturbations quand le seuil toléré est atteint.

En ce qui concerne l'agent SUPERVISEUR qui est créé à chaque détection d'une perturbation, nous sommes confrontés à deux situations :

- Créer agent SUPERVISEUR : dans le cas où aucun agent SUPERVISEUR 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 courant ou réel.

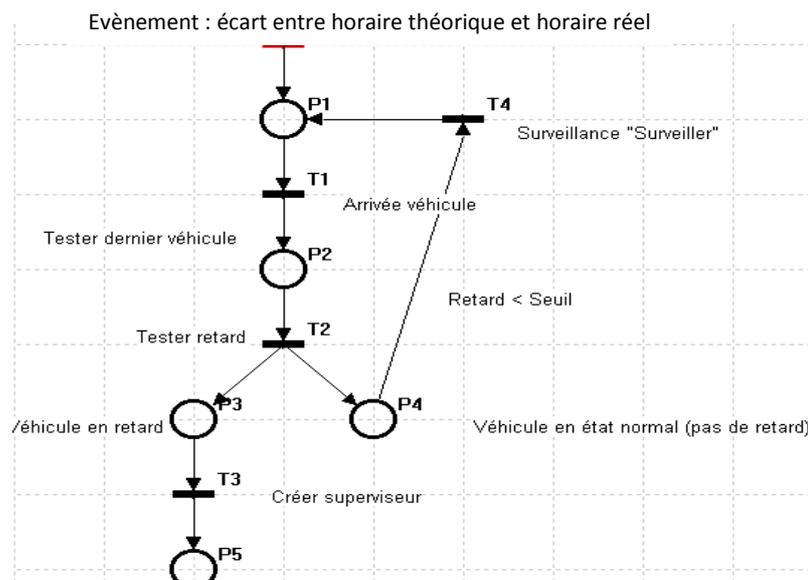


Figure A.5 : Comportement des agents STATION

### Agent SUPERVISEUR

Il a la mission d'interface entre le régulateur et SARRT. Il présente au régulateur les résultats de la régulation et transmet les demandes aux agents concernés.

L'agent SUPERVISEUR présente au régulateur les actions de régulation à activer. Par contre, le régulateur peut établir des requêtes de simulations (Saisi par anticipation des perturbations via l'interface dédiée aux appels conducteurs) pour prédire l'état du réseau après avoir effectué quelques modifications au niveau du tableau de marche (prises d'autres actions, par exemple : décaler quelques départs, suppression d'un départ,...) ou imaginer des défaillances éventuelles, etc., figure (A.6).



Figure A.6 : La communication entre SARRT et le régulateur par le biais de l'agent SUPERVISEUR

L'agent SUPERVISEUR transmet les requêtes du régulateur aux agents DIAGNOSTIC, CONSTRUCT et RBCC. Ces derniers transmettent à l'agent SUPERVISEUR les décisions de régulation pertinentes à prendre en considération, figure (A.7).

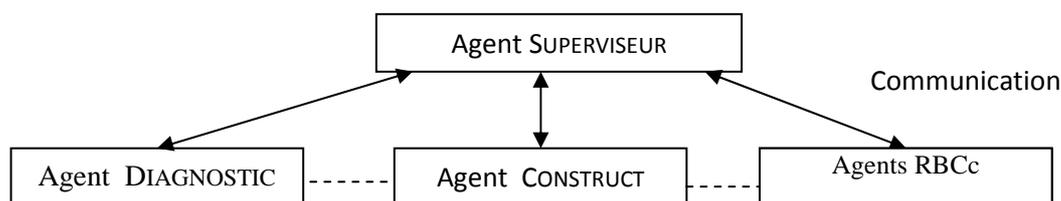


Figure A.7 : La communication entre un agent SUPERVISEUR et les agents DIAGNOSTIC, CONSTRUCT et RBCC

Les agents SUPERVISEUR sont créés dès l'apparition d'une perturbation. Ils sont responsables de la gestion des incidents. Un agent SUPERVISEUR doit contrôler toutes les tâches liées à la régulation comme 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 actions de régulation ordonnées par le régulateur. L'agent SUPERVISEUR crée et coopère avec :

- un ou des agents DIAGNOSTIC pour l'identification du contexte et le diagnostic de la perturbation,
- un agent CONSTRUCT pour la régulation avec une approche classique ou une approche à base d'un moteur d'inférence cellulaire.
- un agent RBCC pour la régulation avec une approche à base de cas (indexation cellulaire), et l'exploitation de l'action spécifique « changement d'itinéraire ».

La base de connaissances des agents SUPERVISEUR, subissant une mise à jour fréquente, concerne les informations sur la nature de la perturbation traitée et sa cause à savoir :

- la référence de l'arrêt où la perturbation a été détectée et l'horaire de détection,
- le véhicule perturbé,
- les critères d'évaluation des perturbations et des actions de régulation,
- les agents DIAGNOSTIC associés
- les décisions validées par le régulateur, etc.

Le rôle d'un agent SUPERVISEUR est résumé via les actions qu'il peut réaliser

- Créer DIAGNOSTIC : pour le diagnostic de l'incident,
- Attendre diagnostic : de la part de DIAGNOSTIC,
- Evaluer diagnostic : en comparant les valeurs des informations contexte proposées selon l'état perturbé ou théorique. L'agent peut alors, suivant l'importance de la perturbation, choisir ou non de créer via l'agent DIAGNOSTIC, un agent de régulation approprié CONSTRUCT ou RAPC.
- Attendre solution régulation : à fournir par DIAGNOSTIC 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.

- Appliquer et suivre régulation : la solution validée doit être appliquée et suivie via la mise à jour imposée par DIAGNOSTIC sur les agents STATION et VEHICULE concernés.

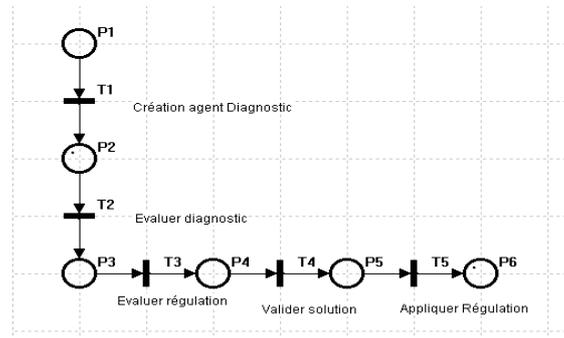


Figure A.8 : Comportement de l'agent SUPERVISEUR

Les agents SUPERVISEUR fournissent à tout instant au régulateur une ou plusieurs solutions et cela quel que soit le mode de régulation adopté.

#### Agent DIAGNOSTIC

Cet agent joue un rôle très important dans le diagnostic des perturbations. Les accointances d'un agent DIAGNOSTIC sont d'autres agents DIAGNOSTIC, l'agent SUPERVISEUR et l'ensemble des agents VEHICULE et STATION qui se trouvent à l'intérieur de la fenêtre temporelle de l'agent DIAGNOSTIC concerné. La communication d'un agent DIAGNOSTIC s'effectue avec un groupe d'agents DIAGNOSTIC concernés par les décisions déterminées au niveau du nœud qu'il représente, figure (A.9).

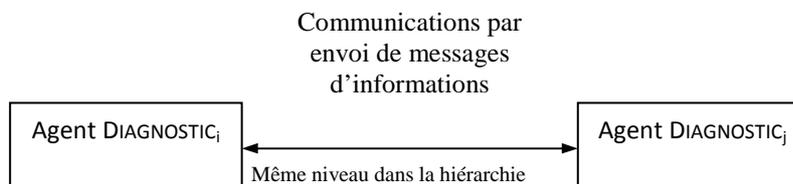


Figure A.9 : La communication entre des agents CORRESPONDANCE

Un agent DIAGNOSTIC est créé par un agent SUPERVISEUR. Il est responsable de la société d'agents, VEHICULE et STATION, correspondant à une zone de perturbation présentée dans la figure (A.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. Les connaissances d'un agent DIAGNOSTIC sont par conséquent liées à :

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

Les actions que réalisent les agents DIAGNOSTIC sont :

- Rechercher Zone : la recherche de la zone concernée par la perturbation selon une stratégie définie pour construire l'horizon de régulation

- Rechercher TM : collecte des TM pour les véhicules aux arrêts de la zone.
- Simuler TM : collecte des informations nécessaires à l'aide des agents VEHICULE et STATION pour estimer les horaires de passage dans l'état perturbé du réseau (sans régulation), formant les TM perturbés, TMP. Les TMP tiennent compte alors des éventuels retards ou avances des véhicules.
- Contrôler régulation : vérifie le bon déroulement des éventuelles correspondances. Si une ou plusieurs correspondances sont impliquées, il faut reconstruire la société d'agents formée par DIAGNOSTIC afin de tenir compte des autres lignes du réseau concernées.
- Diagnostiquer perturbation : évaluation de l'importance de la perturbation en fonction des critères de régulation correspondants.
- Créer CONSTRUCT: pour la construction de solutions en manuel ou bien la génération de solutions plus avancées (actions combinées) via un système à base de connaissances (ensemble de règles).
- Créer RAPC : pour une génération de solution à base de cas préalablement enregistrés.
- Proposer résultats : envoi des différentes informations collectées à l'agent SUPERVISEUR.

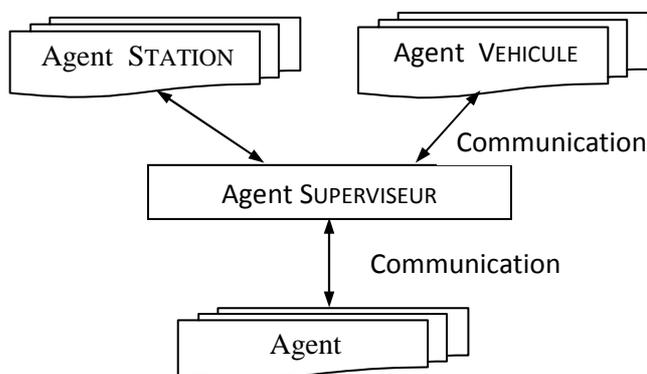


Figure A.10 : La communication entre un agent SUPERVISEUR et les agents STATION et VEHICULE via l'agent DIAGNOSTIC

Le comportement des agents DIAGNOSTIC est représenté figure (A.11) comme suit :

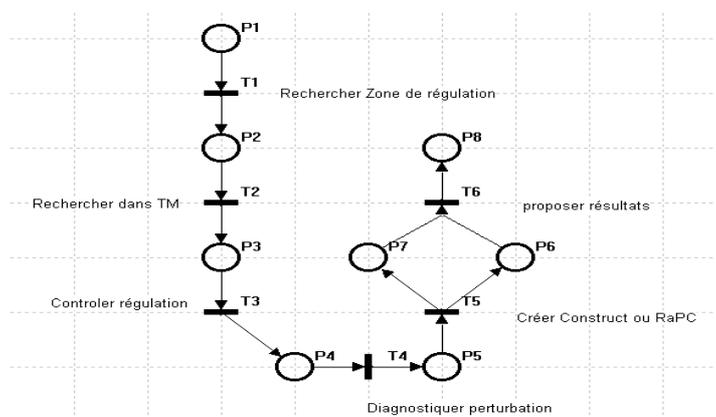


Figure A.11 : Comportement d'un agent DIAGNOSTIC

Comme décrit dans la majorité des algorithmes proposés, il est nécessaire de prendre en considération les agents VEHICULE correspondant au véhicule perturbé, au véhicule précédent et au véhicule suivant. Ainsi, donc l'espace de régulation est composé de ces trois véhicules au minimum et des arrêts qu'ils desservent.

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, les arrêts en attente du véhicule suivant et les arrêts en attente du véhicule précédent.

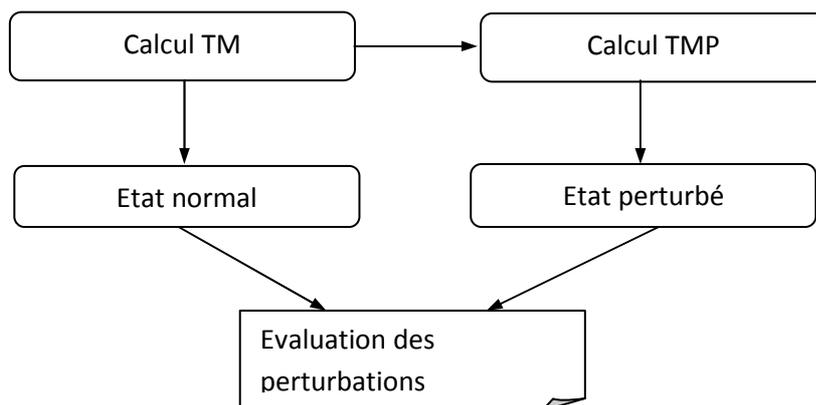
**Remarque :**

En cas de correspondance, l'agent DIAGNOSTIC doit réunir les agents VEHICULE et STATION 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.

La phase de diagnostic est réalisée par les agents DIAGNOSTIC et comporte l'analyse de la perturbation en vue de l'évaluation de ses conséquences. Cette évaluation est fonction de cinq critères proposés dans le chapitre 6.

- régularité,
- ponctualité,
- correspondance,
- satisfaction passagers,
- coût commercial de la solution.

Pour ce faire, pour chaque critère, une comparaison est réalisée entre l'état perturbé du trafic du réseau (avant régulation) et son état normal (théorique), comme illustré par la figure (A.12).



*Figure A.12 : Evaluation des perturbations*

Cette comparaison entre les états du réseau permet aux agents DIAGNOSTIC de détecter les éventuelles correspondances qui risquent d'être ratées, ce qui les oblige à tenir compte des autres lignes concernées.

Si l'agent DIAGNOSTIC ne communique aucune proposition de régulation à l'agent SUPERVISEUR, ce dernier se trouve obligé de créer un agent CONSTRUCT ou RBCC pour chercher des solutions. L'agent

DIAGNOSTIC doit alors fournir les données nécessaires à CONSTRUCT ou RBCC et les informer des éventuels changements en cours de traitement par l'envoi de mise à jour.

#### Agent CONSTRUCT

L'agent CONSTRUCT est chargé de la résolution de la perturbation envoyée par l'agent DIAGNOSTIC. Il est créé par l'agent SUPERVISEUR sur proposition de l'agent DIAGNOSTIC dès que ce dernier le juge nécessaire. Pour générer des solutions, l'agent CONSTRUCT doit récupérer les données fournies par SUPERVISEUR et DIAGNOSTIC à propos des positions et horaires passage (TM 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 DIAGNOSTIC. Sa base de connaissance contient alors :

- la référence de la perturbation,
- les TM 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 CONSTRUCT utilise une approche de régulation classique basé sur des algorithmes de régulation [Bouamrane et al, 06] ainsi qu'un moteur d'inférence cellulaire [Amrani et al, 11].

En effet, compte tenu de l'évolution des perturbations et des états des entités de l'horizon de régulation, l'agent CONSTRUCT doit constamment être informé par l'agent DIAGNOSTIC des nouvelles arrivées de données ou des modifications éventuelles, figure (A.13). En fait, l'agent CONSTRUCT ne communique pas avec les agents STATION et VEHICULE.

Les actions associées à l'agent CONSTRUCT sont :

- attendre données DIAGNOSTIC: l'agent ne peut pas procéder à la régulation tant qu'il ne dispose pas des différentes données décrivant l'horizon considéré,
- construire solution : prendre en charge les différents choix d'action de régulation (de base ou combinées) du régulateur.
- Lancer Moteur d'inférence cellulaire : dans le cas de perturbations familières, l'agent CONSTRUCT peut déclencher un moteur d'inférence cellulaire sur demande du régulateur (mode de régulation automatique).
- lancer algorithme de régulation : CONSTRUCT doit proposer les algorithmes de régulation propre à chaque action de régulation retenue par le régulateur ou bien proposé par le moteur d'inférence cellulaire.
- Mettre à jour : lors de la réception d'un message de mise à jour de DIAGNOSTIC, il faut altérer les informations pour adhérer au mieux au contexte de la perturbation.
- Annoncer résultats : CONSTRUCT doit fournir les résultats obtenus à SUPERVISEUR via l'agent DIAGNOSTIC.
-

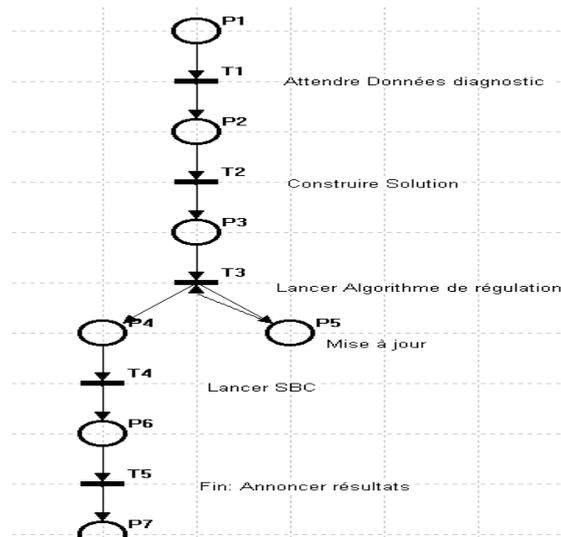


Figure A.13 : Comportement d'un agent CONSTRUCT

### Agent RBCC

La coopération entre des approches Agent et des approches à base de cas, pour la résolution des problèmes distribués, est rarement rencontrée dans la littérature. En effet, les seules applications des systèmes à base de cas (Exploitation du contexte) dans des systèmes multi-agents se traduisent par les travaux de Laurent Pasquier [Pasquier, 02] pour la régulation d'une ligne de métro.

L'agent RBCC est généralement le premier agent sollicité par l'agent DIAGNOSTIC car il permet de proposer dans le cas où elle existe une solution immédiate au cas de la perturbation en cours, figure (A.14). L'agent RBCC exploite les données des agents VEHICULE et STATION pour permettre à l'agent SUPERVISEUR de mettre à jour le TM avec les données de la solution proposée en fonction des nouvelles informations contexte.

Sa base de connaissance est identique à celle de l'agent CONSTRUCT.

L'agent RBCC utilise une approche de régulation basée sur la recherche de cas de perturbations similaires à la perturbation en cours, et exploite une indexation cellulaire permettant un gain de temps dans la recherche des solutions (Chapitre 5). Ensuite, il propose la solution trouvée s'il y a lieu.

Les actions associées à l'agent RBCC sont :

- attendre données DIAGNOSTIC: l'agent ne peut pas procéder à la régulation tant qu'il ne dispose pas des différentes données décrivant l'horizon considéré,
- Rechercher perturbation similaire : parcourir la base de cas sur le principe d'une indexation cellulaire afin de retrouver une perturbation similaire et proposer la solution qui a été retenue précédemment au régulateur.
- Annoncer résultats : L'agent RBCC doit fournir les résultats obtenus à SUPERVISEUR via l'agent DIAGNOSTIC correspondant.

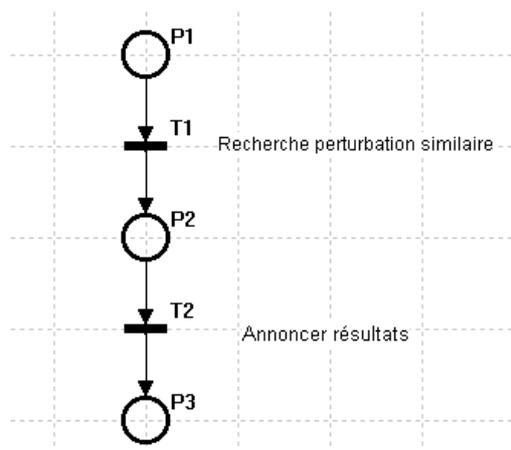


Figure A.14 : Comportement d'un agent RBCC.

### A.3.3 Comportement global du SARRT

Le fonctionnement global du SMA proposé est décrit comme suit : les agents VEHICULE et STATION transmettent les informations sur les passages de véhicules aux agents SUPERVISEUR (agents qui sont toujours en veille, existent toujours). Les agents SUPERVISEUR et DIAGNOSTIC demandent des informations aux agents VEHICULE et STATION et fournissent les décisions prises à l'agent VEHICULE qui exécute la décision (agents qui ne sont créés qu'en cas de perturbation au même titre que les agents CONSTRUCT et RBCC).

Les actions de régulation fournies font partie de la liste proposée au chapitre 1 (exemple d'une simple action : injecter un véhicule ou une action combinée : Direct en ligne).

L'agent DIAGNOSTIC créé par l'agent SUPERVISEUR à le choix entre la création de deux agents, soit, il créera un agent CONSTRUCT, soit un agent RBCC selon la stratégie de régulation développée par le régulateur.

Enfin, d'une manière générale les opérations du SARRT sont les suivantes :

- Création SUPERVISEUR pour l'analyse des informations contexte des perturbations envoyées par les agents STATION.
- création DIAGNOSTIC: pour le diagnostic et le choix du mode de régulation.
- création CONSTRUCT: pour la régulation des situations non familières
- création RBCC : pour les situations disposant d'un cas de solution préalablement enregistré dans la base de cas
- 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.

#### **A.4 Conclusion**

Dans cette annexe, les caractéristiques et la conception des agents et des systèmes multi-agents dans le but de cerner leurs applications dans le domaine du transport multimodal et particulièrement le transport bimodal ont été décrits. Les diverses applications abordant le problème de la régulation se sont intéressées particulièrement aux correspondances ou uniquement aux réseaux Bus. Le choix d'une architecture multi-agents est dû principalement aux caractères ouverts et distribués d'un réseau de transport urbain.

Par conséquent, un système d'aide à la régulation SARRT intégrant la globalité du processus décisionnel du régulateur a été conçu. Ceci s'est traduit par une décomposition modulaire en six agents, intégrés dans une organisation statique et dynamique afin de résoudre les perturbations qui risquent d'apparaître sur le réseau. L'architecture du système multi-agent proposé en décrivant les comportements de chaque type d'agents à l'aide du formalisme réseau de Petri a été détaillée.

Le système d'aide à la régulation proposé est flexible du fait qu'il s'accommode au mode de régulation choisi par le régulateur. Il possède de grandes capacités de communications entre ces différents agents et les différentes méthodes de résolution (algorithmes de régulation, système à base connaissances, raisonnement à base de cas).

Néanmoins, un système d'aide à la régulation reste un système d'aide et le rôle du régulateur dans cette étude est primordial. En effet, les solutions trouvées par le SARRT ne peuvent être appliquées sans la validation du régulateur (phase 5 du processus décisionnel). Une solution validée est une solution qui peut enrichir la base de cas du module RBC. Cet apprentissage ne peut se faire qu'avec l'aide des agents RBCC.

## ***Formalisation algorithmique des actions de régulation (bus) et représentation des variables***

Pour l'ensemble des algorithmes exploités dans cette étude, le tableau (B.1) présente les données en entrée avec leur source d'origine.

| <b>Nom de la variable</b> | <b>Signification</b>                                                             | <b>Source</b>                   |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Période                   | période de la journée (creuse ou de pointe),                                     | SAR                             |
| Retard                    | retard estimé causé par la perturbation                                          | SAE                             |
| Fréquence                 | fréquence de la ligne ou intervalle séparant les deux véhicules $V_1$ et $V_2$ , | TM                              |
| LigneP                    | numéro ligne perturbée                                                           | SAE                             |
| HP                        | horaire perturbation                                                             | SAE                             |
| NumAP                     | numéro arrêt perturbation                                                        | TM                              |
| Capacité                  | capacité du véhicule, $i$ représente l'indice du véhicule                        | caractéristiques véhicule (SAR) |
| TempsB                    | temps de battement <sup>17</sup>                                                 | TM                              |
| Panne                     | le véhicule perturbé est en panne                                                | SAE.                            |

Tableau B.1 : Variables en entrées pour les algorithmes de régulation

### **Notations :**

- ChV1 : Charge véhicule  $V_1$ ,
- ChV2 : Charge véhicule  $V_2$ ,
- $V_1$  : Véhicule perturbé,
- $V_2$  : Véhicule suivant le véhicule perturbé,
- $V_0$  : Véhicule précédent le véhicule perturbé,
- T1 : Terminus de départ,
- T2 : Terminus d'arrivée,

Les données en sortie et les fonctions utilisées sont proposées au niveau de chaque algorithme sous forme de procédure.

<sup>17</sup> Le temps de battement est fixé pour chaque ligne, en moyenne il est égal à 10% de la durée totale du trajet.