



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed  
-----  
معهد الصيانة و الأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

**Département de Maintenance en Instrumentation**

## **MÉMOIRE**

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de **MASTER**

**Filière : Génie Industriel**

**Spécialité : Génie Industriel**

**Thème**

# **Modélisation du contrôle des feux de circulation à l'aide de réseaux de Petri**

Présenté et soutenu publiquement par :

Tairi Sana

et

Benabdellah Naima

Devant le jury composé de :

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Etablissement</b>	<b>Qualité</b>
Mr. Keddar Mohamed	MAA	IMSI-Univ d'Oran 2	Président
Mr. Benarbia Taha	MCB	IMSI-Univ d'Oran 2	Encadreur
Mr. Benfekir Abderrahim	MCB	IMSI-Univ d'Oran 2	Examinateur

Décembre 2020

# *Remerciements*

C'est un plaisir et un moment très agréable de rendre hommage et de former de Remerciements aux personnes qui d'une manière ou d'autre ont apporté leur soutien et contribué à finaliser ce travail.

- ✓ Avant tout, nous devons remercier dieu le tout puissant qui nous a donné la force pour mener à terme ce long et dur travail ;
- ✓ Nous tenons à remercier à notre encadreur **BENARBIA TAHA** pour ses efforts, ses conseils et son intérêt porté à ce travail.

Comme nous remercions également les membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.

Je n'oublie pas de remercier ma famille pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours m'encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.

# *Dédicaces*

*Je tiens c'est avec grande plaisir que je dédie ce travail :*

*A ma mère, pour son amour, ses encouragements et ses sacrifices*

*A mon père, pour son soutien, son affection et la confiance qu'il m'a accordé*

*A tous ceux qui m'aiment...*

*A toute personne qui occupe une place dans mon cœur*

Tairi Sana

# *Dédicaces*

*Je tiens c'est avec grande plaisir que je dédie ce travail :*

*A ma mère, pour son amour, ses encouragements et ses sacrifices*

*A mon père, pour son soutien, son affection et la confiance qu'il m'a accordé*

*A mes sœurs, pour le courage qu'elles m'ont donné*

*A tous ceux qui m'aiment...*

*A toute personne qui occupe une place dans mon cœur*

Benabdellah Naima

# RESUME

L'objectif principal de ce mémoire est de développer un modèle de contrôle des carrefours basé sur les réseaux de Petri stochastiques. Le comportement dynamique des feux de circulation contrôlant une intersection peut être considéré comme un système d'événements discrets pouvant être modélisé par les réseaux de Petri. Cette stratégie permet de gérer le temps de feu vert de façon autonome en fonction de la taille de la file d'attente pour chaque flux dans chaque voie de l'intersection.

**Mots clés :** Systèmes de transport intelligents, technologie de l'information et de communication, internet des objets, réseaux de Petri, modélisation, carrefour.

# ABSTRACT

The main objective of this thesis is to develop a control model for crossroads based on stochastic Petri Nets. The dynamic behavior of traffic lights controlling an intersection can be considered as a discrete event system that can be modeled by Petri Nets. This strategy allows for autonomous green light time management based on the queue size for each stream in each intersection lane.

**Key words:** Intelligent transportation systems, information and communication technology, Internet of Things, Petri Nets, modelling, crossroad.

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I .1 :</b>	Aspects de transport	10
<b>Figure I .2 :</b>	Intersection à quatre branches avec des voies différentes	11
<b>Figure I .3 :</b>	Zone fonctionnelle d'un carrefour simple de deux routes à sens unique	14
<b>Figure I .4</b>	Feux de circulation	15
<b>Figure I .5 :</b>	Plan d'un cycle composé de 4 phases	16
<b>Figure II .1 :</b>	Intersections et routes signalisées	34
<b>Figure III.1 :</b>	Schéma de signalisation	40
<b>Figure III.2 :</b>	Intersection à 2 voies avec 2 feux de circulation	41
<b>Figure III.3 :</b>	Exemple de phases dans une intersection donnée	42
<b>Figure III.4 :</b>	Graphe des marquages du RDP de notre modèle de carrefour	56
<b>Figure III.5</b>	Description d'un réseau de trois carrefours	58
<b>Figure III.6 :</b>	Modèle par RDP de trois carrefours	59

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau II.1 :</b>	Modèles de trafic microscopiques basés sur RDP	33
<b>Tableau II.2 :</b>	Modèles de trafic macroscopiques basés sur RDP	36
<b>Tableau III.1 :</b>	Tableau d'interprétation des places de carrefour étudié	44
<b>Tableau III.2 :</b>	Tableau d'interprétation des Transitions de carrefour étudié	44

## LISTE DES ABREVIATIONS

<b>STI</b>	Systèmes de Transport Intelligents
<b>TIC</b>	Technologie de l'Information et de la Communication
<b>IdO</b>	Internet des Objets
<b>V2X</b>	Vehicle-to-everything
<b>TRANSYT</b>	Traffic Network Study Tool
<b>SCOOT</b>	Split, Cycle and Offset Optimization Technique
<b>SCATS</b>	Sydney Co-ordinated Adaptive Traffic System
<b>OPAC</b>	Optimization Policies for Adaptive Control
<b>PRODYN</b>	Programmation Dynamique
<b>RDP</b>	Réseaux de Petri
<b>RDPT</b>	Réseaux de Petri Temporisé
<b>RDPC</b>	Réseaux de Petri Continue
<b>RDPCC</b>	Réseaux de Petri Continue à vitesse Constante
<b>RDPCV</b>	Réseaux de Petri Continue à vitesse Variable
<b>RDPH</b>	Réseaux de Petri Hybride
<b>RDPD</b>	Réseaux de Petri Déterministe
<b>RDPS</b>	Réseaux de Petri Stochastique
<b>RDPSG</b>	Réseaux de Petri Stochastique Généralisés
<b>RDPSD</b>	Réseaux de Petri Stochastique et Déterministe
<b>RDPSE</b>	Réseaux de Petri Stochastique Etendue
<b>RDPTD</b>	Réseaux de Petri Temporisé Déterministe
<b>RDPTS</b>	Réseaux de Petri Temporisé Stochastique
<b>SDH</b>	Système Dynamique Hybride

# TABLE DES MATIERE

<b>Remerciements</b>	
<b>Dédicaces</b>	
<b>Résumé</b>	
<b>Liste des figures</b>	
<b>Liste des tableaux</b>	
<b>Liste des abréviations</b>	
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 : SYSTEMES DE TRANSPORT INTELLIGENTS</b>	
<b>1.1 Introduction</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Systèmes de transport intelligents</b>	<b>3</b>
1.2.1 Introduction	3
1.2.2 Définition des systèmes de transport intelligents	4
1.2.3 Avantages et différents services des systèmes de transport intelligents	4
1.2.4 Applications des systèmes de transport intelligents	5
1.2.4.1 Applications de sécurité routière	5
1.2.4.2 Applications de l'efficacité du trafic	5
<b>1.3 Technologie de l'information et de communication (TIC)</b>	<b>6</b>
1.3.1 Définition	6
1.3.2 Technologie de l'information et de communication et les villes intelligentes	6
1.3.3 Innovations de technologie de l'information et de communication dans les systèmes de transport	7
1.3.4 Technologie de l'information et de communication et la congestion du trafic	7
<b>1.4 Internet des objets dans les transports</b>	<b>8</b>
1.4.1 Définition	8
1.4.2 Applications de l'internet des objets dans les systèmes de transport intelligents	9
<b>1.5 Gestion de trafic</b>	<b>10</b>
1.5.1 Les carrefours	10
1.5.1.1 Différents types de carrefour	11
1.5.1.2 Conception d'un carrefour	12

1.5.1.3 Caractéristiques du carrefour	13
1.5.2 Feux de circulation	14
1.5.2.1 Définition d'un flux, d'un cycle et d'une phase	15
1.5.2.2 Fonctionnement de la signalisation tricolore	16
1.5.2.3 Techniques de gestion des feux	17
<b>1.6 Conclusion</b>	<b>18</b>

## **CHAPITRE 2 : RESEAUX DE PETRI**

<b>2.1 Introduction</b>	<b>20</b>
<b>2.2 Réseaux de Petri</b>	<b>21</b>
2.2.1 Réseaux de Petri autonomes	21
2.2.2 Réseaux de Petri temporisés (RDPT)	23
2.2.3 Réseaux de Petri continus (RDPC)	24
2.2.4 Réseaux de Petri hybrides (RDPH)	24
2.2.5 Réseaux de Petri stochastiques (RDPS)	26
2.2.5.1 Réseaux de Petri stochastiques généralisés (RDPSG)	26
2.2.5.2 Réseaux de Petri stochastiques et déterministes (RDPSD)	26
2.2.5.3 Réseaux de Petri stochastiques étendus (RDPSE)	27
2.2.6 Réseaux de Petri colorés	27
<b>2.3 Propriétés sur les réseaux de Petri</b>	<b>27</b>
2.3.1 Franchissement d'une transition	27
2.3.2 Transition validée	28
2.3.3 Graphe des marquages accessibles	28
2.3.4 Arbre de couverture	28
2.3.5 Séquence de franchissement	28
2.3.6 Le blocage	28
2.3.7 La réversibilité	29
2.3.8 Réseaux de Petri borné	29
2.3.9 Réseaux de Petri sauf	29
2.3.10 La vivacité	29
2.3.11 Pseudo-vivacité	29
2.3.12 Quasi-vivacité	29
2.3.13 Dynamique d'exécution de réseaux de Petri	30

2.3.14 Etudes des propriétés des RDP par graphes des marquages accessibles	30
<b>2.4 Une revue sur les applications des réseaux de Petri dans la modélisation, l'analyse et le contrôle du trafic urbain</b>	<b>31</b>
2.4.1 Modélisation et simulation	32
2.4.1.1 Modèles microscopiques	32
2.4.1.2 Modèles macroscopiques	34
2.4.1.3 Modèles mésoscopiques	36
2.4.2 Analyse de performance, mise en œuvre, optimisation et contrôle intelligent des signaux de trafic	36
2.4.2.1 Analyse de performance	36
2.4.2.2 La mise en œuvre	37
2.4.2.3 Optimisation et contrôle intelligent	37
<b>2.5 Conclusion</b>	<b>37</b>

### **CHAPITRE 3 : MODELE A BASE DE RDP POUR LE CONTRÔLE DES CARREFOURS**

<b>3.1 Introduction</b>	<b>39</b>
<b>3.2 Contrôle des feux de circulation dans un réseau</b>	<b>40</b>
<b>3.3 Modèle de carrefour à l'aide de réseaux de Petri</b>	<b>41</b>
3.3.1 Description de carrefour étudié	41
3.3.2 Modèle de carrefour étudié à l'aide de réseaux de Petri	43
3.3.3 Codage matricielle	45
3.3.4 Graphe des marquages	56
<b>3.4 Réseaux des N carrefours</b>	<b>57</b>
<b>3.5 Conclusion</b>	<b>60</b>
<b>Conclusion générale</b>	<b>61</b>
<b>Bibliographies</b>	<b>62</b>

**INTRODUCTION**

**GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Depuis la fin de la Deuxième Guerre mondiale, les villes n'ont pas cessé de s'étendre. Afin d'absorber les flux de personnes et de marchandises, les voies de circulation se sont multipliées jusqu'à représenter, presque, la moitié de la superficie totale des zones urbaines. Cet accroissement du nombre de voies de circulation n'est cependant pas suffisant, ce qui implique l'apparition de phénomènes de congestion et de files d'attente, et dans le pire des cas, provoque des accidents. De manière générale, la congestion conduit à la dégradation de la qualité de service des infrastructures routières.

En ce qui concerne la gestion du trafic pour une utilisation optimale des infrastructures disponibles, de nombreuses stratégies de régulation des feux de signalisation ont été mises en place. L'approche traditionnelle dans la commande des feux utilise des plans de signalisation à période fixe pour lesquels les durées des feux sont prédéterminées.

La commande du trafic, présentant encore plusieurs difficultés du fait de la complexité du problème à traiter, reste à ce jour un problème d'actualité et de nombreux centres de recherche en ont fait leur priorité. Dans ce contexte, la commande intelligente du trafic peut constituer un moyen efficace pour éliminer ou du moins alléger les effets de la congestion et de la formation des files d'attente. La méthode classique adoptée, pour prévenir ces effets où les réduire dans les villes modernes, est basée sur l'élaboration d'une signalisation routière adaptée. Le droit de passage est attribué ainsi aux usagers par l'utilisation de feux de couleurs standard (rouge-orange/jaune-vert) qui peut permettre de résoudre les conflits entre les différents flux de circulation aux carrefours.

De manière schématique, un système de contrôle dynamique du trafic est un système qui dispose de capteurs lui fournissant des informations sur l'état du trafic et, notamment, le nombre de véhicules sur certaines rues ou intersections du réseau routier. Ces informations sont alors transmises à un calculateur qui a pour rôle de donner aux commandes les valeurs de paramètres minimisant une certaine fonction exprimant la congestion du réseau routier.

Dans ce mémoire, nous sommes intéressés à la modélisation et développement d'un modèle de carrefour à l'aide de réseaux de Petri stochastique en vue de résoudre les problèmes liés à la congestion et améliorons le trafic routier.

Dans ce sens, nous utilisons les réseaux de Petri stochastiques, car ils constituent un support à la fois graphique et mathématique performant aussi bien pour l'analyse et l'évaluation analytique du système étudié. Les RDP sont largement utilisés pour la modélisation et l'analyse

des systèmes dynamiques de nature variées telles que les systèmes de production, les systèmes de télécommunications, les systèmes logistiques ou encore les réseaux informatiques. Leur grand intérêt a donné naissance à plusieurs variantes couvrant les systèmes continus, les systèmes discrets et les systèmes hybrides. La pertinence du choix des réseaux de Petri comme un outil de modélisation et d'étude des systèmes de transport a été déjà montrée au travers de quelques applications sur la régulation des feux de trafic.

Ce mémoire s'organise autour de trois chapitres dont les principaux objectifs sont décrits dans les paragraphes suivants :

- **Chapitre I** : après cette introduction générale dont l'objectif était de donner un aperçu rapide sur notre travail, le premier chapitre de ce mémoire sera naturellement dédié à l'étude des systèmes de transport intelligents et comment va changer le mode de transport et améliorer la circulation dans les villes notamment l'influence de la technologie de l'information et de la communication et aussi l'internet des objets sur la gestion des feux de trafic.
- **Chapitre II** : dans le deuxième chapitre, nous présentons les réseaux de Petri et la diversité de leurs extensions, et aussi nous nous intéressons aux Réseaux de Petri comme outil de modélisation et d'analyse de performance qui intègre aussi bien, le niveau de modélisation macroscopique que celui microscopique.
- **Chapitre III** : cette partie du mémoire sera consacrée à la modélisation d'un carrefour à base d'une classe particulière de réseaux de Petri temporisé déterministe et stochastique.

Nous terminons ce travail par une conclusion générale, en résumant notre contribution et en proposant les perspectives de nos travaux.

# **CHAPITRE 1**

## **SYSTEMES DE TRANSPORT INTELLIGENTS**

## 1.1 INTRODUCTION

Ce chapitre décrit les concepts de base des STI ainsi que ses applications et services et comment va changer le mode de transport et améliorer la circulation dans les grandes villes notamment l'influence de l'internet des objets et la technologie de l'information et de la communication sur la gestion du trafic.

## 1.2 SYSTEMES DE TRANSPORT INTELLIGENTS

### 1.2.1 INTRODUCTION

Le terme STI englobe toutes les applications qui utilisent les technologies de l'information et de la communication (TIC) dans le domaine des transports afin d'obtenir des avantages économiques, sociaux et énergétiques. Les STI sont souvent appliquées à tout ou partie des moyens de transport et prennent en considération tous les agents concernés : véhicule, infrastructure et utilisateur (conducteur ou passager).

La fonction la plus importante de la STI est d'améliorer la performance des systèmes de transport, en aidant également, d'une part, la gestion de l'infrastructure par le biais de ses systèmes opérationnels et décisionnels et, d'autre part, utilisateurs, pour réaliser la satisfaction globale avec le transport.

Pour cette raison, les STI contiennent des systèmes qui recueillent des informations sur l'état du scénario, des systèmes qui traitent et intègrent les informations et, enfin, des systèmes qui fournissent des résultats aux utilisateurs finaux. Pendant cette période, les informations recueillies en temps réel par STI sont souvent utilisées pour déterminer l'état du réseau de communication, pour planifier une visite, pour gérer dynamiquement le trafic dans une certaine zone, signaler les données d'un opérateur logistique au client ou signaler les événements de trafic dans les systèmes d'informations géographiques. Bref, toutes les parties prenantes ont accès à plus d'informations et d'outils pour les aider à le traiter afin de réaliser une exploitation plus coordonnée et intelligente d'un système de transport, que ce soit routier, ferroviaire, maritime ou aérien.

### **1.2.2 DEFINITION DES SYSTEMES DE TRANSPORT INTELLIGENTS**

Les STI peuvent être un ensemble de solutions prises en charge par le mélange de technologies informatiques et de télécommunications conçues et développées pour améliorer la gestion, la maintenance, la surveillance, le contrôle et la sécurité des transports. Dans le même temps, un système intelligent est souvent défini comme optimisant les processus ou les ressources pour obtenir un produit souhaité, fournissant ces informations en temps réel, pour son suivi, évaluation et contrôle, et permettant des variations introduites au cours de leur gestion.

### **1.2.3 AVANTAGES ET DIFFERENTS SERVICES DES SYSTEMES DE TRANSPORT INTELLIGENTS**

Les STI apportent divers avantages résultant de l'amélioration de l'efficacité opérationnelle et de la fiabilité des services proposés, de l'amélioration de la production dans le cadre de la gestion des infrastructures de transport et de l'amélioration de la sécurité, la réduction de l'impact sur l'environnement et la diffusion des services de données fournis aux utilisateurs mobiles.

Par conséquent, les STI comprennent différents outils et services résultant de l'application de concepts télématique dans le domaine des transports ; nous mentionnerons entre autres :

- Les systèmes automatisés de gestion du trafic
- Les services d'information sur les transports publics
- Les systèmes d'information des passagers
- Les systèmes de gestion de flotte et de site
- Gestion des urgences
- Les systèmes de paiement électronique
- Les systèmes de véhicules coopératifs

Comme on le voit souvent, les types d'applications et de services sont très variés, principalement parce que les STI évoluent constamment et que de plus en plus d'efforts et de ressources sont consacrés à leur élaboration et à leur mise en œuvre.

## **1.2.4 APPLICATIONS DES SYSTEMES DE TRANSPORT INTELLIGENTS**

Il y a des millions de véhicules autorisés sur les routes du monde et leur nombre augmente constamment. En conséquence, l'efficacité du trafic, la réduction de la congestion et la réduction des dommages liés aux accidents sont devenues un défi de taille dans les villes. Cette situation s'est progressivement améliorée au cours de la dernière décennie grâce à l'utilisation des STI et des technologies de l'information et de la communication. Dans les STI, les systèmes de véhicules peuvent communiquer avec d'autres véhicules au moyen de la technologie de communication véhicule à véhicule ou des technologies d'infrastructure. Il existe deux types principaux d'applications STI, en particulier la sécurité routière et l'efficacité de la circulation :

### **1.2.4.1 APPLICATIONS DE SECURITE ROUTIERE**

Visent à réduire le risque d'accidents de voiture et à minimiser les dommages résultant d'accidents inévitables. Ces applications imposent des exigences, exigeant un matériel fiable dédié ainsi que des communications fiables et opportunes. Ces applications comprennent la sensibilisation des coopératives, comme les applications de gestion des progrès, l'avertissement de départ de voie et la gestion de la vitesse, et les applications de détresse, par exemple la détection des dangers et les mauvaises conditions météorologiques.

### **1.2.4.2 APPLICATIONS DE L'EFICACITE DU TRAFIC**

Le principal objectif de l'application efficace du code de la route est d'améliorer la fluidité du trafic en réduisant le temps et la congestion routière. Des avantages économiques et environnementaux peuvent également être obtenus. Ces applications fournissent des informations sur le trafic à l'utilisateur, généralement diffusées par les infrastructures. Comme la gestion des véhicules transportant des marchandises dangereuses. Bien que ces demandes ne présentent pas les besoins de fiabilité et de délais stricts, leur qualité se dégrade gracieusement avec la montée des retards et donc la perte de paquets.

## **1.3 TECHNOLOGIE DE L'INFORMATION ET DE COMMUNICATION (TIC)**

### **1.3.1 DEFINITION**

Le terme Technologie de l'Information et de la Communication (TIC) est utilisé pour délimiter les diverses technologies de l'information et des télécommunications utilisées dans les transports depuis le milieu des années 1980. Ils comprennent une bonne gamme de technologies et de systèmes à divers stades de développement, des prototypes de recherche aux produits et applications disponibles sur le marché.

Les TIC sont à l'origine d'un certain nombre des innovations les plus notables au sein de l'industrie automobile et de la société moderne. Au cours des 20 dernières années, les communications mobiles ont transformé nos vies en permettant l'échange de données, partout et en tout temps.

### **1.3.2 TECHNOLOGIE DE L'INFORMATION ET DE COMMUNICATION ET LES VILLES INTELLIGENTS**

Parmi ses définitions existantes, une ville intelligente est souvent définie comme un environnement intelligent qui intègre les technologies de l'information et de la communication et crée des systèmes interactifs.

Ces systèmes apportent la communication au monde physique pour résoudre les problèmes des individus dans leurs conglomérats urbains et assurer une meilleure gestion des ressources publiques et de l'espace. De nos jours, une ville intelligente, plus généralement appelée espace intelligent, est liée à un environnement physique dans lequel les technologies de la communication et de l'information, également en tant que systèmes de capteurs, sont imperceptibles car ils pénètrent de manière transparente les objets physiques et donc l'environnement dans lequel les gens vivent, voyagent et travaillent. Une ville intelligente, comme toutes les autres villes, a besoin d'une attention particulière à une variété de questions de mobilité et de gestion, comme la circulation, la surveillance, les catastrophes naturelles et la durabilité. Pour soutenir de telles solutions, de nombreuses données urbaines doivent être collectées et diffusées par le biais d'une infrastructure de communication, qui nécessite des types de communication sans fil intégrés, hétérogènes et intelligents.

### **1.3.3 INNOVATIONS DE TECHNOLOGIE DE L'INFORMATION ET DE COMMUNICATION DANS LES SYSTEMES DE TRANSPORT**

Les innovations en matière de TIC au sein du système de transport sont souvent classées en fonction du rôle des connaissances concernées. On peut distinguer entre :

- a. Un Information à l'appui des choix des automobilistes et des passagers, par exemple ; information sur les embouteillages à venir, conseils de routage d'un système de navigation ou heure importante d'arriver des trains.
- b. Information pour réduire les options ou limiter le comportement des conducteurs, par exemple ; éviter des parties de réseaux ou limiter la vitesse de conduite.
- c. Information qui alerte les conducteurs ou les passagers sans contrainte de comportement, par exemple ; divers modes d'aide avancée au conducteur, comme les systèmes d'évitement des collisions et de maintien de la voie.
- d. Information qui sert à exiger sur les décisions des conducteurs, en tout ou en partie, comme dans la liaison électronique des voitures et dans l'adaptation intelligente de la vitesse.

### **1.3.4 TECHNOLOGIE DE L'INFORMATION ET DE COMMUNICATION ET LA CONGESTION DU TRAFIC**

La congestion peut être fonction des interactions entre les véhicules grâce aux relations de débit lorsque les volumes approchent de la capacité. Ce ne sont pas seulement les véhicules qui ralentissent, ou les véhicules qui circulent à grande vitesse, qui causent de la congestion, bien que ceux-ci contribuent à la question. La clé pour réduire la congestion est de contrôler la densité, mais cela est souvent presque aussi facile parce qu'il sonne. En plus, des observations équivalentes pourraient être faites en ce qui concerne les navires qui arrivent dans un port ou les avions qui atterrissent dans un aéroport. Il faut réglementer l'espacement (la densité) de ceux-ci au cours d'un sens géographique ou temporel.

Certaines technologies qui diminuent la quantité et la densité susmentionnées contribueront également à réduire la congestion. Notre préoccupation est pour d'autres types de TIC qui réduiront la quantité de congestion qui se produit : Surveillance vidéo et réponse, Signature informationnelle (messages variables), systèmes d'information avancés du voyageur, contrôle adaptatif, adaptation intelligente de la vitesse, Zonage et voies sans congestion, et communications à courte portée réservées.

## 1.4 INTERNET DES OBJETS DANS LES TRANSPORTS

### 1.4.1 DEFINITION

L'Internet des objets (IdO) a le potentiel de remanier l'industrie du transport en modifiant profondément la façon dont les données sont recueillies, connectées avec les utilisateurs et les processus automatiques.

L'IdO est que la mise en réseau d'objets physiques qui, grâce à l'utilisation de capteurs embarqués, actionneurs, et d'autres dispositifs, peuvent recueillir et transmettre des informations sur l'activité du réseau en temps réel.

Les données collectées sur ces équipements peuvent ensuite être analysées par les agences de transports pour :

- Améliorer l'expérience des passagers grâce à un transport plus fiable, un meilleur service à la clientèle, une meilleure communication et des informations plus précises.
- Accroître la sécurité en comprenant mieux le fonctionnement du système de transport grâce à des capteurs de données qui détectent toutes les anomalies de la vitesse des trains, de la température de la chaussée, de l'état des pièces d'aéronef ou du nombre de wagons qui attendent à une intersection.
- Réduire la consommation d'énergie et les embouteillages, grâce à l'utilisation de données en temps réel, afin de permettre aux opérateurs d'adapter plus facilement leurs ressources à la demande, grâce à l'agilité de réagir rapidement à l'évolution rapide des schémas de trafic, ou de faire face à l'impact du trafic sur la consommation de carburant, l'environnement et la compétitivité économique régionale.
- Améliorer les performances opérationnelles en surveillant de manière proactive les infrastructures critiques et en créant des processus plus efficaces pour réduire les coûts d'exploitation et améliorer la capacité du système.

## 1.4.2 APPLICATIONS DE L'INTERNET DES OBJETS DANS LES SYSTEMES DE TRANSPORT INTELLIGENTS

Le développement des transports est l'un des facteurs qui indiquent le bien-être des nations. Une surveillance de l'état des routes et une application d'alerte sont un certain nombre des applications les plus importantes de l'IdO. La méthode nécessite l'identification de l'utilisateur et sa trajectoire souhaitée dans son application sur son téléphone intelligent.

Le transport intelligent est confronté à trois conceptions principales, il s'agit de l'analyse du transport, le contrôle des véhicules connectés. L'analyse des transports représente l'analyse de la prévision de la demande et de la détection des anomalies. Le routage des véhicules et le contrôle de la vitesse, en plus de la gestion du trafic, sont tous des moyens de contrôle des transports dont ils ont besoin, étroitement liés au véhicule connecté (via la communication V2X qui est le passage d'informations d'un véhicule à une entité pouvant affecter le véhicule), et régis globalement par la technologie multidiffusion, comme le montre la figure ci-dessous (**Figure I .1**).

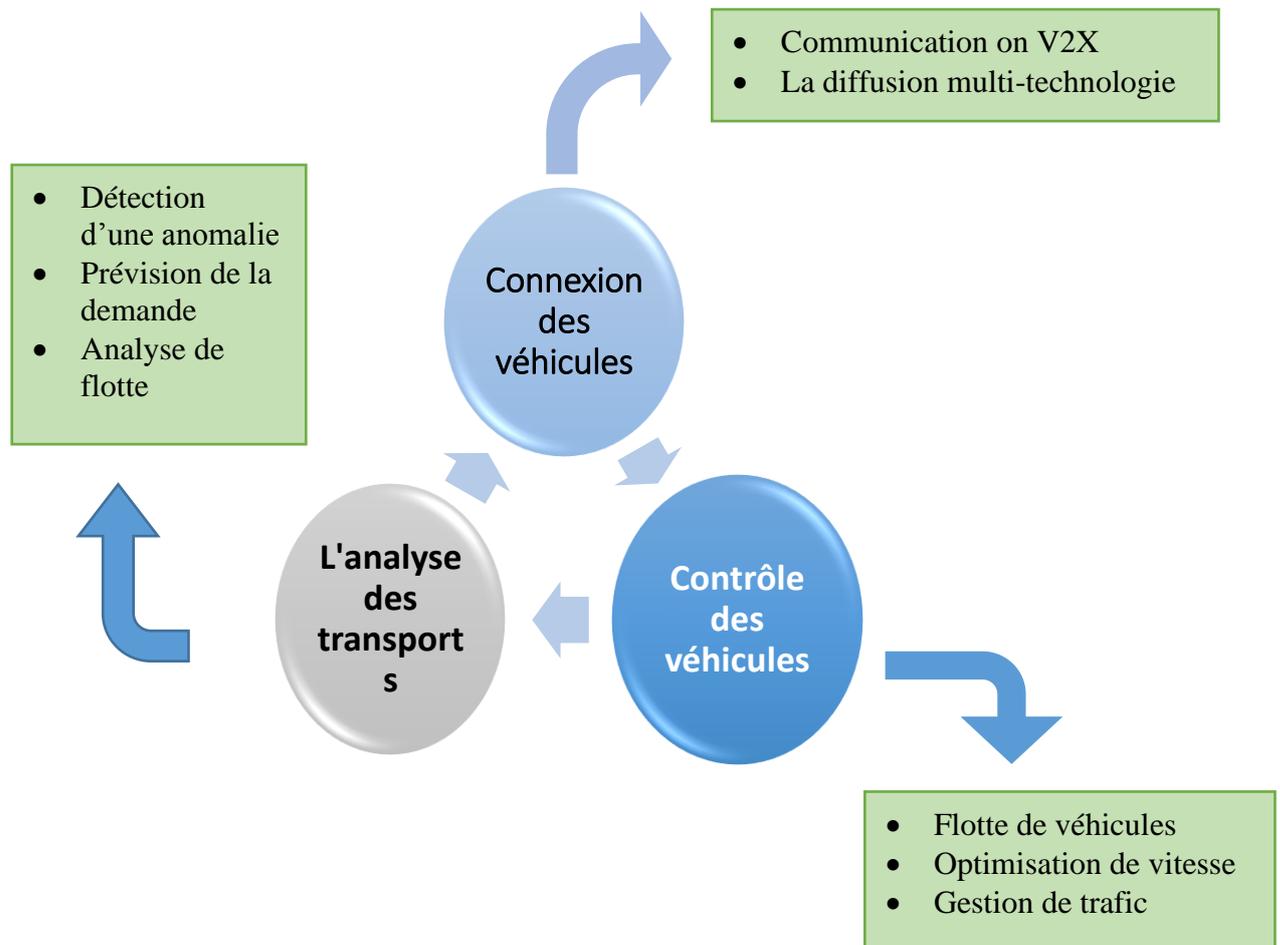


Figure I .1 : Aspects de transport

## 1.5 GESTION DE TRAFIC

### 1.5.1 LES CARREFOURS

Un carrefour se trouve à l'intersection de plusieurs rues, déterminant des couloirs d'entrée et de sortie. Un couloir est caractérisé par sa largeur et le nombre de ses voies ; un certain nombre de ces voies (voies spéciales) pourraient également souffrir d'un débit spécifique. Les courants du véhicule sont soit des courants directs, soit des courants de tourne à gauche, ou des courants de tourne à droite, (**Figure I .2**).

La mise en place d'un système de signalisation routière à un carrefour fait une séparation dans le temps de l'admission de divers flux de véhicules.



**Figure I .2 :** Intersection à quatre branches avec des voies différentes

Divers types de carrefours sont souvent conçus et, pour des raisons de simplicité, sont souvent réduits à un carrefour, soit en décomposant les personnes qui sont complexes en plusieurs carrefours uniques, en ajoutant des sections factices pour les intersections de moins de quatre branches. Les carrefours sont souvent classés en deux catégories : carrefours isolés et carrefours coordonnés entre eux, constituant un réseau urbain.

### 1.5.1.1 DIFFERENTS TYPES DE CARREFOUR

On distingue plusieurs types de carrefour :

➤ **Carrefour en T :**

Il s'agit d'un carrefour à trois branches dont l'une de ces branches est à peu près dans le prolongement d'une autre branche et dont la troisième coupe, ce prolongement sous un angle compris entre 75 et 105°.

➤ **Carrefour en Y :**

Il s'agit d'un carrefour à trois branches dont l'une de ces branches est dans le prolongement d'une autre et dont la troisième branche coupe, ce prolongement sous un angle inférieur à 75° ou supérieur à 105°.

➤ **Carrefour en croix simple :**

Il s'agit d'un carrefour à quatre branches dont deux branches sont à peu près dans le prolongement des deux autres branches et pour lequel l'angle de ces prolongements est de  $75^\circ$  ou davantage tout en restant inférieur à  $105^\circ$ .

➤ **Carrefour en X :**

Il s'agit d'un carrefour à quatre branches dont deux branches sont à peu près dans le prolongement des deux autres, et pour lesquelles l'angle d'intersection de ces deux prolongements est inférieur à  $75^\circ$  ou supérieur à  $105^\circ$ .

➤ **Carrefour à branches multiples :**

Un carrefour à branches multiples est un carrefour à cinq branches ou plus.

En se basant sur la représentation de l'automate hybride pour établir un modèle adéquat de la circulation, on peut décrire les phénomènes d'attente au niveau des carrefours à feux.

➤ **Carrefour giratoire :**

Un carrefour giratoire est un carrefour à trois branches ou plus dans lequel les courants convergent puis divergent sur une chaussée à sens unique entourant un îlot central ; la circulation sur cette chaussée se fait dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (dans les pays où on roule à gauche, la circulation s'effectue dans le sens des aiguilles d'une montre).

### 1.5.1.2 CONCEPTION D'UN CARREFOUR

La conception d'un carrefour en milieu urbain exige de recueillir un nombre important de données du fait de la complexité du système. Les problématiques aux échelles du quartier, du réseau de voirie, du nœud de communication se superposent et conditionnent fortement les dysfonctionnements au niveau du carrefour.

Il existe différents domaines d'investigation pour la conception d'un carrefour.

Le premier est relatif à la vie locale ; ce domaine concerne le fonctionnement urbain (organisation du réseau de voirie et structure urbaine) et le fonctionnement des usagers (piétons, deux-roues, transports en commun, voitures et poids lourds).

Le second, relatif à l'approche fonctionnelle, s'intéresse au trafic et son déplacement, aux nuisances générées par la circulation automobile (bruit, pollution) et à la sécurité.

Le dernier est relatif à l'approche spatiale qui rassemble le site et son espace (morphologie et densité).

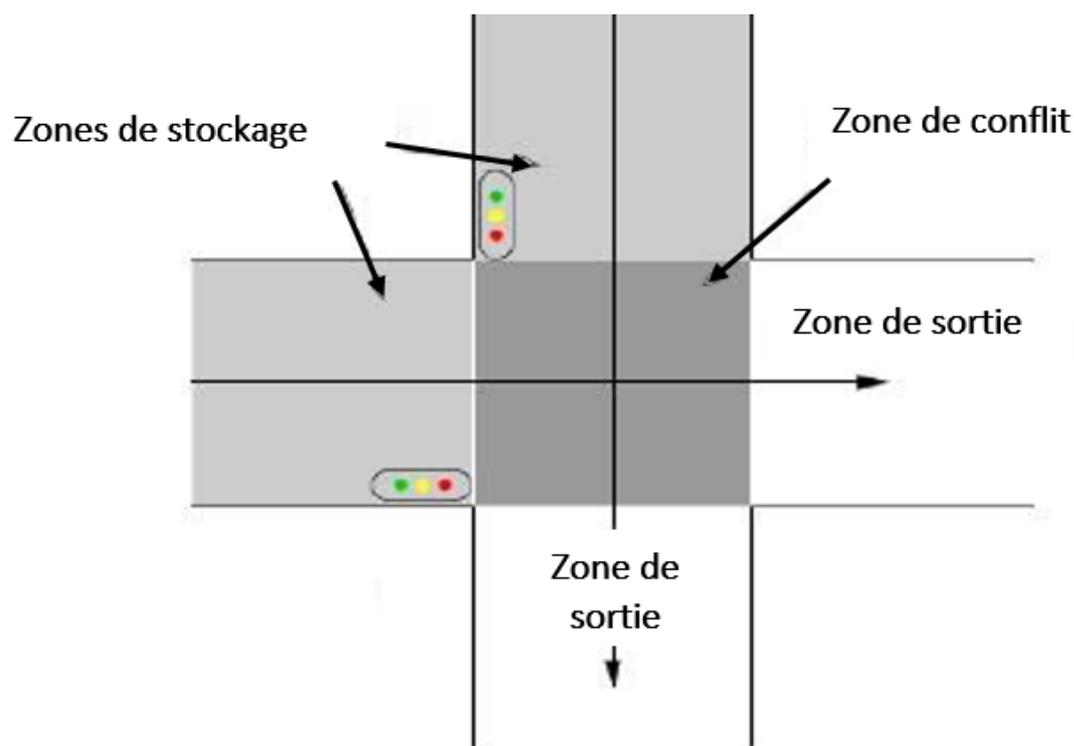
Le choix et le niveau d'investigation de ces données ne peuvent pas être prédéfinis. L'analyse des approches et les enjeux du carrefour permettent de sélectionner et de doser les différentes recherches d'informations.

### 1.5.1.3 CARACTERISTIQUES DU CARREFOUR

Les carrefours sont les lieux de croisement d'au moins deux routes où un flux de véhicules venant d'une même origine se divise en deux ou plusieurs flux vers plusieurs destinations suivant des coefficients appelés taux des mouvements tournants. Un tel croisement peut revêtir de nombreuses formes. Une route est caractérisée par sa longueur et son nombre de voies ainsi que le sens de la circulation et la vitesse maximale autorisée sur les voies.

Dans chaque intersection, nous pouvons identifier trois zones fonctionnelles (**Figure I . 3**) :

- Une zone de stockage, placée : en amont de la zone de conflit, constitue l'entrée empruntée par les véhicules ;
- Une zone de conflit, relative à l'espace de croisement des routes ; i.e. la ressource critique partagée par tous les véhicules qui traversent l'intersection ;
- Une zone de sortie, placée en aval de la zone de conflit, permet le soulagement de cette zone.



**Figure I . 3 :** Zone fonctionnelle d'un carrefour simple de deux routes à sens unique

### 1.5.2 FEUX DE CIRCULATION

Dans les systèmes de gestion du trafic, le système le plus connu, le plus utilisé et le plus efficace dans le monde est le système des feux de signalisation car il évite tout malentendu entre les différents conducteurs au moment du passage.

Un feu de circulation routière est un dispositif permettant la régulation du trafic routier entre les usagers de la route, les véhicules et les piétons.

Généralement, un feu tricolore est composé d'un système électronique commandé. Il est composé de trois couleurs principales. La couleur rouge indique l'obligation d'arrêt aux véhicules. La couleur orange qui ne dure que quelques secondes signale le passage du rouge au vert. La couleur verte indique aux véhicules qu'ils ont la priorité exclusive pour passer. Ces couleurs ont été choisies parce qu'elles ont l'avantage d'être très distinctes.

L'intérêt des feux de circulation dans les zones urbaines est bien établi. Premièrement, ils sont utilisés pour la sécurité des utilisateurs, aux intersections où la charge est assez grande pour être considérée comme dangereuse. Sans ces systèmes, si

plusieurs grands flux de véhicules se croisent à une intersection, le comportement individualiste des usagers rendrait les passages à niveau dangereux et augmenterait le temps perdu.

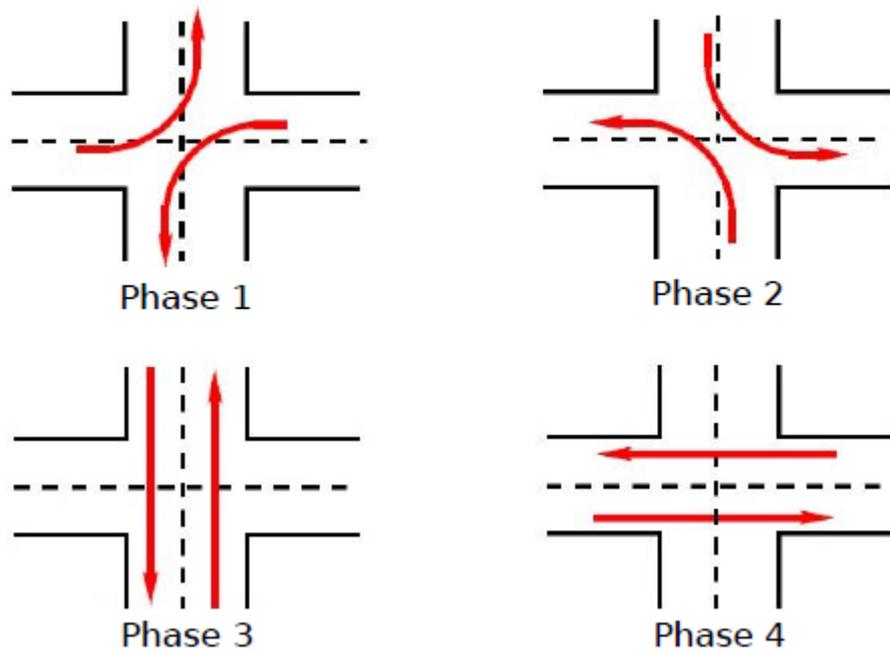


**Figure I . 4 :** Feux de circulation

#### 1.5.2.1 DEFINITION D'UN FLUX, D'UN CYCLE ET D'UNE PHASE

A une intersection, un flux de véhicules est l'ensemble des véhicules entrant par une voie donnée et ressortant par une autre. Le trafic dans une intersection est constitué d'un ensemble de flux de véhicules, chacun provenant d'une source. Deux flux sont cohérents s'ils peuvent évacuer l'intersection simultanément. Une intersection gérée par des feux de signalisation est composée de plusieurs feux tricolores, implantés sur les différentes voies entrantes dans l'intersection.

Une phase d'un feu est une période durant laquelle un ou plusieurs flux cohérents sont admis dans le carrefour. Le cycle d'un feu représente la durée qui sépare deux phases identiques de l'intersection. Il est défini par une séquence de phases. La (**Figure I . 5**) présente un cycle de feux composé de quatre phases.



**Figure I.5** : Plan d'un cycle composé de 4 phases

Ainsi, la durée d'un cycle d'un feu sera d'autant plus élevée que le nombre de phases sera grand. Le « temps de relâchement » est le temps perdu intervenant entre deux phases successives. On l'appelle aussi le rouge intégral. Ce rouge est la durée nécessaire pour que tous les véhicules qui sont dans le carrefour puissent évacuer la zone de conflit avant l'admission d'une autre phase. On remarque donc que l'augmentation de la durée du cycle permet d'augmenter la capacité du carrefour, ceci est lié à la minimisation de la part du temps de dégagement. Néanmoins, une durée d'évacuation trop grande favorise l'apparition de blocages au niveau des carrefours suivants.

### 1.5.2.2 FONCTIONNEMENT DE LA SIGNALISATION TRICOLOR

Le caractère conventionnel de la signalisation lumineuse concerne les couleurs à utiliser mais également leur ordre de succession d'apparition. En effet, l'allumage des feux est séquentiel, c'est-à-dire astreint à une procédure ordonnée, en l'occurrence la séquence vert-jaune-rouge.

Un vocabulaire technique commun, désignant le fonctionnement de la signalisation tricolore, est également utilisé par l'ensemble de la communauté des ingénieurs concernés par le domaine :

- **L'état des feux** : le signal lumineux commandant le passage libre (feu vert), toléré (feu orange) ou interdit (feu rouge) du trafic des véhicules ;
- **Une phase** : la durée pendant laquelle un feu passe par les trois états, c'est-à-dire effectue une séquence de signal lumineux ;
- **Un cycle** : la période pendant laquelle l'ensemble des feux effectuent leur phase permettant successivement l'admission de tous les courants de véhicules dans ce carrefour ;
- **Un plan de feux** : la durée et l'ordre de déroulement de l'allumage des trois états, pendant un cycle, de l'ensemble des groupes de feux ; un même carrefour peut suivre alternativement plusieurs plans de feux.

### 1.5.2.3 TECHNIQUES DE GESTION DES FEUX

On classe les techniques de gestion des feux en deux catégories principales :

- **Gestion en "temps fixe"** : elle consiste à calculer les réglages à partir de données recueillies avant installation, toute mise à jour devant s'effectuer par intervention humaine. Le système le plus célèbre avec plan de feux fixe est **TRANSYT** « *Traffic Network Study Tool* » [Robertson 1969]. TRANSYT évalue le réglage des feux en temps fixe d'un réseau urbain et fournit un plan de feux optimal (répartition optimale des durées de vert et décalages optimums).
- **Gestion en "temps réel"** : elle exige de disposer en permanence d'une mesure de l'état de circulation, à partir de laquelle un algorithme calcule automatiquement les réglages appliqués immédiatement. Un système de gestion des feux sera, en théorie, d'autant plus performant qu'il sera à même de s'auto-adapter à l'évolution du trafic, c'est-à-dire plus proche du temps réel. Les simulateurs les plus utilisés dans ce type de régulation sont : **SCOOT** (Split, Cycle and Offset Optimisation Technique ou technique d'optimisation des durées de vert, du cycle et des décalages) utilise un plan de feux déformé en temps réel par de petites altérations apportées à la durée du cycle, à la répartition des temps de vert sur chaque carrefour, et aux décalages entre les carrefours, **SCATS** (Sydney Co-ordinated Adaptive Traffic System) est composée d'un ordinateur central, connecté en réseau à plusieurs mini-ordinateurs de zone, eux-mêmes connectés à de nombreux micro-ordinateurs, assurant le rôle de contrôleurs locaux, **PRODYN** Testé et réalisée à Toulouse, la méthode **PRODYN** « *Programmation Dynamique* », **OPAC** (Optimization Policies for Adaptive Control).

## 1.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre on a présenté une étude sur les systèmes de transport intelligents, sa définition, ses avantages, services et domaine d'application. Puis, on a parlé sur la technologie de l'information et de communication et l'internet des objets dans la révolution routière considérant que l'influence des technologies de l'information a largement contribué au développement des systèmes de transport intelligents. Enfin, on a parlé sur la gestion du trafic et les carrefours.

# Chapitre 2

## RESEAUX DE PETRI

## 2.1 INTRODUCTION

Les réseaux de Petri sont apparus le 1962 dans la thèse de doctorat de mathématicien allemand Carl Adam Petri qui a défini un outil mathématique et graphique permettant de modéliser et de vérifier le comportement dynamique des systèmes à événements discrets comme les systèmes manufacturiers, les systèmes de télécommunications, les réseaux de transport. Et ce qui nous intéresse beaucoup plus c'est les réseaux de Petri sur le transport. Le RDP est schématisé par des cercles qui sont les places contient des jetons ; relies entre eux par des arcs orientés et des transitions. Pour réaliser un réseau de Petri il suffit de transformer un cahier de charger en un modèle RDP. Ces réseaux présentent des caractéristiques intéressantes telles que la modélisation et la visualisation de comportement parallèle.

Les modèles de réseaux de Petri intégrant la dimension de temps permettent de traiter les problèmes liés à l'analyse et l'évaluation des performances au travers des méthodes analytiques.

## 2.2 REAUX DE PETRI

Les réseaux De Petri (RDP) apparaissent dans un nombre important d'applications tels que : les systèmes de télécommunications, les réseaux de transports, les systèmes automatisés de production, . . . , etc.

Grâce à leurs caractéristiques graphiques et mathématiques, ils ont un rôle prépondérant dans l'étude formelle des systèmes à événements discrets (parallèles ou concurrents).

En outre, la diversité de leurs extensions l'en fait un outil polyvalent avec lequel des systèmes complexes peuvent être modélisés. C'est pour tenter de modéliser des comportements plus complexes que différentes extensions du modèle RDP autonome (ordinaire) ont été proposées : RDP temporisé, RDP continu, RDP stochastiques, RDP hybrides, RDP lots, RDP colorés, . . . Etc.

### 2.2.1 RESEAUX DE PETRI AUTONOMES

La structure d'un RDP autonome est composée de cinq objets :

- **Les places** correspondent à des sites, notées graphiquement par des cercles ;
- **Le marquage d'une place** représentant l'état d'un nœud est un nombre entier (non négatif et indivisible) de jetons (marques) pouvant simuler les activités dynamiques
- **Les transitions** correspondent aux événements, notées graphiquement par des barres ou des rectangles ;
- **Les arcs** notés par des flèches relient les places aux transitions et vice-versa ;
- **La fonction de transition** fournit à chaque transition (événement) les conditions qui doivent être remplies pour chacun des nœuds afin que cet événement soit possible. Elle indique aussi l'effet de chaque transition sur l'état des nœuds ;

Un RDP peut être également vu comme un graphe biparti constitué d'un ensemble de sommets composé par des places et des transitions.

Formellement, un RDP autonome est un quintuple  $RDP = (P, T, Pré, Post, M_0)$

- $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  est un ensemble fini de  $n$  places.
- $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$  est un ensemble fini de  $m$  transitions.
- $Pré : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  est la fonction de pré-incidence telle que  $Pré(P_i, T_j)$  est le poids de l'arc dirigé de  $P_i$  vers  $T_j$ .

- $Post : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  est la fonction de post-incidence telle que  $Post(P_i, T_j)$  est le poids de l'arc dirigé de  $T_j$  vers  $P_i$ .
- $M_0$  : est le vecteur de marquage initial dans lequel chaque place du RDP peut contenir 0, 1, 2, . . . , k jetons

L'évolution d'un RDP, c'est-à-dire la transition entre deux marquages, suivant la règle suivante : le modèle peut effectuer la transition d'un marquage vers un marquage suivant lorsque toutes les conditions relatives à cette transition sont remplies. Dans un RDP autonome, le comportement peut évoluer lorsque toutes les places relatives à une transition contiendront un nombre suffisant de jetons. En d'autres termes, lorsque le nombre de jetons dans chaque place entrée d'une transition est supérieur ou égal à 1, dans ce cas, la transition est sensibilisée et sera franchissable. Lorsque la transition est franchie (ou tirée), son franchissement définit le marquage suivant du RDP. L'état du réseau est défini par le nombre de jetons dans chaque place qui est représenté par le vecteur de marquage

$M = [M(P_1), \dots, M(P_n)]^T$  où  $M(P_i)$  (noté aussi  $m_i$ ) désigne le nombre de jetons dans la place  $P_i$ .

Formellement, la dynamique d'un RDP autonome est définie par l'équation fondamentale suivante :

$$M(K + 1) = M(K) + W\bar{S} \quad (1)$$

Où :

**W** : est la matrice d'incidence (de dimension  $m \times n$  éléments) définie par :

$$W = [w_{ij}] \quad (2)$$

Les éléments de **W** sont donnés par :

$$w_{ij} = Post(P_i, T_j) - Pré(P_i, T_j) \quad (3)$$

$S_k = [s_1, \dots, s_n]^T$  désigne le vecteur caractéristique (de dimension  $n \times 1$ ) de la séquence de franchissement  $S_k$  réalisable à partir du marquage initial  $M(k+1)$ . Toutes les composantes de  $S_k$  sont nulles sauf celles qui correspondent aux transitions franchies dans la séquence  $S_k$ . La valeur de chaque composant  $j$  du vecteur  $S_k$  indique le nombre de franchissements de la transition  $T_j$  dans la séquence de franchissement  $S_k$ . Lorsqu'une place  $P_i$  du RDP possède au moins deux transitions de sortie ( $N \geq 2$ ), un conflit structurel apparaît. Ce conflit devient effectif lorsque le nombre de jetons ( $m_i$ ) de cette place est inférieur à la somme des poids des arcs reliant cette place aux transitions de sortie.

$$0 < m_i < \sum_{j=1}^N \text{Pré}(P_i, T_j) \quad (4)$$

La résolution de tel problème s'effectue par l'entremise des règles de priorité sur les transitions de sortie de  $P_i$ . Nous en verrons l'une des méthodes de résolution dans la section suivante.

### 2.2.2 RESEAUX DE PETRI TEMPORISES (RDPT)

Dans un RDP Temporisé (RDPT), une temporisation est associée à chaque transition et représente un retard de tir de la transition, dans ce cas nous parlons de RDP T-Temporisé. Dans la deuxième classe de RDPT, nous associons des temporisations avec des places. Cette classe s'appelle RDP P-Temporisé.

Nous nous concentrons sur l'utilisation de RDP T-Temporisé avec deux types de transition : les transitions immédiates sans retard de tir et les transitions déterministes avec retard de tir non nul.

Un RDP Temporisé (RDPT) est donné comme suit :

RDPT = (P; T; Pré; Post; H;  $M_0$ ), où :

- $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$  est un ensemble fini de  $m$  places.
- $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$  est un ensemble fini de  $n$  transitions.
- $\text{Pré} : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  est la fonction d'entrée qui définit les arcs dirigés des places vers les transitions.  $\mathbb{N}$  est l'ensemble des entiers relatifs.

- $Post : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  est la fonction de sortie qui définit les arcs dirigés des transitions vers les places.
- $H \subseteq T \times P$  un ensemble d'arcs d'inhibiteur de  $P$  à  $T$
- $M_0$  : est le vecteur de marquage initial

### 2.2.3 RESEAUX DE PETRI CONTINUS (RDPC)

Dans le but d'éviter l'explosion combinatoire du nombre d'états accessible, les RDP continus ont été introduire par [David, R. & Alla, H., 1987] comme une limite des RDP discrets. Il est obtenu à partir de RDP discrets en fluidifiant les marques. Une place d'un RDP continu est dite place continue ou C-place. Son marquage est un nombre réel positif ou nul. De même, une transition dans un RDP continu est dite transition continue, ou C-transition, elle est validée si toutes ses places d'entrée sont marquées. A l'inverse des RDP discrets où le franchissement d'une transition est un événement instantané, une C-transition est franchie continument dans le temps. Cette extension du RDP permet d'élargir le cadre des RDP aux systèmes qui ne sont pas modélisables par des RDP ordinaires (tels que l'écoulement d'un fluide dans un réservoir, la production des produits par lot, ...etc). Contrairement aux RDP ordinaires ou temporisés, le nombre de marques dans les RDP continus est un réel positif ; Le franchissement s'effectue comme un flot continu en introduisant la notion de vitesse traduite par le nombre de marques franchies pendant une unité de temps. Le franchissement d'une transition dans les RDP continus suit dans le cas général la loi régissant la dynamique du système étudié. Dans ce cadre, plusieurs extensions des RDP continus ont été proposées : le RDP continu à Vitesses Variables (RDPCV), le RDP continu à vitesse constante (RDPCC), le RDP continu Asymptotique, le RDP continu à Vitesses Fonction du Temps.

### 2.2.4 RESEAUX DE PETRI HYBRIDES (RDPH)

Les réseaux de Petri hybrides contenant des nœuds discrets (des D-places et des D-transitions) et des nœuds continus (des C-places et des C-transitions) permettent de représenter au sein d'un même formalisme ce couplage entre un fonctionnement continu et un fonctionnement logique (représentation graphique unifiée des variables continues et des variables discrètes). Dans les RDP hybrides, la représentation des

systèmes à comportements hétérogènes, appelés systèmes dynamiques hybrides, est décrite par deux parties différentes :

- Une partie continue dont le comportement est décrit par un RDP continu ;
- Une partie discrète modélisée par un RDP temporisé (à temporisation déterministe ou stochastique) ;

Un RDP hybride (RDPH) est une extension des RDP qui conjugue deux variantes de RDP. Formellement, un RDPH est défini comme suit :

### DEFINITION

Un RDP hybride est une structure  $RDPH = (P, T, h, \Delta, \Sigma, Pré, Post, FS, I, M_0)$

- $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  est un ensemble de  $n$  places ;  
 $P = P^C \cup P^D$  avec :  $P^C$  est l'ensemble fini des places continues (C-place), and  $P^D$  est l'ensemble fini de places discrètes ;
- $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$  est un ensemble de  $m$  transitions ;  
 $T = T^C \cup T^D$  avec  $T^C$  est l'ensemble fini de transitions continues (ou C-transition)  
 $T^D$  est l'ensemble fini de transitions discrètes (ou D-transition) ;
- $h : P \cup T \rightarrow \{C, D\}$  est une fonction hybride indique si chaque noeud discret ou continu ;
- $\Delta$  est un ensemble fini d'événements ;
- $\Sigma : T^D \rightarrow \Delta$  est une fonction qui associe à chaque transition discrète un événement de  $\Delta$  ;
- $Pré : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  et  $Post : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  désignent respectivement les applications d'incidence avant et arrière ; ces applications doivent satisfaire la condition suivante  
 $\forall (P, T) \in P^C \times T^D, Pré(P, T) = Post(P, T)$
- $FS : T^C \rightarrow \mathbb{R}^+$  est une application qui associe à chaque transition continue sa vitesse maximale de franchissement ;
- $I : T^D \rightarrow \mathbb{R}^+ \times (\mathbb{R}^+ \cup \{\infty\})$  est une application qui associe à chaque D-transition la durée de sa temporisation ;
- $M_0$  : est le marquage initial, les D-places contiennent un marquage entier positif et les C-places contiennent un marquage réel positif ;

La condition sur les applications d'incidence avant et arrière est repérée sur le RDP par des boucles reliant les D-Places aux C-transitions, elle signifie qu'une marque discrète ne peut pas être fluidifiée par une transition continue. Le modèle RDP hybride ainsi

défini permet donc la modélisation des conditions logiques influant sur le comportement du système, mais il permet aussi la modélisation de transformation de marques continues en marques discrètes et vice-versa (par exemple : formation et éclatement de lots...etc).

### **2.2.5 RESEAUX DE PETRI STOCHASTIQUES (RDPS)**

Les RDP stochastiques ont été introduits par Florin dès 1978 pour répondre à certains problèmes d'évaluation liés à la sûreté de fonctionnement de systèmes informatiques. Ces problèmes faisant intervenir des phénomènes aléatoires, les transitions du réseau de Petri ont comporté des temps de franchissement aléatoires, distribués par une loi exponentielle. Cette distribution exponentielle permet d'exploiter les propriétés mathématiques d'un processus de Markov. Bien entendu, ce concept a largement été développé dès le début des années 80 pour répondre aux exigences de la modélisation de plus en plus complexes.

Les caractéristiques des différentes classes de réseaux de Petri stochastiques se situent essentiellement dans la nature des transitions utilisées. Initialement un RDP stochastique a toutes ses transitions temporisées avec un temps aléatoire qui est distribué avec une loi exponentielle, mais nous retrouvons d'autres types de transition.

#### **2.2.5.1 RESEAUX DE PETRI GENERALISES (RDPSG)**

Le réseau se compose de transitions avec une temporisation nulle dites transitions immédiates et de transitions avec une temporisation aléatoire distribuée exponentiellement dites transitions stochastiques. Le processus stochastique sous-jacent au graphe des marquages est un processus de Markov à temps continu.

#### **2.2.5.2 RESEAUX DE PETRI STOCHASTIQUES ET DETERMINISTES (RDPSD)**

Cette classe est une extension des RDP stochastiques généralisés. Le réseau contient des transitions immédiates, des transitions à temporisations déterministes et des transitions à temporisations stochastiques distribuées suivant des lois exponentielles.

### 2.2.5.3 RESEAUX DE PETRI STOCHASTIQUES ETENDUS (RDPSE)

Le réseau se compose uniquement de transitions temporisées aléatoires. Le temps est distribué avec une loi quelconque. Le processus stochastique sous-jacent au graphe des marquages est avec quelques restrictions un processus semi-markovien. Si les conditions ne sont pas remplies, le RDP stochastique étendu est résolu par des simulations à événements discrets.

### 2.2.6 RESEAUX DE PETRI COLORES

Les RDP colorés sont des RDP dans lesquels les jetons portent des couleurs. Une couleur est une information attachée à un jeton. Cette information permet de distinguer des jetons entre eux et peut être du type quelconque. Malgré leur forte utilisation, les réseaux colorés n'apportent pas de puissance de description supplémentaire par rapport aux RDP classiques, ils permettent juste une condensation de l'information. A tout RDP coloré marqué correspond un RDP qui lui est isomorphe.

Des extensions du type stochastique sont développées par de nombreux auteurs : les RDP Stochastiques Colorés et les RDP stochastiques généralisés colorés. Ce type de réseau de Petri est exploité essentiellement comme un outil de simulation.

## 2.3 PROPRIETES SUR LES RESEAUX DE PETRI

### 2.3.1 FRANCHISSEMENT D'UNE TRANSITION

Une transition est franchissable si toutes les places d'entrée de cette transition contiennent un nombre de marques supérieur ou égal au poids de l'arc qui relie la place d'entrée à la transition du franchissement, il déroule :

- La suppression de chaque place d'entrée d'un nombre de marques égal au poids de l'arc de la place d'entrée.
- L'ajout a chaque place de sortie d'une transition d'un nombre de marques égal au poids de l'arc qui relie la transition à la place de sortie.

### 2.3.2 TRANSITION VALIDÉE

Une transition est validée quand elle remplit les conditions de franchissement.

### 2.3.3 GRAPHE DES MARQUAGES ACCÉSSIBLES

Le graphe des marquages est composé de nœuds qui correspondent au marquage accessible et d'arcs correspondant au franchissement de transition faisant passer d'un marquage à l'autre.

### 2.3.4 ARBRE DE COUVERTURE

Quand on réalise le graphe des marquages et le cas où on ne peut pas s'arrêter c'est-à-dire le nombre des marquages accessibles est infini, on construit un arbre de couverture qui possède un nombre fini de nœuds donc on détruit le graphe de couverture. On remplace le nombre le plus grand qui peut être atteint par le nombre des jetons dans l'arbre de couverture.

Pour réaliser cet arbre de couverture on suit un algorithme comme suit :

Le premier pas c'est à partir de marquage initial  $M_0$  on cherche tous les transitions validées successeur correspondant. Si un de ces marquages est inférieur à  $M_0$ , on met  $W$  pour chacune des composantes supérieures à la composante supérieure à la composante correspondante de  $M_0$ .

Deuxième pas c'est pour chaque nouveau marquage  $M_i$  de l'arborescence.

On fait soit 1 ou 2 :

1. S'il existe sur le chemin de  $M_0$  à  $M_i$  un marquage  $M_j = M_i$ , alors  $M_i$  n'a pas de successeur.
2. S'il n'existe pas de marquage  $M_j = M_i$  sur le chemin de  $M_0$  à  $M_i$ , alors on prolonge l'arborescence en ajoutant tous les successeurs de  $M_i$ .

### 2.3.5 SÉQUENCE DE FRANCHISSEMENT

Le déplacement de transition vers autre conduit à une séquence de franchissement à partir de marquage initial  $M_0$ .

### 2.3.6 LE BLOCAGE

Un blocage est un marquage tel qu'aucune transition n'est validée.

Un RDP est dit sans blocage pour un marquage initial  $M_0$  si aucun marquage accessible n'est un blocage.

### 2.3.7 LA REVERSIBILITE

Quelques soit l'étape éteint par le système, on peut toujours revenir à l'étape initial.

### 2.3.8 RESEAUX DE PETRI BORNE

Une place  $P_i$  est dit bornée pour un marquage initial  $M_0$  s'il existe un entier naturel  $K$ , telle que pour tout marquage accessible c'est à partir de  $M_0$  le nombre de marques dans  $P_i \leq K$ .

Donc un RDP est borné pour tout marquage initial  $M_0$  si toutes les places sont bornées.

Le contraire c'est le cas non borné.

### 2.3.9 RESEAUX DE PETRI SAUF

Un RDP est dit pour un marquage initial  $M_0$  si pour tout marquage accessible, chaque place contient au plus une marque.

### 2.3.10 LA VIVACITE

Une transition est vivante pour un marquage initial  $M_0$  si pour tout marquage accessible  $M_i$  appartient à  $M_0$  il existe une séquence de franchissement qui contient cette transition, à partir de  $M_i$ .

### 2.3.11 PSEAUDO - VIVACITE

Un RDP est dit pseudo-vivant si pour tout marquage initial  $M_0$ , il existe toujours une séquence de franchissement qui contient cette transition.

### 2.3.12 QUASI - VIVACITE

Une transition est dite quasi vivante pour tout marquage initial  $M_0$  si elle peut être franchie au moins une fois.

Un RDP est quasi-vivant si toutes ces transitions sont quasi-vivantes.

### 2.3.13 DYNAMIQUE D'EXECUTION DE RESEAUX DE PETRI

Lorsqu'on exécute un RDP on prend une transition qui est franchissable.

On enlève un jeton de toutes les places d'entrées et on ajoute aussi un jeton à chaque place de sortie de cette transition.

L'exécution d'un RDP n'est pas toujours déterministe parce qu'on peut trouver plusieurs possibilités d'évolution à un instant donné.

Un cas particulier de réseau de Petri qui est un automate fini quand on a une transition qui a une entrée et une sortie.

### 2.3.14 ETUDE DES PROPRIETES DES RDP PAR GRAPHES DES MARQUAGES ACCESSIBLES

À partir d'un graphe des marquages accessibles on peut vérifier les propriétés de réseau de Petri, telles que :

- Un réseau de Petri est 1- borné si et seulement si leurs places contiennent au plus un jeton.
- Si on a au moins une place qui contient la valeur de  $W$  automatiquement ce réseau de Petri est non borné.
- Si on a un sommet sans successeur dans le graphe des marquages donc ce réseau de Petri est bloqué.
- Un réseau de Petri marqué n'admet pas un blocage si et seulement si chaque place de son graphe des marquages accessibles est l'origine d'au moins un arc.
- Si on a dans un réseau marqué une composante fortement connexe du graphe qui n'a pas d'arc sortant contient au moins un arc marqué par au moins une transition donc ce réseau est pseudo-vivante.
- Si on a dans un réseau marqué une composante fortement connexe du graphe qui n'a pas d'arc sortant contient au moins un arc marqué par chaque transition donc ce réseau de Petri est borné.

## 2.4 UNE REVUE SUR LES APPLICATIONS DES RESEAUX DE PETRI DANS LA MODELISATION, L'ANALYSE ET LE CONTROLE DU TRAFIC URBAIN

La circulation et le transport urbains jouent un rôle important dans la civilisation humaine, où ils ont un impact direct sur les aspects sociaux, économiques et environnementaux de la race humaine. Divers modes de transport sont apparus, et le développement rapide des infrastructures de transport a permis d'interconnecter les grandes villes. Cependant, l'augmentation rapide du nombre de véhicules et la demande croissante dans tous les types de modes de transport ont entraîné une congestion de la circulation. Divers travaux ont été menés sur les systèmes de circulation urbaine, tels que la modélisation et la simulation, la gestion de la congestion et le contrôle intelligent de la circulation, dans le but d'améliorer la conception et la planification, ou de réglementer la congestion, et d'optimiser les performances du système.

La modélisation et la simulation du trafic visent à étudier le système de trafic trop compliqué pour être abordé avec des méthodes numériques et analytiques. Les paramètres estimés à partir de ces outils de simulation fournissent des scénarios actuels et futurs qui aident les planificateurs de la circulation à planifier et à concevoir les travaux. Certains outils fonctionnent sur la base d'un ensemble de règles (modèle microscopique) qui décrit le comportement des véhicules dans le réseau, tandis que d'autres sont basés sur des modèles mathématiques. D'autre part, la gestion de la congestion et les approches intelligentes de contrôle de la circulation visent à optimiser les performances des systèmes de circulation urbaine. Ces indices de rendement comprennent le temps total consacré par tous les véhicules du réseau, les files d'attente et les retards totaux aux intersections. En fait, les modèles de circulation qui peuvent décrire et prévoir avec précision les états de la circulation sont le « moteur » des outils de simulation.

Les applications des RDP dans la modélisation, l'analyse de performance et le contrôle des systèmes de trafic sont menées depuis plus d'une décennie. C'est un outil graphique qui fournit une représentation visuelle et est utile pour simuler les activités dynamiques et concurrentes dans les systèmes. En tant qu'outil mathématique, il permet aux systèmes d'être gouvernés par un ensemble d'équations mathématiques. Cette approche théorique peut décrire de façon appropriée le trafic urbain et le système de

transport qui possède des états de système qui sont distribués, parallèles, déterministes, stochastiques, discrets et continus. En conséquence, les modèles de trafic de RDP deviennent des outils utiles pour analyser les performances du système et aider le contrôle du trafic intelligent et optimisé.

### 2.4.1 MODELISATION ET SIMULATION

Les modèles de trafic et leurs propriétés peuvent être classés selon l'interprétation physique des situations de circulation qui est abordée avec des théories du système. Comme les modèles de trafic peuvent être représentés à différents niveaux de détail, à savoir les modèles microscopiques, macroscopiques et mésoscopiques, RDP a été prometteur dans l'encapsulation de tels détails dans sa structure de filet qui vient avec des propriétés structurelles et mathématiques utiles. Ici, les états de circulation peuvent être modélisés comme des systèmes continus, stochastiques, discrets et hybrides. De plus, la description de la situation du trafic par les modèles de RDP pourrait simuler de façon déterministe ou stochastique certaines situations de trafic plus rapidement qu'en temps réel.

#### 2.4.1.1 MODELES MICROSCOPIQUES

Les modèles microscopiques capturent le comportement de chaque véhicule, tels que les paramètres du conducteur et les paramètres de chaque véhicule se déplaçant dans le flux de circulation. Ces paramètres sont échantillonnés sur la base d'une fonction de distribution stochastique dérivée de mesures de trafic réel des données. Modèles existants qui décrivent microscopiquement la situation de la circulation. Dans le domaine des RDP, le **Tableau II.1** résume certaines des études rapportées dans la littérature. Le tableau présente le groupe de recherche, le type de RDP utilisé, les paramètres décrits par le modèle de RDP et les principales caractéristiques de ces travaux.

Groupe de recherche	Type de RDP	Paramètres modélisés	Principales caractéristiques
Di Febraro et Giglio [12] [13] [14]	RDPTD	Liaisons routières et intersections, taux d'occupation des véhicules et taux de virage aux intersections et plan de synchronisation des signaux.	La modularité est introduite où le modèle microscopique est défini comme l'intégration de quelques sous-modèles RDPTD qui peuvent être exprimés sous forme d'équations d'état.
Di Febraro, Sacco et Giglio [15]	RDPTS	L'occupation et le mouvement des véhicules sont modélisés différemment de leur travail dans [12] et [13] à l'aide de transitions temporelles stochastiques.	Résolution des blocages dans les modèles RDPTD précédents et estimation des files d'attente à l'intersection.
Badamchizadeh et Joroughi [16] Makela et. al [17]	RDPSD	Liaisons routières et intersections ; contrôle des feux de circulation ; occupation des véhicules et temps de trajet modélisés avec des temps déterministes et stochastiques.	Estimer la longueur des files d'attente [17] et le temps d'attente des véhicules [16].
Basile et. al [18] Dotoli et al [19] [20]	RDPT coloré	Liaisons routières et intersections ; contrôle des feux de circulation ; taux d'arrivée et de passage des véhicules, taux d'occupation des véhicules et itinéraire des véhicules.	Les jetons colorés sont utilisés pour modéliser l'itinéraire et occupation des véhicules. Simuler les fonctions objectives [18] et les files d'attente [19] [20].

**Tableau II .1** : Modèles de trafic microscopiques basés sur RDP

Febraro et Giglio [12] ont appliqué le RDP déterministe (RDPD) pour un modèle microscopique d'une zone urbaine de circulation signalisée comprenant des intersections et des routes signalisées (**Figure II .1**). Les modèles de routes et d'intersections du RDPTD sont intégrés à un RDPTD qui décrit un plan de synchronisation des signaux et un RDP qui gère les conflits structurels afin d'élaborer des modèles utiles pour la gestion de la circulation et les stratégies de contrôle des signaux.

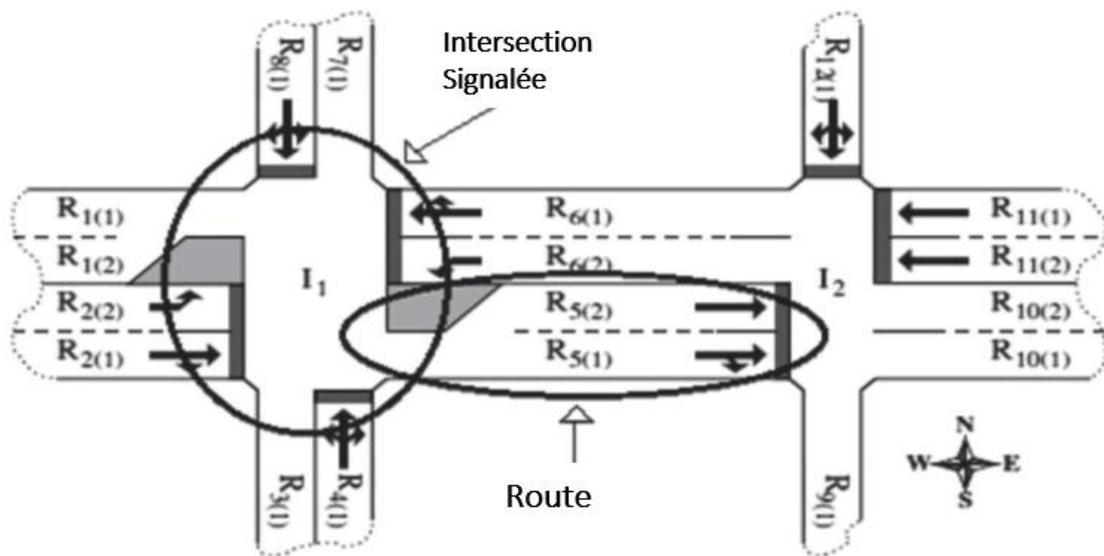


Figure II.1 : Intersections et routes signalées

#### 2.4.1.2 MODELES MACROSCOPIQUES

Les modèles macroscopiques de circulation ne décrivent pas la situation de la circulation au niveau des véhicules indépendants. Des variables telles que la circulation, la densité et la vitesse moyenne sont utilisées pour fournir des informations agrégées sur plusieurs véhicules. Les contributions des RDP à ce type de trafic sont énumérées dans le **Tableau II.2**.

Groupe de recherche	Type de RDP	Paramètres modélisés	Principales caractéristiques
Tolba et. al [21]	RDPCV	Vitesse moyenne du véhicule, densité et débit de sortie des autoroutes	Diagramme de base approximatif qui peut être utilisé pour estimer les paramètres de circulation tels que la vitesse du véhicule [23].
Kutil et Hanzalek [24]	RDPCC	Contrôle des signaux de circulation, espace libre au passage à niveau, taux	Au lieu d'utiliser le RDPT, le contrôle des feux de circulation est intégré au RDPCC. Un algorithme de

		de virage des véhicules, retard et vitesse moyenne	résolution de conflit gère les conflits en simulation de débit net et de débit.
Di Febraro et al [25] [26]	RDPH	Flux de trafic aux tronçons et aux intersections de la route, les taux de virage et le contrôle des feux de circulation	Un cadre modulaire composé de sous-réseaux RDP représentant différentes parties du système de trafic. Le flux de trafic et la dynamique des files d'attente peuvent être simulés.
Dotoli et. al [27]	RDPH 1 <sup>er</sup> ordre RDPT	Vitesse des véhicules, interruption de voie, taux de virage et contrôle des feux de circulation	Réduction de la dimension de l'espace d'état dans les travaux précédents [19] pour l'estimation de la file d'attente à l'aide de MATLAB.
Zhang et Jia [28]	Hybride RDP Coloré	Flux de trafic, vitesse des véhicules et contrôle des feux de circulation	Un modèle hybride RDP coloré avec RDPT pour modéliser le trafic macroscopiquement.
Di Febraro et Sacone [30]	RDPH	Flux de trafic et événements sur l'autoroute	Simuler l'effet des événements sur la circulation sur l'autoroute.
Xuan et. al [29]	RDPH	Flux de trafic au niveau non signalisé	Simuler les flux de trafic dynamiques à une intersection non signalisée en établissant des relations entre les flux de trafic, la capacité de dépassement et les files d'attente.

Farhi et. al [31]	RDP ordinaire	Flux et densité du trafic	Estimation du diagramme fondamental à partir du modèle RDP.
Wang et. al [32]	RDPS	Flux de trafic, taux d'arrivée des véhicules et contrôle des feux de circulation	Simulez la longueur des files d'attente et le délai.

**Tableau II .2 :** Modèles de trafic macroscopiques basés sur RDP

### 2.4.1.3 MODELES MESOSCOPIQUE

Les modèles mésoscopiques combinent les propriétés des modèles microscopiques et macroscopiques. Dans les modèles mésoscopiques, les véhicules individuels sont pris en compte, mais leurs interactions et leur comportement sont basés sur des paramètres macroscopiques. L'utilisation des RDP dans ce domaine de la modélisation est négligeable.

### 2.4.2 ANALYSE DE PERFORMANCE, MISE EN ŒUVRE, OPTIMISATION ET CONTROLE INTELLIGENT

Les stratégies de contrôle des feux de circulation ont des implications importantes sur le réseau de trafic. Ces stratégies peuvent être classées comme stratégies à temps fixe et sensibles au trafic et prédictif contrôle.

#### 2.4.2.1 ANALYSE DE PERFORMANCE

L'analyse des bonnes propriétés du RDP, telles que la sécurité, l'accessibilité et la réversibilité, donne une évaluation de la performance du système. Ceci est d'une grande importance à mettre en valeur le contrôle, car ces bonnes propriétés peuvent évaluer le signal de commande pour pouvoir atteindre tous les états souhaitables, il est facile de récupérer de l'erreur, fournit une régulation sans blocage des véhicules à une intersection et garantit que l'infrastructure est à la capacité.

### 2.4.2.2 LA MISE EN ŒUVRE

Les RDP ont fourni une méthode formelle de mise en œuvre de la logique contrôle dans des contrôleurs logiques en temps réel ou des processeurs intégrés. Les modèles de RDP décrivant la logique de contrôle des systèmes peuvent être traduits en codes informatiques utilisables. De plus, ils décrivant la séquence de contrôle des feux de circulation peuvent être traduits en diagramme fonctionnel séquentiel pour la mise en œuvre en contrôleurs logiques programmables.

### 2.4.2.3 OPTIMISATION ET CONTROLE INTELLIGENT

La prévision des états du trafic tel que les files d'attente et le flux de trafic sont utiles pour décider les mesures appropriées à prendre le plan de synchronisation du signal, on constate que le RDP joue un rôle de modèle prédictif des états de trafic, alors qu'un algorithme "externe" est développé pour manipuler les états prévus pour la prise de décision et la régulation d'un signal optimal contrôle.

## 2.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons réalisé une étude bibliographique sur les réseaux de Petri. Nous avons particulièrement étudié le rôle joué par les réseaux de Petri en transport. Plusieurs approches et modèles sont développés notamment les réseaux de Petri, les réseaux de files d'attente, la simulation discrète ...etc. Une description de cet outil et des extensions les plus utilisées est effectuée. Ils constituent un support à la fois graphique et mathématique performant aussi bien pour l'analyse et l'évaluation analytique que pour la simulation du système étudié.

# **CHAPITRE 3**

**MODELE A BASE DE RDP POUR  
LE CONTROLE DES  
CARREFOURS**

### 3.1 INTRODUCTION

Le problème de la régulation du trafic routier constitue un défi majeur pour les opérateurs et les promoteurs de transport. Les systèmes de gestion du trafic visent à réduire la congestion, les retards des véhicules, la consommation de carburant et la pollution. La technique la plus populaire pour réguler et gérer la circulation urbaine est le contrôle des feux de circulation. De nombreuses stratégies de contrôle des feux de circulation ont été développées, les stratégies de contrôle du trafic actuellement disponibles peuvent être divisées en deux grandes catégories : les stratégies de synchronisation fixes et les stratégies réactives au trafic. Dans le premier groupe, les plans de temps fixes sont déterminés par le système de contrôle à l'aide d'une méthode d'optimisation hors ligne mise en œuvre par des programmes informatiques. Dans ce cas, la gestion du trafic est loin d'une exploitation optimale des ressources car il n'est pas possible de poursuivre les fluctuations de la demande. La deuxième catégorie est celle des stratégies adaptées à la circulation qui utilisent des plans de synchronisation des signaux actionnés et offrent une optimisation et une synchronisation en ligne des signaux de circulation. Ces stratégies adaptatives régulent les feux de circulation en fonction du nombre de véhicules présentés à l'intersection : des capteurs détectent le trafic sur les phases d'intersection et fournissent des informations au contrôleur en temps réel.

En fait, un réseau de feux de circulation peut être observé comme un système complexe d'événements discrets. Les événements dans la circulation routière se traduisent par les arrivées et les départs de véhicules à l'intersection, et le début ou l'achèvement des différentes phases dans les plans de chronométrage des feux de circulation contrôlant les jonctions. Grâce à la force bien connue des réseaux de Petri pour atteindre des phénomènes de concurrence et de synchronisation, les modèles basés sur les RDP peuvent être convenablement dérivés pour les systèmes de circulation urbaine. Plus précisément, les RDP peuvent être utilisés pour décrire les feux de circulation et les activités concomitantes connexes.

Plusieurs travaux de recherche ont développé des approches utilisant des RDP dans le but d'éviter le problème des explosions combinatoires telles que l'approche modulaire et l'approche décentralisée. Pour la gestion du trafic aux intersections, chaque phase peut être considérée comme un sous-système à modéliser et à contrôler

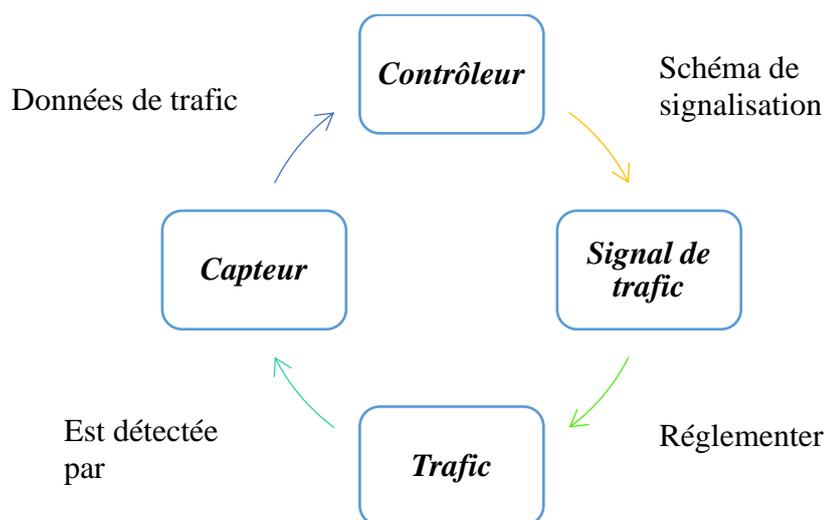
séparément. Cela montre la nature décentralisée du système. Compte tenu d'une telle configuration décentralisée, l'approche de contrôle du trafic nécessite l'utilisation d'une structure de coordination globale. Le coordonnateur dans une telle structure représente le contrôleur qui permet de gérer les conflits à l'intersection.

### 3.2 CONTROLE DES FEUX DE CIRCULATION DANS UN RESEAU

Pour le bon fonctionnement des feux de circulation, nous soulignons certaines exigences importantes pour les feux de circulation dans une intersection donnée :

- L'état vert dans le feu de circulation ne doit pas permettre à deux sections de route en conflit simultanément.
- Une séquence définie de feux de couleur active doit être suivie pour chaque feu de circulation, normalement du vert à l'orange et au rouge, puis de nouveau au vert.
- Le feu vert doit être donné successivement à toutes les phases (tous les véhicules ont le droit d'utiliser une intersection).

Les contrôleurs réactifs sont équipés pour recevoir des informations sur le flux de trafic provenant de divers détecteurs de mesure à des intervalles de temps actuels. Le contrôleur envoie le schéma de signalisation aux feux de circulation, qui contrôlent la circulation comme illustré à la **Figure III.1**.



**Figure III.1** : Schéma de signalisation

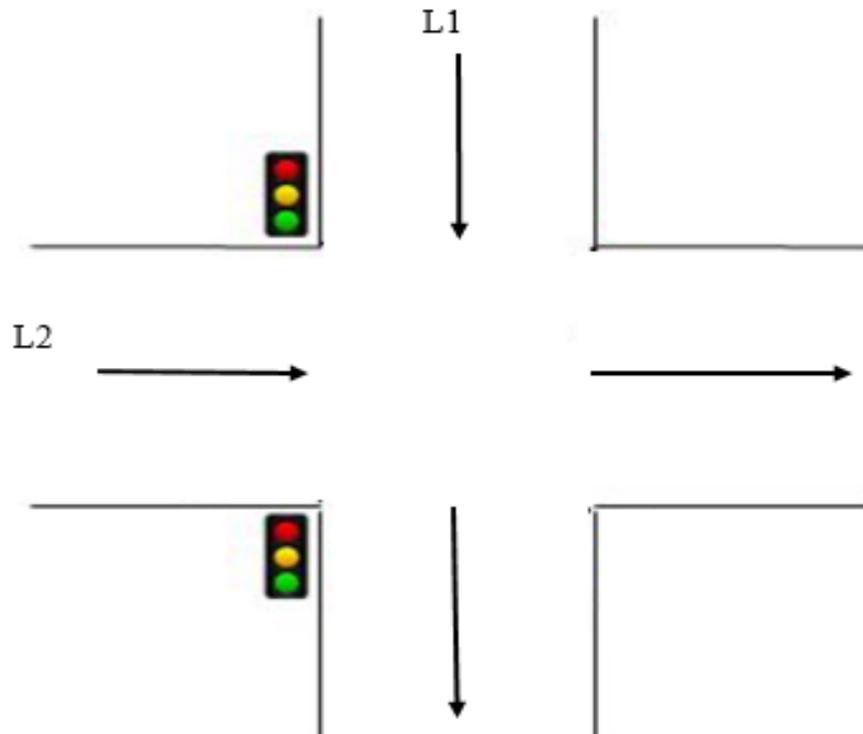
### 3.3 MODELE DE CARREFOUR A L'AIDE DE RESEAUX DE PETRI

#### 3.3.1 DESCRIPTION DE CARREFOUR ETUDIE

L'intersection étudiée comporte deux voies ( $L1$ ,  $L2$ ) avec deux feux de signalisation implantés à l'extrémité des voies (**Figure III.2**).

Le trafic s'écoule dans deux directions principales : Est-Ouest ( $E-O$ ) et Nord-Sud ( $N-S$ ). Par souci de simplicité, les voies de circulation sont supposées être à sens unique et la prise en compte des mouvements de tournes à gauche et à droite sont exclues de notre étude. De plus le feu a deux états « vert » et « rouge ». La durée du feu « orange » est ajoutée à celle du feu « rouge ».

Ce carrefour comprend des capteurs pour détecter l'arrivée de véhicules à l'intersection, des capteurs de flotte, et des capteurs situés à une distance donnée de la ligne d'arrêt permettent d'obtenir des renseignements sur la circulation dans chaque voie. Chaque voie du carrefour est de capacité limitée égale à  $C$ .



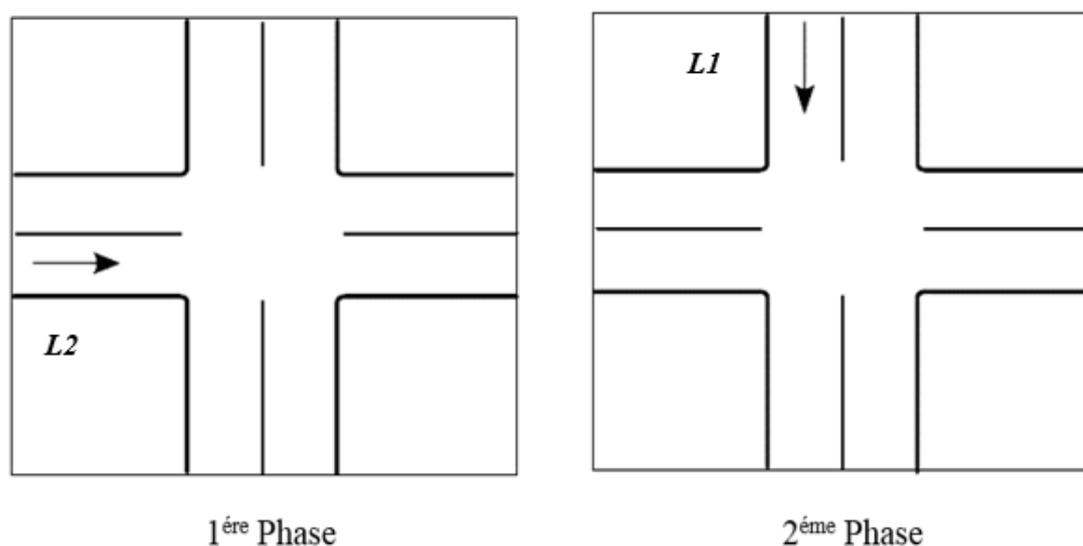
**Figure III.2** : Intersection à 2 voies avec 2 feux de circulation

Cette intersection comporte un plan de contrôle des feux de circulation biphasé typique, il y aura 2 phases (**Figure III. 3**).

C'est-à-dire :

- 1<sup>ère</sup> phase : les flux de trafic de L2 sont autorisés à traverser l'intersection tandis que les flux de trafic de L1 sont arrêtés.
- 2<sup>ème</sup> phase : les flux de trafic de L1 sont autorisés à traverser l'intersection tandis que les flux de trafic de L2 arrêtés.

Dans notre modèle, la séquence de couleur active va du vert au rouge, puis revient au vert. Nous supposons que le temps de la lumière orange est inclus dans le temps de rouge. La solution proposée dans la section suivante est de contrôler les carrefours en utilisant une temporisation variable qui détermine la durée du feu vert, en fonction du nombre de véhicules en attente à l'intersection.



**Figure III. 3 :** Exemple de phases dans une intersection donnée



➤ **Tableau des places :**

places	Interprétation
<b>P1,P6 ,P9</b>	La voiture en attente pour traverser le carrefour
<b>P2,P7</b>	La voiture est dans le carrefour
<b>P3</b>	Pour tester si le nombre de voiture dans la file d'attente est égale au capacité d'attente de carrefour
<b>P4,P11</b>	Le feu rouge de la voie A
<b>P5,P12</b>	le feu vert de voie B

**Tableau III. 1 :** Tableau d'interprétation des places de carrefour étudié➤ **Tableau des transitions :**

Transitions	Interprétation	Types
<b>T1</b>	L'arrivé des voitures (transition source)	Stochastique
<b>T2, T9</b>	Eterme de RDP cette transition utilisée pour indiquer que le véhicule peut traverser le carrefour	Immédiate
<b>T3, T10</b>	Indique le temps de séjour de voiture pendant le passage de carrefour	Stochastique
<b>T4, T12, T11</b>	Utilisée pour tester si la capacité de carrefour est égale Ci	Immédiate
<b>T6, T7</b>	Le temps de passage de feu rouge d'une voie à l'autre	Déterministe

**Tableau III. 2 :** Tableau d'interprétation des Transitions de carrefour étudié

Notre système qu'on a étudié est un carrefour à deux voies équipées par des capteurs de détection de passage de voitures (flotte) qui mesure la capacité de chaque voie. On a T1 et T8 deux transitions stochastiques qu'indiquent les arrivées aléatoires des véhicules.

Les feux tricolores (ici deux), sont représentés par les places P4 et P5, et par les transitions T6 et T7.

P4 → T6 → P5 → T7 est un circuit, ce qui traduit que les cycles des feux se déroulent 'librement' (ils ne sont notamment pas conditionnés par la présence des véhicules).

Les voitures arrivent à partir de T1 et T8, le capteur de flotte détecte le nombre des véhicules en attente de feu vert pour traverser le carrefour. Si par exemple, l'un d'eux a le feu vert et l'autre a le feu rouge donc on lance la priorité de passage à la voie qu'a la capacité de flotte pleine même si elle a le feu rouge pour diminuer la circulation routière (minimiser la congestion).

### 3.3.3 CODAGE MATRICIEL

On peut coder notre système de transports des véhicules sous forme matriciel, ces matrices de même dimension représentent en ligne les places, et en colonne les transitions.

**La matrice *Post*** : Concerne les arcs des transitions vers les places.

$$Post = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

**La matrice *Pré*** : contient l'évaluation des arcs qui vont des places vers les transitions.

$$Pré = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

**La matrice d'incidence W :**

Elle est définie par  $W = Post - Pré$

Étant donnée une transition T,  $W_{PT}$  est le nombre de jetons qui seront ajoutés (ou retirés si le nombre est négatif) à la place P si la transition T est franchie.

$$W = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

**Matrice d'inhibition  $W_0$  :**

Dont les éléments correspondent aux poids des arcs inhibiteurs reliant quelques places et transitions.

$$W_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_k = M_i + W * S \quad (5)$$

Tel que :

$M_k$  : le nouveau marquage.

$M_i$  : un marquage.

$W$  : matrice d'incidence.

$S$  : vecteur caractéristique.

➤ La première transition franchissable :

$$M_i = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M_k = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M_k = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

➤ La deuxième transition franchissable :

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M_k = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M_k = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

➤ La troisième transition franchissable :

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M_k = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M_k = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

➤ La quatrième transition franchissable :

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M_k = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M_k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

➤ La cinquième transition franchissable :

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M_k = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M_k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

➤ La sixième transition franchissable :

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M_k = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M_k = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

➤ La septième transition franchissable :

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$M_k = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$M_k = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

➤ La huitième transition franchissable :

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M_k = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M_k = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

➤ La neuvième transition franchissable :

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M_k = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M_k = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

### 3.3.4 GRAPHE DES MARQUAGES

Comme dans le cas des réseaux de Petri classique, une des méthodes de base pour l'étude d'un réseau de Petri ayant des arcs à poids variables consiste à construire son graphe des marquages. Ce dernier est composé de nœuds qui correspondent aux marquages accessibles, et d'arcs correspondant aux franchissements des transitions faisant évoluer le système modélisé d'un état à un autre en fonction d'évènements discrets qui se produisent dans le temps.

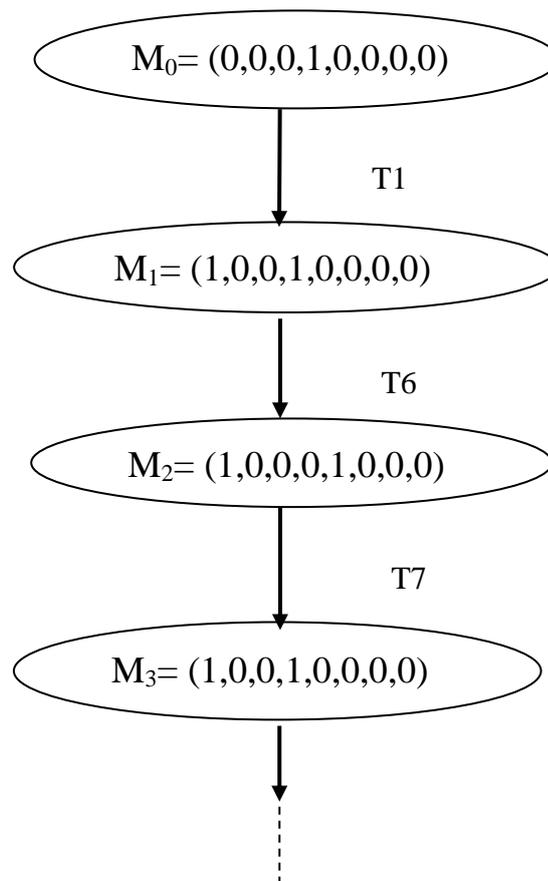


Figure III. 4 : Graphe des marquages du RDP de notre modèle de carrefour

- Pour chaque nouveau marquage, toutes les transitions qui peuvent être franchies sont déterminées et pour chaque transition de cet ensemble un arc est ajouté au nouveau marquage.
- Pour chaque nouveau marquage, on détermine l'ensemble des transitions franchissables et pour chaque transition de cet ensemble on ajoute un arc vers le nouveau marquage.

Donc on a :

$M_0 = (0,0,0,1,0,0,0,0)$  le marquage initial qui implique que T1 est valide et le franchissement de T1 provoque le nouveau marquage :

$M_1 = (1,0,0,1,0,0,0,0)$ , celui-ci nous donne le franchissement de T6, donc sa sera un notre marquage  $M_2 = (10001000)$ .

Les graphes des marquages accessibles sont habituellement intégrés dans les modèles de RDP simples, mais pour les modèles compliqués comme notre système il est assez difficile.

A partir de graphe des marquages du réseau de Petri de carrefour étudié (**Figure III. 4**), on peut dire qu'on est dans le cas où on ne peut pas s'arrêter puisque le RDP n'est pas borné. C'est-à-dire, le nombre des marques accessibles est infini ( $M_i \rightarrow \infty$ ).

Donc c'est difficile de continuer mathématiquement (RDP est inaccessible) on doit passer par la simulation numérique.

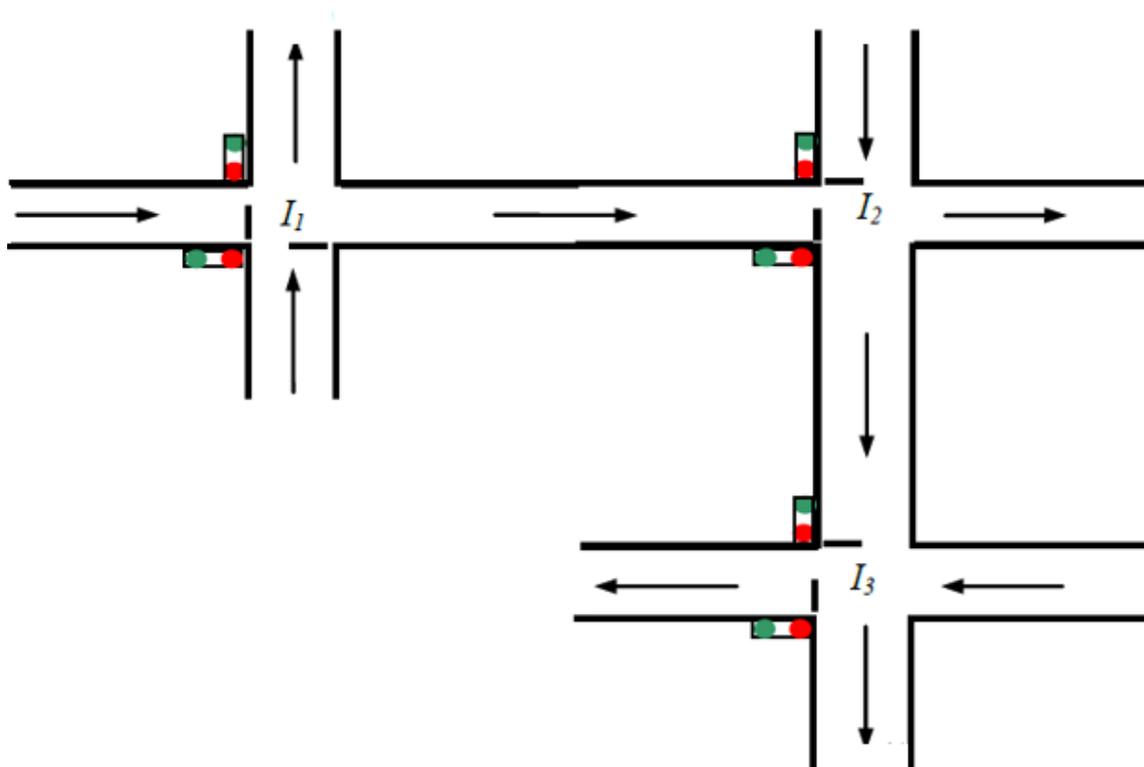
### 3.4 RESEAUX DES N CARREFOURS

Pour la modélisation de plusieurs carrefours (N carrefours) tel que :  $N=1,2, 3, \dots$ , en se basant sur l'approche de modélisation présentée précédemment, nous allons présenter le modèle RDP d'un réseau d'intersections interconnecté.

En effet, chaque carrefour est modélisé par un RDPT similaire au modèle qu'on a déjà fait dans la sous-section précédente.

#### ❖ Exemple de 3 carrefours

La **figure III. 5** montre un réseau du trafic avec trois carrefours ( $I1, I2, I3$ ) et deux directions de circulation. On suppose que le cycle des feux de chaque intersection possède deux états « vert » et « rouge ».



**Figure III. 5 :** Description d'un réseau de trois carrefours

Le modèle par les réseaux de Petri du réseau de la **figure III. 5** peut être représenté sous la forme de trois modules de carrefours comme le montre la **figure III. 6**.

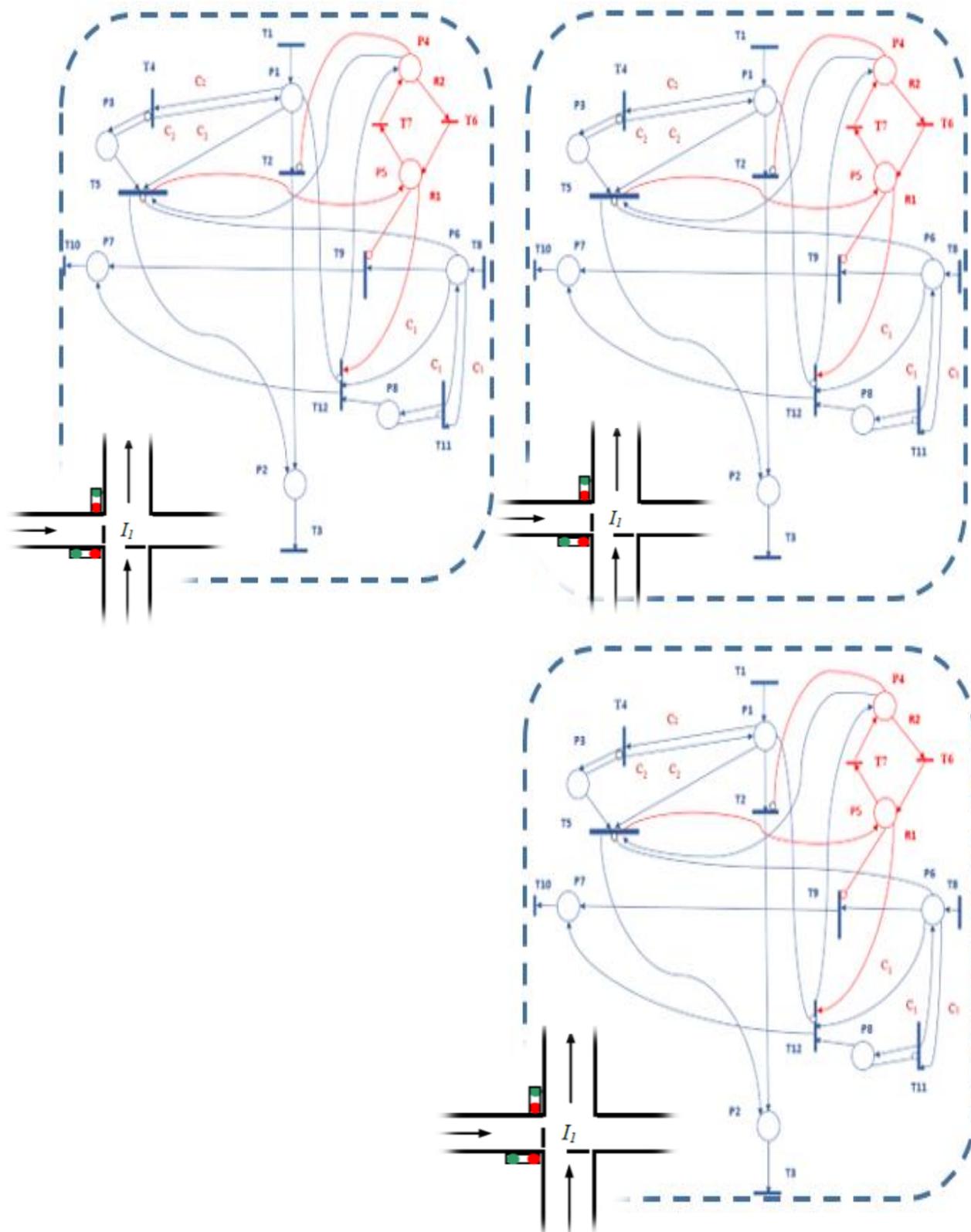


Figure III. 6 : Modèle par RDP de trois carrefours

### 3.5 CONCLUSION

Le RDP est un outil graphique et mathématique qui permet de modéliser le comportement des systèmes dynamiques travaillant sur des variables discrètes telles que les systèmes des transports urbains.

Dans ce chapitre, nous nous sommes focalisés sur les systèmes des véhicules dans un carrefour à deux voies d'une manière à éviter la circulation routière. Donc nous avons utilisés les réseaux de Petri temporisés de type T-Temporisé déterministes pour le temps fixe des feux tricolores et stochastiques qu'ils ont été introduits pour répondre à certains problèmes d'évaluation faisant intervenir des phénomènes aléatoires (l'arrivent des voitures aléatoires).

## CONCLUSION GENERALE

Le domaine de transport parmi les domaines les plus importants à la vie quotidienne, il est jusqu'à maintenant au développement pour répondre aux nécessités des personnes.

Dans le premier chapitre on a vu une explication plus détaillée sur les systèmes des transports intelligents qui a sa fonction principale d'améliorer leurs performances et l'amélioration de la sécurité routière. On a vu aussi la technologie de l'information et de la communication l'outil de support au traitement de l'information et la communication. Passé à l'internet des objets dans le transport qui sont utilisés dans le cadre des villes intelligentes pour l'objet de surveiller l'état des routes. Jusqu'à on arrive au terme de carrefour l'intersection des rues avec ses types et la conception.

Le deuxième chapitre intitulé le réseau de Petri qui est l'outil graphique et mathématique, contient des places représentées par des cercles, et des transitions représentées par des tirets reliés entre eux par des arcs représentés par des flèches. Les RDP ont l'objet de modéliser et améliorer les systèmes dynamiques notamment les systèmes de transport. Pour cet outil on distingue plusieurs types comme les RDP continue, les RDP temporisés, les RDP stochastiques, les RDP hybrides...etc.

Concernant le troisième chapitre, nous avons étudié un système de transport des véhicules sur un carrefour. Nous avons modélisé ce système sous forme d'un réseau de Petri, on a l'arrivée aléatoire des véhicules de telle sorte qu'on a utilisé des transitions stochastiques. Et des transitions immédiates pour les circuits de feu tricolore. Ce modèle RDP nous permet d'améliorer la circulation routière d'une façon à donner la priorité de passage à la voie qui a la capacité de flotte pleine sans tenir compte au feu tricolore.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Rodolfo I. Meneguette, Robson E. De Grande et Antonio A. F. Loureiro, « Intelligent Transport System in Smart Cities: Aspects and Challenges of Vehicular Networks and Cloud », 1<sup>er</sup> ed, pp. 13-17, 2018.
- [2] A. Perallos, U. Hernandez-Jayo, E. Onieva et I. Garcia-Zuazola, « Intelligent Transport Systems: Technologies and Applications », 1<sup>er</sup> Ed, pp. 26-28, 2015.
- [3] F. Bounaama et K. benahmed, « Les systemes de transport intelligent (STI) », Journées portes ouvertes sur la Faculté des Sciences Exactes JFSE, pp. 15-16. 2017.
- [4] Sébastien Faye, « Contrôle et gestion du trafic routier urbain par un réseau de capteurs sans fil », Infrastructures de transport, Telecom Paris Tech, 2014.
- [5] Hadjadj Walid, « L'utilisation de N-Version de programmation pour la prise en charge des fautes dans un environnement IoT », Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi, 2018.
- [6] G.A. Giannopoulos, « The application of information and communication technologies in transport », European Journal of Operational Research 152, pp. 302-306. 2004
- [7] G. Dimitrakopoulos et P. Demestichas, « Intelligent transportation systems », IEEE Veh Technol Mag 5(1), pp.77–84, 2010.
- [8] F. Cunha, L.Villas, A. Boukerche, G. Maia, A. Viana ,RA. Mini et AA. Loureiro, « Data communication in VANETs: protocols, applications and challenges », Ad Hoc Netw 44, pp.90–103, 2016.
- [9] B. Sammoud, « Contribution à la modélisation et à la commande des feux de signalisation par réseaux de Petri hybrides », Université de Technologie de Belfort-Montbéliard ; Université de Tunis El Manar, 2015.
- [10] M. TLIG, « Coordination locale et optimisation distribuée du trafic de véhicules autonomes dans un réseau routier », Université de Lorraine, 2015
- [11] Kok Mun Ng, Mamun Bin Ibne Reaz, et Mohd Alauddin Mohd Ali, “A Review on the Applications of Petri Nets in Modeling, Analysis, and Control of Urban Traffic”, IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, VOL. 14, NO. 2, pp.858-866, Juin 2013.
- [12] A. D. Febraro and D. Giglio, “On representing signalized urban areas by means of deterministic-timed Petri nets,” in Proc. IEEE Intell. Transp. Syst. Conf., Washington, DC, pp. 372–377, USA, 2004.

- [13] A. D. Febbraro and D. Giglio, “On adopting a Petri net-based switching modeling system to represent and control urban areas,” in *Proc. 8th Int. IEEE Conf. Intell. Transp. Syst.*, pp- 185–190, Vienna, Austria, 2005.
- [14] A. D. Febbraro and D. Giglio, “Traffic-responsive signaling control through a modular/switching model represented via DTPN,” in *Proc. IEEE Intell. Transp. Syst. Conf.*, Toronto, ON, pp. 1430–1435, Canada, 2006.
- [15] A. D. Febbraro, N. Sacco, and D. Giglio, “On using Petri nets for representing and controlling signalized urban areas: New model and results,” in *Proc. 12th Int. IEEE Conf. Intell. Transp. Syst.*, pp. 1–8, St. Louis, MO, USA, 2009.
- [16] M. A. Badamchizadeh and M. Joroughi, “Deterministic and stochastic Petri net for urban traffic systems,” in *Proc. IACSIT Singapore Conf.*, pp. 364–368, Singapore, 2010.
- [17] M. Makela, J. Lahtinen, and L. Ojala, “Performance analysis of traffic control systems using stochastic Petri nets,” Helsinki Univ. Technol., Digital Syst. Lab., Helsinki, Finland, Series B: Tech. Rep. No. 19, 1998.
- [18] F. Basile, P. Chiacchio, and D. Teta, “A hybrid model for real-time simulation of urban traffic,” *Control Eng. Pract.*, vol. 20, no. 2, pp. 123– 137, Feb. 2012.
- [19] M. Dotoli and M. P. Fanti, “An urban traffic network model via coloured timed Petri nets,” *Control Eng. Pract.*, vol. 14, no. 10, pp. 1213–1229, Oct. 2006.
- [20] M. Dotoli, M. P. Fanti, and G. Iacobellis, “Validation of an urban traffic network model using colored timed Petri nets,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Syst., Man Cybern.*, pp. 1347–1352, 2005.
- [21] C. Tolba, D. Lefebvre, P. Thomas, and A. E. Moudni, “Continuous Petri nets models for the analysis of urban traffic networks,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Syst., Man Cybern.*, Tucson, AZ, USA, 2001, pp. 1323–1328.
- [22] F. Bouriachi, “Contribution à la modélisation et à la commande du trafic urbain : Application à la ville de Guelma”, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2017.
- [23] P. Thomas and D. Lefebvre, “Traffic flow monitoring based on parameters estimation with continuous Petri net models,” presented at the IMACS, Paris, Paper T4-R-00-0462, France, 2005.
- [24] M. Kutil and Z. Hanzalek, “Light controlled intersection model based on the continuous Petri net,” in *Proc. 12th IFAC Symp. Control Transp. Syst.*, pp. 519–525, , 2009.

- [25] A. D. Febraro, D. Giglio, and N. Sacco, “Modular representation of urban traffic systems based on hybrid Petri nets,” in Proc. IEEE Intell. Transp. Syst. Conf., pp. 866–871, Oakland, CA, USA, 2001.
- [26] A. D. Febraro, D. Giglio, and N. Sacco, “Urban traffic control structure based on hybrid Petri nets,” IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 5, no. 4, pp. 224–237, Dec. 2004.
- [27] M. Dotoli, M. P. Fanti, and G. Iacobellis, “An urban traffic network model by first order hybrid Petri nets,” in Proc. IEEE Conf. SMC, pp. 1929–1934, 2008.
- [28] L. Zhang and L. Jia, “Intersection traffic system simulation based on hybrid CPN model,” in Proc. 2nd Int. Conf. Intell. Comput. Technol. Autom., pp. 644–647, Zhangjiajie, China, 2009.
- [29] S.-X. Xuan, X.-M. Zhao, Y.-S. An, and H.-W. Fan, “Modeling and simulation of dynamic traffic flows at non-signalized T-intersections,” in Proc. 2nd Int. Conf. Power Electron. Intell. Transp. Syst., pp. 1–5, Shenzhen, China, 2009.
- [30] A. D. Febraro and S. Saccone, “Hybrid Petri nets for performance analysis of transportation systems,” in Proc. 37th IEEE Conf. Decision Control, Tampa, FL, pp. 3232–3237, USA, 1998.
- [31] Taha Benarbia, « Contribution à la modélisation et à l’analyse de performances des systèmes de vélos en libre-service en vue de leur régulation : “ Une Approche basée sur les réseaux de Petri” », Université de Cergy Pontoise, 2013. Français.
- [32] K. Labadi, « Contribution à la modélisation et à l’évaluation de performances des systèmes logistiques à l’aide d’un nouveau modèle de réseaux de Petri stochastiques », Université de Technologie de Troyes, 2005.
- [33] T. Doat, « Utilisation de modèle à événements discrets pour l’amélioration du démonstrateurs 3D », Université d’Angers, 2008.
- [34] H. Lamghari, A. Tajer, A. Nait-Sidi-Moh, B. Dakkak, “An Adaptive Control Strategy of Urban Signalized Intersection Using Petri Nets”, The International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD2018), Marrakech, Morocco, Mar 2018.

