

M/21.799

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de Fin d'Etude
pour l'obtention du Diplôme de Master Académique**

Domaine : **Sciences et Techniques**
Filière : **Electronique**
Spécialité : **Systemes Electroniques**

Modélisation et simulation d'un réseau du trafic urbain

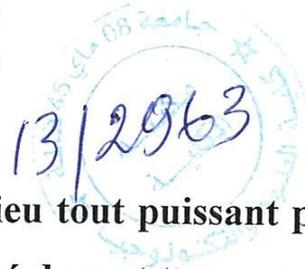
Présenté par : Attafi Nasreddine
Douakha Radouane

Sous la direction de :

Pr. Hicham Tebbikhe & Dr. Bouriachi Fares

JUIN 2013

REMERCIEMENTS



Nos remerciements vont tout premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la puissance qu'il nous a donné durant tous ces années d'études, la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Nous sommes très heureux de témoigner notre profonde estime à nos encadreurs messieurs Pr. HICHAM TEBBIKH et Dr BOURIACHI FARES, de l'Université de Guelma, nous sommes très reconnaissants à eux de nous avoir fait bénéficier de ces compétences scientifiques et d'avoir proposé et dirigé ce travail. Nous tenons à les exprimer notre grand respect et notre admiration pour leurs personnalités et leurs générosités et nous les remercions pour leurs contributions dans notre formation.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, tout nos remerciements a tous nos enseignants Et nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Tables des matières

Introduction générale	01
Histoire.....	02

Chapitre1

Généralités sur le trafic routier

1- Introduction	04
2- le trafic routier.....	05
2.1 Carrefour a feux.....	05
2.2 Usage	05
2.3 Composantes du trafic routier.....	06
2.4 Variables élémentaires du trafic routier.....	06
2.5 Mesures usuelles du trafic.....	06
2.5.1 /Les capteurs pneumatiques.....	07
2.5.2 /Les boucles électromagnétiques.....	07
2.5.3/ Les détecteurs acoustiques : Les ultra-sons	08
2.5.4/Le capteur vidéo.....	08
3-Régulation des carrefours à feux.....	09
4-Régulation des carrefours avec véhicules autonomes dans le cadre d'un système de Transport Intelligent.....	10
5-Sécurité et environnement.....	11
5.1 Avantages.....	11
5.2 Inconvénients.....	11
6-conclusion.....	12

Tables des matières

Chapitre 2

Les réseaux de pétri

1-Introduction	14
2-Notion de graphe orienté	15
2.1. Marquage.....	16
2.2. Franchissement d'une transition.....	16
2.3. Equation fondamental ou équation d'état.....	17
3- L'étape de modélisation	18
4-Outils de modélisation	19
5- modélisation par réseau de Pétri	19
6- Rdp Particuliers	20
6.1. Graphe d'état.....	20
6.2. Graphe d'événement.....	21
6.3. RdP sans conflit.....	21
6.4. RdP à choix libre.....	21
6.5. RdP simple.....	22
6.6. RdP pur.....	22
7-Classification des réseaux de Pétri	23
7.1 Rdp autonome.....	23
7.1.1 Réseau de Pétri généralise.....	23
7.1.2. RdP à capacités.....	23
7.1.3. RdP à priorités.....	23
7.1.4. Réseau de Pétri ordinaire.....	23
7.1.5. Réseau conforme.....	24
7.1.6. Réseau de Pétri interprété.....	24
7.1.7. Réseau de Pétri coloré.....	24
7.2. Réseaux de Pétri non autonomes.....	24
7.2.1. Réseau de Pétri Synchronisé.....	25
7.2.2. Réseau de Pétri Temporisé.....	25
7.2.3. Réseau de Pétri Continue	25
8-Conclusion	25

Tables des matières

Chapitre 3

Système dynamique hybride

<i>1- introduction.....</i>	26
<i>2- les réseaux de pétri.....</i>	26
2.1 Les réseaux de pétri discrets.....	27
2.2 Les réseaux de pétri continus.....	28
2.3 Les réseaux de pétri hybrides.....	29
<i>3- structure d'un système hybride.....</i>	30
<i>4- les automates hybrides.....</i>	31
<i>5- outil de modélisation.....</i>	32
<i>6- surveillance des systèmes hybrides.....</i>	32
<i>7- conclusion.....</i>	33

Chapitre 4

Modélisation d'un réseau du trafic urbain par automate hybride

1-introduction.....	34
2- Les approches.....	34
3-Modélisation d'écoulement du trafic dans le réseau urbain.....	35
• Principe de continuité.....	36
• Equation de conservation de la masse.....	37
• Diagramme fondamental.....	37
• La discrétisation spatio-temporelle.....	38
• Discrétisation spatiale.....	38
4-Modélisation par Automate hybride.....	39
4.1. Définition.....	39

Tables des matières

4.2. Exemple d'un automate a états finis.....	39
4.3. Modèle d'automate hybride de réseau du trafic urbain.....	39
A. Description du phénomène d'attente au niveau d'un carrefour à feu.....	39
B. Analyse du fonctionnement du système.....	41
5- Etude et validations des résultats.....	42
5.1 Généralité sur stateflow.....	42
5.1.1 Définition.....	42
5.1.2 Caractéristiques stateflow.....	43
5.2 Description.....	44
5.3 Simulation de la file d'attente (q) au niveau d'un carrefour.....	44
5.4 Évolution des modes(simulation de comportement du contrôle de feu tricolore).....	45
6-Modèle par RdP des intersections.....	46
7-Conclusion.....	48
CONCLUSION GENERALE.....	49

Tables des figures

Figure 1:L'ancêtre des feux tricolores.....	3
Figure 1.1 : Carrefour à feux.....	5
Figure 1.2 : capteurs pneumatiques.....	7
Figure 1.3 boucles électromagnétiques.....	7
Figure 1.4 : Les ultrasons.....	8
Figure 1.5 : capteur vidéo.....	8
Figure 1.6 : Illustration d'un carrefour isolé.....	9
Figure 3.1 : Réseau de Pétri discret.....	27
Figure 3.2 : Exemple d'un Réseau de Pétri continu.....	28
Figure 3.3 : Exemple d'un Réseau de Pétri hybride.....	29
Figure 3.4 : Structure d'un système hybride.....	30
Figure 4.1 : Analogie d'une section de la route avec un réservoir hydraulique.....	36
Figure 4.2 : Diagramme fondamental dans le plan (ρ , f).....	37
Figure 4.3 : Section d'un lien urbain.....	38
Figure 4.4 : Automate à états finis d'un feu tricolore.....	39
Figure 4.5 : Différents états de l'évolution de la file d'attente dans un tronçon de la route.....	40
Figure 4.6 : Automate hybride du système en comportement normal.....	41
Figure 4.7 : stateflow.....	43
Figure 4.8 : Le réseau du trafic routier de la ville de Guelma et les points chauds de la circulation.....	44
Figure 4.9 : Présentation de la zone d'étude.....	44
Figure 4.10 : Évolution de la file d'attente au niveau d'un carrefour.....	45
Figure 4.11 : Évolution des modes.....	45
Figure 4.12 : Évolution de la dynamique hybride.....	46
Figure 4.13 Modèle par RdPH du carrefour.....	47

INTRODUCTION GENERALE

Depuis la seconde moitié du 20^{ème} siècle, le phénomène de la congestion routière est devenu prédominant en raison de l'augmentation rapide du nombre de véhicules et de la demande en transport. Surtout au cours de la dernière décennie, la congestion a attiré une grande attention en raison de la crise énergétique mondiale et les préoccupations environnementales. Parmi les différents leviers, la régulation aux niveaux des intersections est au centre des développements actuels pour améliorer la Circulation routière dans les villes modernes.

La méthode classique adoptée pour prévenir ou réduire les congestions dans les villes modernes est basée sur la signalisation routière. Le droit de passage est attribué aux usagers par l'utilisation de feux de couleurs standards (rouge-orange/jaune-vert), ce qui permet de résoudre les conflits entre les différents flux de circulation aux carrefours. Le contrôle de la signalisation du trafic pour les carrefours se divise généralement en deux catégories : la stratégie de contrôle à plan de feux fixe, c'est-à-dire avec un cycle fixé, et la stratégie de contrôle adaptative, qui permet des changements de durées de phases en fonction de la demande du trafic. Les deux stratégies sont basées sur l'estimation du débit du trafic. Puisque le débit est une variable continue qui nécessite une période de temps donnée pour être estimée, il y a toujours des écarts importants entre le débit estimé et le débit réel. Cela rend difficile l'exploitation du potentiel des infrastructures de la circulation à un niveau maximum.

Cependant, le développement des systèmes d'information nous offre l'opportunité de palier cet inconvénient. La technologie de communication sans fil comme le Wifi, le WiMax et la 3G a permis les communications véhicule-véhicule « Vehicle to Vehicle communication (V2V) » et les communications véhicule-infrastructure « Vehicle Infrastructure Integration (VII) ». Ces technologies de communication renforcent le lien entre les véhicules, les infrastructures et l'environnement de conduite. Par ailleurs, les avancées dans le domaine des technologies de calcul et de capteurs de conduite ont permis l'émergence de véhicules totalement autonomes, qui prennent le contrôle total des opérations du véhicule et réduisent l'intervention du conducteur dans la boucle de contrôle. Diverses applications des véhicules autonomes ont été démontrées en Europe, au Japon et aux Etats-Unis. Sous ce contexte, le concept de la gestion autonome d'un carrefour « Autonomous Intersection Management (AIM) » a attiré un grand intérêt dans la dernière décennie.

Dans le cadre de l'AIM, les véhicules autonomes communiquent avec des infrastructures routières (en bordure de route) pour échanger des informations sur leurs états. Cela peut assurer la sécurité du conducteur et accroître ainsi l'efficacité du voyage. Plus précisément, basé sur la technologie VII, l'infrastructure routière aux carrefours (considérée aussi comme contrôleur) peut communiquer avec les véhicules qui arrivent à un carrefour de manière continue. Les données importantes sur les véhicules telles que la vitesse, la position et la destination sont alors reçues par les capteurs avancés et envoyées au contrôleur en temps réel. Par conséquent, il est possible d'élaborer une stratégie de contrôle du trafic en considérant chaque véhicule comme une entité indépendante. En d'autres termes, le droit de passage est attribué à chaque véhicule en fonction de son état et en fonction de l'état global du trafic au carrefour. Seuls les véhicules qui ont reçu le droit de passage peuvent traverser le carrefour. Le contrôle du trafic au niveau d'un carrefour vise donc à déterminer les séquences de passage des véhicules, c'est-à-dire les séquences de distribution des droits de passage. Cette nouvelle stratégie de contrôle du trafic a un grand potentiel pour exploiter la capacité de l'intersection.

Toutefois, et afin de mettre en œuvre cette nouvelle méthode de contrôle, nous devons faire face à deux grandes difficultés. Tout d'abord, comment échanger des informations entre les véhicules ou entre les véhicules et les infrastructures routières. Les protocoles et dispositifs sans fil avancés utilisés dans les véhicules autonomes ont été bien étudiés. Ensuite, comment trouver une séquence de passage des véhicules efficace de sorte à maximiser le débit de circulation aux intersections, tout en maintenant en même temps la sécurité des conducteurs. Dans la littérature, la plupart des recherches déterminent la séquence de passage des véhicules en se basant simplement sur la méthode de contrôle « First In First Out » (FIFO). Bien que cette méthode a besoin de très peu de temps de calcul, elle limite le potentiel d'exploiter au maximum la capacité du carrefour. Récemment, des chercheurs ont commencé à s'intéresser à l'optimisation des séquences de passages des véhicules...

Dans ce mémoire, nous introduisons tout d'abord la problématique de régulation du trafic avec des véhicules autonomes tout en utilisant la technologie VII, ainsi que les algorithmes de contrôle existants dans la littérature. Nous modélisons ensuite mathématiquement le problème de la régulation du trafic au niveau des carrefours. La complexité du problème sera aussi étudiée. En effet, nous prouvons que le Modèle que nous avons défini est un problème NP-hard en utilisant la réduction au problème de 3-Partition. Puis, nous appliquons les méthodes de résolutions exactes sur un carrefour isolé pour proposer des algorithmes permettant de trouver une séquence de passage optimale. Plusieurs propriétés du problème ont été introduites et prouvées et ceci afin qu'elles soient exploitées par ces algorithmes. Ces propriétés ont pour objectif de réduire considérablement l'espace de recherche et par conséquent le temps d'exécution de ces algorithmes exacts.

La congestion dans les grandes villes est généralement causée par plusieurs carrefours adjacents situés dans des réseaux de rues denses. Ainsi nous ne limitons pas nos recherches sur des carrefours isolés mais nous appliquons l'approche de contrôle proposée sur un réseau de carrefours. Un des inconvénients de l'installation d'un contrôleur à chaque intersection est qu'elle augmente le coût de construction et d'entretien des infrastructures, qu'elle augmente le coût de construction et d'entretien des infrastructures. Il serait donc intéressant d'étendre l'approche de contrôle sur un réseau de carrefours tout en considérant un seul contrôleur au lieu de plusieurs contrôleurs. Cependant, un algorithme exact appliqué sur plusieurs carrefours ne peut être assez rapide surtout lorsqu'on a besoin de communiquer rapidement des informations aux véhicules (en temps réel). Nous proposons donc des méthodes de résolutions approchées afin de trouver en un temps raisonnable une séquence de passage satisfaisante pour chaque carrefour. Ces algorithmes ont en effet, besoin de moins de temps de calcul tout en assurant une bonne qualité de solution.

Histoire

Bien qu'il existe très peu de sources historiques sur les signaux routiers, il semblerait que ce soit à Londres, à l'intersection entre Bridge Street et Palace Yard, qu'un feu de signalisation ait été utilisé pour la première fois, le 10 décembre 1868 : c'est une lanterne à gaz pivotante aux couleurs rouge et verte, manœuvrée à l'aide d'un levier manuel par un agent de police (l'un d'eux sera grièvement blessé le 2 janvier 1869). Ce n'est que bien plus tard, après leur généralisation, que les feux deviennent tricolores par l'adjonction d'une phase intermédiaire marquée par la couleur jaune-orange.

Aux États-Unis, les premiers feux bicolores (rouge et vert) sont installés en 1912 à Salt Lake City par le policier Lester Wire (1887–1958). Puis American Traffic

Signal Company installe en août 1914 à Euclid Avenue (Cleveland, Ohio). L'agent de police William Potts (1883-1947) crée le feu orange en 1920 à Détroit. Garrett A. Morgan (1877-1963), ingénieur afro-américain, crée une version d'arrêt automatique en 1923 pour General Electric en utilisant les trois couleurs fréquentes sur les drapeaux africains.

En France, le premier feu de signalisation est posé, le 5 mai 1923, au croisement des boulevards Saint-Denis et Sébastopol à Paris. Il est rouge, fonctionne à l'électricité et est accompagné d'une sonnerie. Il faudra attendre dix ans avant que n'apparaissent les feux vert et orange.

Les ampoules de certains feux tricolores sont remplacées par des diodes électroluminescentes ou affichent le décompte du second restant avant le changement d'état.

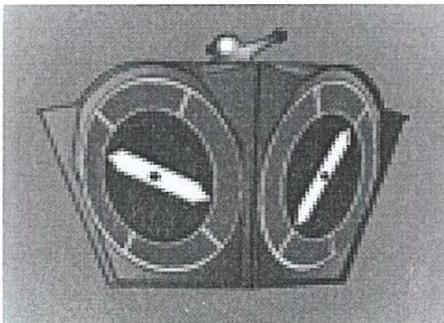


Figure 1. L'ancêtre des feux tricolores



Musée de Melbourne

Chapitre I

Généralités Sur Le Trafic Routier

1-Introduction:

La croissance permanente de la population dans les villes modernes a augmenté le nombre des véhicules et aussi la nécessité d'une circulation fluide des personnes et des marchandises dans les réseaux urbains. Ainsi, le problème de la congestion du trafic est devenu l'un des principaux problèmes à résoudre par les systèmes de régulation du trafic d'aujourd'hui. Particulièrement, au cours de la dernière décennie, la congestion du trafic a attiré une attention significative à cause de les crises énergétiques mondiales et les préoccupations environnementales. Malgré qu'il existe de bons systèmes de gestion de route et des infrastructures routières suffisantes pour le transport, nous faisons encore face à une congestion du trafic, en particulier, aux carrefours à feux. La méthode conventionnelle qui permet d'éviter la congestion dans les villes modernes est la commande par feux de signalisation. En effet, les feux de signalisation permettent de résoudre les conflits inhérents aux intersections. Cependant, les modes de gestion des feux d'un carrefour isolé reposent parfois sur des modèles pensés d'une manière qui les rend inadéquats au traitement de différentes situations rencontrées au niveau local. Il en découle que la commande des feux est souvent approximative et prend en compte des valeurs moyennes.

Heureusement, avec les progrès significatifs réalisés dans le développement des technologies d'informatique et de télécommunication au cours des dernières décennies, de nombreuses nouvelles stratégies et technologies de régulation du trafic ont été proposées dans le cadre des « Systèmes de Transport Intelligent (STI) ». Par exemple, les technologies sans-fil comme le WIFI, WiMax et 3G permettent le développement des communications inter-véhiculaires « Vehicle to Vehicle communication (V2V) » et de l'intégration des communications véhicule infrastructure « Vehicle Infrastructure Integration (VII) ». En plus, la miniaturisation des dispositifs embarqués et la disponibilité du GPS ont fait des véhicules équipés d'un « Système informatique » de plus en plus populaires. Récemment, les véhicules autonomes commencent à être considérés comme la solution pour assurer un trafic plus sécuritaire et plus efficace. Cela nous offre des nouvelles opportunités pour améliorer les inconvénients des systèmes de régulation existants.

Dans ce chapitre, nous présentons les éléments de base composant un trafic urbain, ainsi que les méthodes de régulation existantes au niveau des feux de signalisation. Ensuite, nous introduisons quelques méthodes émergentes et qui utilisent les véhicules autonomes pour la régulation du trafic au niveau des carrefours. [1]

2- Le Trafic Routier :

2.1 Carrefour à feux

Un **carrefour à feux** est une intersection dont le trafic est réglé par des feux de signalisation lumineux pilotés par un contrôleur. Le réglage des cycles de feux doit permettre d'assurer la sécurité des automobilistes et des piétons tout en permettant un débit maximal. [2]

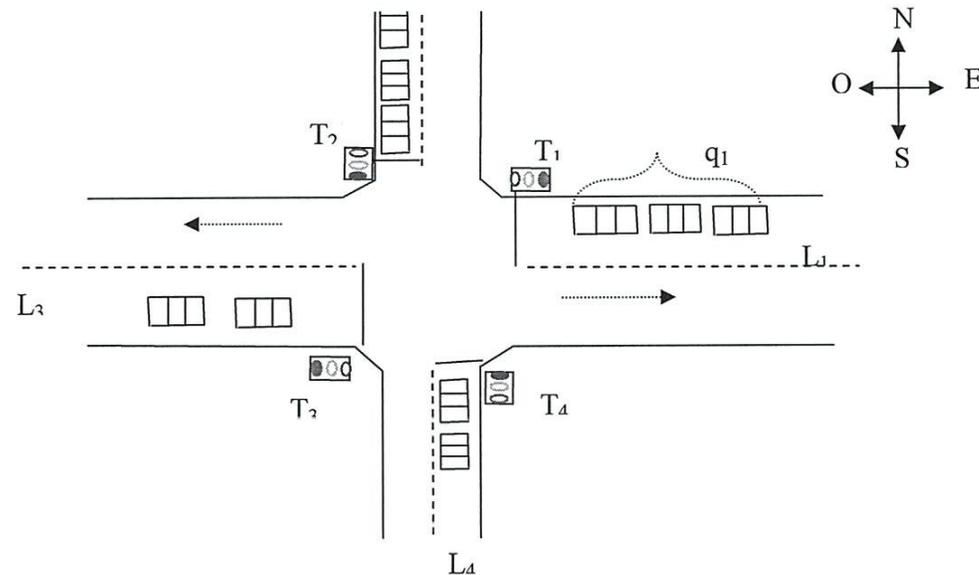


Figure 1.1 Carrefour à feux

2.2 Usage :

L'emploi des feux de circulation a pour but d'assurer la sécurité des piétons et des usagers des véhicules et d'améliorer la fluidité de la circulation. On peut citer comme exemples d'emploi:

- la gestion du trafic aux intersections
- la traversée des piétons
- l'exploitation par sens uniques alternés d'une section où le croisement est impossible ou dangereux (ouvrage d'art étroit, etc.)
- l'affectation de certaines voies d'une chaussée à un sens de circulation en fonction des besoins, ou leur condamnation momentanée
- le contrôle d'accès à certaines voies rapides
- la gestion d'un point de contrôle des personnes ou des véhicules nécessitant leur arrêt (péage)

- la protection d'obstacles intermittents (passages à niveau, traversées de voies de tramways, ponts mobiles, passages d'avions, avalanches, etc.).

2.3 Composantes du trafic routier :

En général, le trafic est constitué de deux composantes majeures: l'infrastructure et les mobiles.

L'infrastructure est un ensemble d'éléments structuraux interconnectés qui fournissent le cadre pour supporter la totalité de la structure du trafic. Par exemple, pour les réseaux routiers et autoroutiers, l'infrastructure contient les structures : ponts, ponceaux, signalisation et marquages, systèmes électriques (Lampes d'éclairage public et de circulation) et les traitements de bord (bordures, trottoirs, aménagement paysager).

Les mobiles sont les individus qui utilisent l'infrastructure, principalement dit, des véhicules. Les piétones ne sont pas considérés car leurs mouvements sont supposés dépendre de celui des mobiles. Notons que les véhicules à l'arrêt ou en stationnement, au sens défini par le code de la route, sont considérés comme faisant partie de l'infrastructure et ne sont généralement pas pris en compte. Autrement dit, seuls les mobiles en mouvement sur la route et en interaction avec la signalisation sont considérés. Dans les sous-sections suivantes, nous introduisons les variables élémentaires utilisées et les mesures usuelles pour l'analyse du trafic.

2.4 Variables élémentaires du trafic routier :

Le développement considérable de la circulation automobile et l'accroissement constant de la motorisation ont rendu nécessaire l'élaboration des théories du trafic, capables de décrire, d'expliquer et de prévoir les interactions entre les véhicules ainsi que les mouvements d'ensemble sur les infrastructures routières. Ces théories, déterministes ou probabilistes s'introduisent au moyen d'un certain nombre de variables, de relations ou de distributions caractéristiques.

2.5 Mesures usuelles du trafic :

Il existe de nombreux types de capteurs permettant la mesure directe ou indirecte des variables de circulation. Ces capteurs sont généralement des éléments transducteurs, sensibles à la grandeur physique que l'on veut saisir : présence, passage, vitesse d'un véhicule. Le capteur peut changer l'information en un signal élémentaire, transmis au détecteur. Le signal reçu est transformé en une information électrique simple, significative du paramètre de circulation. Compte tenu des évolutions technologiques rapides dans le domaine, de la métrologie routière, seuls les principaux types de capteurs d'emploi courant sont ici

mentionnés à savoir :

- Les pneumatiques
- Les boucles électromagnétiques
- Les ultrasons
- Le capteur video

2.5.1 / Les capteurs pneumatiques:

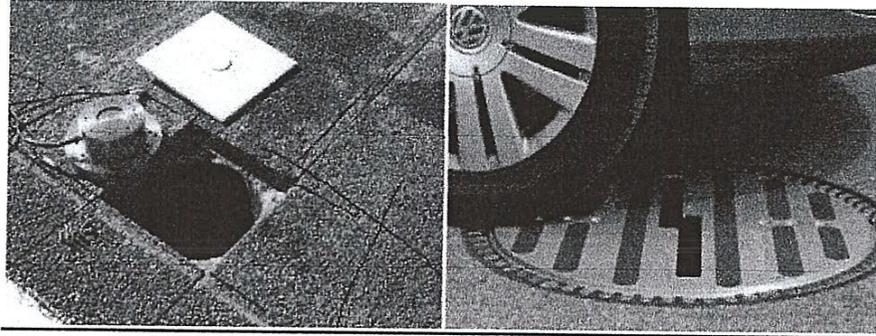


Figure 1.2 capteurs pneumatiques

Ils permettent d'effectuer des comptages routiers et donc de mesurer les débits. Ils sont constitués d'un câble en caoutchouc, tendu en travers de la chaussée et relié à un détecteur. L'écrasement du câble lors du passage d'un véhicule provoque une surpression, détectée par un manomètre actionnant un relais. Il est alors possible de compter le nombre d'essieux passant sur le capteur en cumulant les impulsions dans un compteur. Les comptages sont par la suite exprimés en *u.v.p* (unité de voiture particulière): $1 \text{ u.v.p} = 2 \text{ essie}$.

2.5.2 / Les boucles électromagnétiques:



Figure 1.3 boucles électromagnétiques

C'est aujourd'hui le dispositif de mesure des paramètres de circulation le plus répandu dans de nombreux pays, tant en ville que sur les voies rapides et les autoroutes urbaines.

Le capteur est constitué d'une boucle inductive, noyée dans le revêtement de la chaussée. Le passage de la masse métallique d'un véhicule au dessus de la boucle provoque une variation du champ électromagnétique. Cette variation se traduit par un créneau de tension dont la longueur est liée à celle du véhicule et à son temps de passage.

2.5.3/ Les détecteurs acoustiques (Les ultrasons) :



Figure 1.4 Les ultrasons

Le capteur acoustique est constitué d'une antenne directive fixée sur un support. Cette antenne émet une onde ultra sonore se propageant avec une vitesse connue. Lors du passage d'un véhicule, l'onde ultra sonore rencontre une surface réfléchissante. Une fraction de cette onde réfléchiée par le mobile, et est ensuite captée par le récepteur au bout d'un certain temps

De détection. Cette durée du temps de détection permet le calcul du taux d'occupation. Le détecteur permet aussi un comptage des véhicules.

Le capteur peut souvent être fixé sur un portique au dessus et dans l'axe de la voie de circulation. Le temps de détection est alors variable selon la hauteur des véhicules. Cette caractéristique permet de discriminer plusieurs catégories.

Un montage adéquat permet d'éviter la réception d'échos parasites. Dans les conditions d'un fonctionnement normal, la précision sur la mesure des distances est de 0.5m. La vitesse de propagation des ondes ultra sonores étant fonction de la température et de l'humidité de l'air.

2.5.4/ Le capteur vidéo:

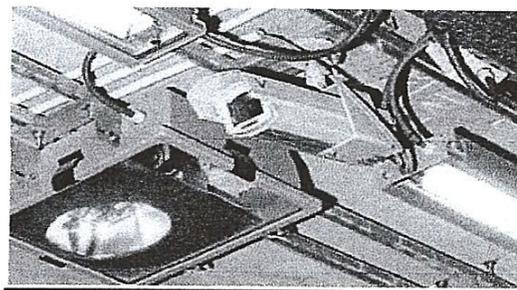


Figure 1.5 capteur vidéo

Ce domaine fait aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches dans le monde. Le principe de ce capteur consiste à utiliser une caméra vidéo et à traiter de manière automatique les images fournies par cette caméra afin d'en déduire les paramètres du trafic.

3-Régulation Des Carrefours A Feux :

Dans les villes, la plupart des systèmes de régulation des carrefours sont de deux types : régulation à plan de feux fixe et régulation adaptative. Le premier type de régulation est plus ancien et moins coûteux, tandis que le deuxième est plus complexe et performant. Nous présentons dans cette partie les méthodes existantes pour la régulation d'un carrefour isolé. Tout d'abord, nous allons donner un certain nombre de définitions sur le carrefour isolé à feux.

Un carrefour isolé est situé à la rencontre de plusieurs rues déterminant des voies d'entrée et de sortie voir (Figure 1.2). Il peut revêtir de nombreuses formes, tant dans l'infrastructure que dans les règles de franchissement. Les flux de véhicules sont soit des flux directs, soit des flux de tourne-à-gauche, soit des flux de tourne-à-droite.

Comme nous l'avons vu dans la (Figure 1.1), ce carrefour simple est composé de quatre routes (ou quatre directions). Une route est caractérisée par sa longueur, son nombre de voies. Cette figure montre également les zones fonctionnelles: la « zone de conflit », commune aux deux routes et la « zone de stockage ». On peut aussi définir la « longueur de stockage » comme la longueur sur laquelle stockent tous les véhicules pouvant pénétrer le carrefour pendant la durée du feu vert.

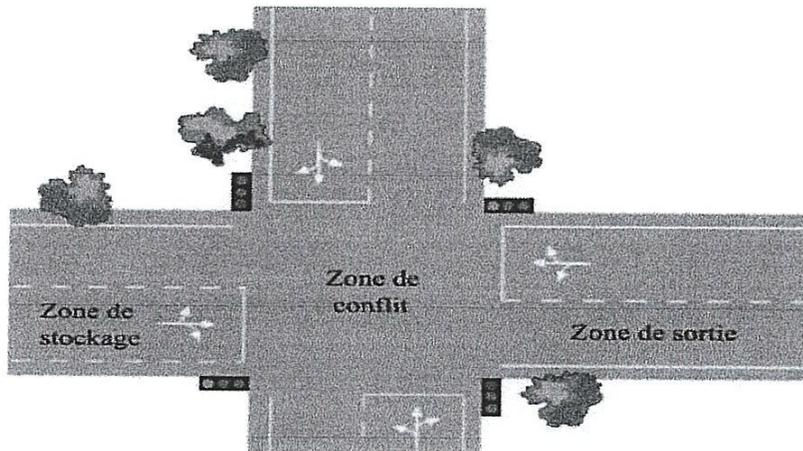


Figure 1.6 Illustration d'un carrefour isolé.

Un « mouvement » est défini par son origine et sa destination. Une voie n'est pas allouée à chaque type de mouvement, mais ceux-ci sont au contraire regroupés en flux sur une même voie mixte. Un flux de véhicules est donc l'ensemble des mouvements des véhicules qui

proviennent d'une même branche d'accès à un carrefour et qui sont admis simultanément au moyen d'un même groupe de signaux.

Les indications des feux (vert, orange, rouge) se succèdent à l'intérieur d'un «cycle», défini comme étant la durée constante séparant deux passages successifs de l'ensemble des signaux par le même état. Le cycle est divisé en « phases », temps pendant lequel un ou plusieurs flux sont admis dans le carrefour. Une phase est dite spéciale quand elle a pour seul but de favoriser l'écoulement d'un mouvement tournant. Elle est dite saturée lorsqu'un véhicule au moins de cette phase est contraint d'attendre plus d'un cycle pour franchir le carrefour. Le carrefour est lui-même saturé quand au moins une de ses phases est saturée.

4-Régulation Des Carrefours Avec Véhicules Autonomes Dans Le Cadre D'un Système De Transport Intelligent :

Afin de suppléer les insuffisances des méthodes précédentes, beaucoup de nouvelles stratégies ont été proposées au cours de la dernière décennie. En particulier, le « Système de Transport intelligent (STI) » (en anglais « Intelligent Transportation System, ITS ») ont attiré une attention considérable surtout avec des le progrès significatif réalisé dans le domaine des technologies informatiques et de télécommunication. Le STI intervient dans un contexte mondial de congestion du trafic routier d'une part et de développement des nouvelles technologies de l'information d'autre part, en particulier dans les domaines de la simulation, du contrôle en temps-réel et des réseaux de télécommunication. On les appelle « Intelligents » parce que leur développement repose sur des fonctions généralement associées à l'intelligence : capacités sensorielles, mémoire, communication, traitement de l'information et comportement adaptatif.

Dans le cadre de STI, de nombreuses nouvelles technologies sont développées afin de détecter et Contrôler les véhicules intelligents ainsi que les infrastructures. Par exemple, les communications sans fils inter-véhiculaires ou entre les véhicules et les infrastructures, les dispositifs embarqués équipant les véhicules, etc. Dans ce contexte, le monde de l'ingénierie et de la recherche s'est mobilisé pour la réalisation des véhicules et des carrefours autonomes. Ces méthodes sont aussi considérées comme la solution future de la régulation du trafic. L'étude des carrefours autonomes remonte au problème du changement des véhicules entre les différentes voies et de l'insertion des véhicules en sécurité dans l'autoroute avec les communications inter-véhiculaires. La différence la plus importante entre la stratégie des carrefours/véhicules autonomes et la méthode traditionnelle est que les véhicules autonomes peuvent être considérés individuellement à l'aide des technologies de communication. Cela

nous permet d'avoir l'état précis de chaque véhicule en temps réel, état qui peut être utilisé ensuite pour tout problème de régulation. Dans cette section, nous présentons les nouvelles technologies réalisées dans le domaine de STI et quelques nouvelles approches basées sur l'utilisation des véhicules /carrefours autonomes. [1]

5-Sécurité Et Environnement:

En voirie urbaine, les feux tricolores permettent de réguler les flux denses de véhicules rapides. Cependant, leur utilisation abusive peut nuire aux déplacements des non-motorisés et à la qualité de vie.

5.1 Avantages :

En bloquant le passage d'une partie des usagers entrants, les feux de signalisation permettent à ceux qui ont le feu vert de franchir en toute sécurité les intersections à la vitesse maximale autorisée. La synchronisation des feux sur un axe permet de créer des « ondes vertes » qui facilitent la traversée rapide de zones urbaines. Sur des axes rapides à fort trafic, ils facilitent et sécurisent l'insertion des véhicules provenant d'axes secondaires et la traversée des piétons.

À l'inverse, couplé à des détecteurs de vitesse, ils peuvent forcer un ralentissement important sur un axe à fort trafic de transit qui traverse une petite agglomération. Une autre utilisation, qui se rapproche des passages à niveau, est de donner la priorité à certains types de transports, comme les tramways ou les bus à haut niveau de service. Les feux tricolores sont particulièrement adaptés à la gestion du trafic dense et rapide engendré par les véhicules motorisés sur des axes importants en agglomération. Ils sont rarement pertinents en rase campagne ou dans les zones à trafic apaisé (zones de rencontre).

5.2 Inconvénients :

En-dehors des intersections à moment de trafic élevé, où ils régulent la circulation, les feux accélèrent le trafic en supprimant les obstacles potentiels. Cette accélération pénalise les piétons, qui ne peuvent traverser qu'aux passages piétons lorsque le feu piétons est vert, et les cyclistes si aucun itinéraire alternatif ne leur est proposé (bande ou piste cyclable, allée latérale, rue parallèle), car ils ne peuvent pas rouler à la vitesse du trafic motorisé et suivre les ondes vertes trop rapides. Les bus urbains sont aussi pénalisés par des ondes vertes inadaptées à leur vitesse moyenne du fait des arrêts. Déresponsabilisant les conducteurs, les feux peuvent entraîner des accidents graves lorsqu'ils ne sont pas respectés. De nombreux feux ne sont pertinents qu'à certaines heures de fort trafic, et leur fonctionnement n'est pas adapté à des heures de trafic faible, où ils obligent à un arrêt injustifié. La solution souvent retenue est

d'installer des détecteurs de véhicules pour actionner certains feux au débouché de branches secondaires ou à des heures de faible trafic, ou des boutons déclencheurs pour les piétons et, éventuellement, les cyclistes. Certains feux tricolores peuvent être donc sous arrêt momentané de quelques heures au maximum en cas circulation inactive.

Malgré le fait que les feux munis de LED consomment beaucoup moins d'énergie que ceux fonctionnant à incandescence, leur bilan énergétique est très mitigé. S'ils contribuaient à fluidifier le trafic à une allure modérée, les feux pourraient réduire la consommation d'énergie et la pollution automobile. Mais ils ne jouent ce rôle que pour une densité de trafic bien précise et avec un réglage adéquat. En réalité, ils ont tendance à encourager les conducteurs à accélérer fréquemment, ce qui consomme le plus d'énergie en circulation urbaine. D'après des enquêtes de l'organisation de mobilité belge Touring, les feux de circulation sont responsables de la moitié des files et donc de la moitié de la pollution, et des feux mal réglés peuvent tripler les émissions de CO₂ aux carrefours urbains lorsque la circulation est peu fluide.

6-Conclusion :

La régulation du trafic routier est devenue une branche d'étude à part entière après que le premier feu de signalisation ne soit fixé. Il est important que la sécurité et l'efficacité de la circulation soient assurées. Toutefois, depuis le début du 21ème siècle, le phénomène de la congestion ne cesse d'accroître. D'une part, parce que le nombre de véhicules augmente fortement ; d'autre part, parce que les infrastructures

De transports arrivent à leurs limites de capacité. La construction d'infrastructures supplémentaires peut être considérée comme l'une des solutions pour le problème, mais cette option est non faisable en raison de préoccupations politiques et environnementales. Cela pousse les chercheurs à chercher d'autres stratégies afin d'améliorer la régulation du trafic routier. Avec le développement des technologies de télécommunications et des technologies de miniaturisations, des véhicules autonomes seront réalisés dans un futur proche. Le problème de régulation du trafic

Au carrefour peut être ainsi discrétisé. Autrement dit, il sera possible de recueillir les informations de chaque véhicule (vitesse, temps d'arrivée au carrefour...). Comme la sécurité des véhicules autonome sa bien été étudiée, l'efficacité et le contrôle de ces véhicules autonomes méritent encore plus l'attention des chercheurs.

En fait, le caractère discret du problème de régulation dans les carrefours à véhicules autonomes nous amène à un problème d'optimisation de passage de véhicules qui peut être

transformé en un problème d'optimisation combinatoire. Cela nous donne d'autres possibilités pour améliorer la situation du trafic de manière beaucoup plus efficace. Dans le chapitre suivant, nous allons modéliser mathématiquement le problème de régulation du trafic au niveau d'un carrefour isolé. La complexité du problème sera étudiée. Nous allons prouver que ce problème est NP-hard. Afin de simplifier la recherche d'une séquence de passage, nous étudierons les propriétés structurales des solutions optimales. Des algorithmes efficaces seront ainsi proposés pour trouver une solution optimale.

Chapitre II

Les Réseaux De Pétri

1- Introduction:

Les réseaux de Pétri constituent un outil graphique et mathématique qui permet de simuler et modéliser des systèmes dans lesquels la notion d'événements et d'évolution sont importants.

Ces réseaux présentent des caractéristiques intéressantes telles que la modélisation et la visualisation de comportements parallèles, de la synchronisation et partage de ressources. De plus leurs aspects théoriques ont été largement étudiés et les résultats théoriques les concernant sont très abondant.

C'est Carl Adam Pétri qui a inventé ce formalisme en 1962.

A départ, il s'agissait essentiellement de représenter le système d'événements discrets. Seuls les systèmes qui changeaient de manière discrète pouvaient être représenté dans le cadre des réseaux de Pétri. Puis, beaucoup d'extensions ont vu les jours. Certaines sont vraiment dédiées à la modélisation de système biologique. Par exemple, on peut citer les **réseaux de Pétri hybrides fonctionnels**, qui sont permettent de simuler l'évolution de systèmes dans lequel certaines variables évoluent de manière discrète, d'autres de manière continue, et dont les taux de variations sont fonction des variables du système. Ce type de représentation a un pouvoir d'expression très important.

Malheureusement, l'envers de la médaille est de ne pas pouvoir prouver des propriétés satisfaites par ce type de modèles. C'est pour cela, que l'on va se focaliser dans un premier temps sur les réseaux de Pétri.

L'avantage des réseaux de Pétri est d'une part de se baser sur des fondations mathématiques fortes, et d'autre part de prendre en compte la concurrence. De plus un grand nombre de logiciels permettent de simuler et d'analyser les Réseaux de Pétri. Les différents outils conviviaux sont souvent dédiés à des extensions temporelles des réseaux de Pétri. On pourra par exemple se référer à WoPeD, à PNSim ou à Tina.

C'est un outil de modélisation utilise généralement en phase préliminaire de conception de système pour leur spécification fonctionnelle, modélisation et évaluation.

- Les principaux utilisateurs de ces réseaux sont les informaticiens et les automaticiens. Cependant c'est un outil assez général pour modéliser des phénomènes très varies. Il permet notamment:
- La modification des Systems informatiques,
- L'évaluation des performances des systèmes discrets, des interfaces homme-machine,
- La commande des ateliers de fabrication,

- La conception de systèmes temps réel
- La modélisation des protocoles de communication,
- La modélisation des chaînes de production (de fabrication). En fait, tout système dans lequel circule objets et information.

Les atouts des Rdp :

- Ils permettent de décrire de manière précise mais non formelle la structure d'un système,
- Ils offrent un support graphique de conception,
- Ils permettent de d'écrire un système étape par étape, en décomposant en éléments plus simples les éléments constitutifs initiaux du système,
- Ils permettent de d'écrire à l'aide d'un même support de base, à la fois la structure et la dynamique d'un système,
- Ils permettent de passer d'une description graphique d'un système a une description formelle permettant l'analyse mathématique du système (cohérence).[4]

2-Notion De Graphe Orienté :

Un graphe orienté comporte :

- **un ensemble fini de places**, $P = \{P1, P2, P3, \dots, Pm\}$, symbolisées par des cercles et représentant des conditions qui traduit l'état d'une ressource du système (machine libre, stock vide, convoyeur à l'arrêt, ...)
- **un ensemble fini de transitions**, $T = \{T1, T2, T3, \dots, Tn\}$, symbolisées par des tirets et représentant l'ensemble des événements (les actions se déroulant dans le système) dont l'occurrence provoque la modification de l'état du système
- **un ensemble fini d'arcs** orientés qui assurent la liaison d'une place vers une transition ou d'une transition vers une place

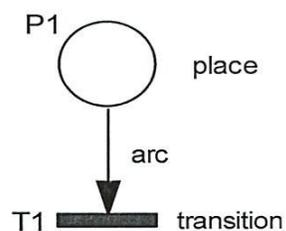


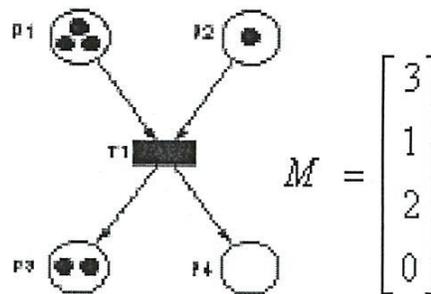
Figure 2.1: Un réseau de Pétri

- Un graphe orienté est dit biparti, c'est-à-dire qu'un arc relie alternativement une place à une transition et une transition à une place. ainsi les situations suivantes sont interdites.

2.1. Marquage :

Chaque place contient un nombre entier positif ou nul de marques ou jetons. Le marquage M définit l'état du système décrit par le réseau à un instant donné. C'est un vecteur colonne de dimension le nombre de places dans le réseau. L'élément du vecteur correspond au nombre de jetons contenus dans la place P_i .

Exemple: marquage

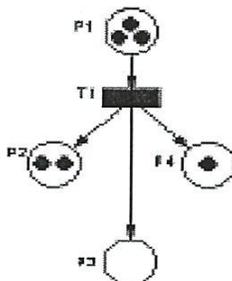


2.2. Franchissement d'une transition:

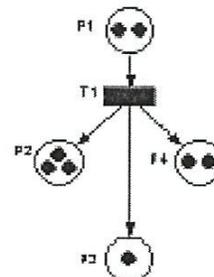
- Une transition est franchissable lorsque toutes les places qui lui sont en amont (ou toutes les places d'entrée de la transition) contiennent au moins un jeton.

Exemple: franchissement

Avant franchissement



Après franchissement



- Le franchissement de T_1 consiste à enlever un jeton de P_1 et à ajouter un jeton à chacune des places P_2 , P_3 et P_4
 - Une transition franchissable n'est pas forcément immédiatement franchie.
- Une transition sans place d'entrée est toujours franchissable : c'est une transition source.

2.3. Equation fondamental ou équation d'état:

- Soit S une séquence de franchissement réalisable à partir d'un marquage M_i : $M_i [S > M_k$
- Soit S le vecteur caractéristique de la séquence S : c'est un vecteur de dimension m égale au nombre

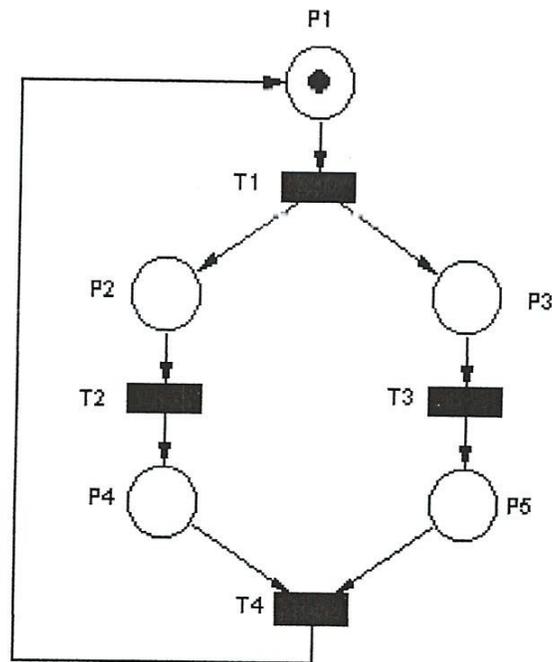
De transitions dans le réseau. Sa composante numéro j correspond au nombre de fois où la transition est franchie dans la séquence S.

Exemple si $S=T_2T_4T_1T_4T_2T_4$ alors $S=[1, 2, 0, 3] T$

- Si la séquence de franchissement S est tel que $M_i [S > M_k$ alors l'équation fondamentale correspondante s'écrit :

$$M = M_0 + W * \bar{S}$$

Example: equation fundamental



Soit la séquence $S= T_1T_2$ donc $S = [1, 1, 0, 0] T$

La matrice d'incidence Avant la matrice d'incidence arrière la matrice d'incidence

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

L'équation fondamentale correspondante à cette séquence est :

$$M = M_0 + W * \bar{S}$$

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

[6]

3- L'étape De Modélisation :

L'étape de modélisation est une phase essentielle pour étudiée le système a modélisé. Différents points doivent être abordés :

- Définir l'objectif de la modélisation (lié au cahier des charges) : Pourquoi modélise-t-on ? Qu'étudie-t-on ? Que veut-on améliorer, ou faire ?
- Définir les éléments du système (via la réalisation d'une fonction, ou d'un processus) et les limites du système (les entrées, les sorties).
- Définir les interactions entre ces éléments (hiérarchie).
- Définir la dynamique du système (entités qui circulent entre les éléments, comportement du système au cours du temps).
- Abstraction (choisir les éléments du système pertinents pour l'étude).

- Formalisation, conceptualisation : Modèle mathématique (algèbre (max, +), chaînes de Markov), modèle logiciel (Simulink, Siman-Arena, status), modèle graphique (**réseaux de Pétri**, bond graphs).

4- Outils De Modélisation :

Les systèmes de production font partie des systèmes (dynamiques) à événements discrets, et une partie à événements continue.

Parmi les modèles utilisés pour l'étude de ces systèmes, il y a :

- Les réseaux de files d'attente → évaluation analytique de performances,
- Les réseaux de Pétri → analyse des propriétés, évaluation de performances, simulation,
- Les modèles (et programmes) de simulation.

De façon générale, un modèle est composé :

- De variables,
- D'objets (centres de services, clients, ressources) caractérisés par des attributs :
 - **Fixes** (i.e., dont la valeur ne change pas au cours du temps, exemple : Type de pièce),
 - **Variables** (i.e., dont la valeur change au cours du temps, exemple : Occupation d'une machine),
- Des relations entre ces objets (services effectués au cours du temps).

5- Modélisation Par Réseau De Pétri :

Les réseaux de Pétri est un outil graphique de modélisation et d'analyse des systèmes parfaitement adapté à l'étude des structures de contrôle. Il permet notamment de maîtriser et d'assurer la sûreté de fonctionnement de logiciels complexes (aéronautique, transports, industrie...). Cet ouvrage présente les différentes techniques de modélisation en se référant aux nombreux concepts spécifiques des systèmes de contrôles (parallélisme, précédente, communication, partage de ressources, causalité...). Les différents modèles sont décrits en détail, du modèle de base à quelques-unes de ses extensions temporelles. Les diverses possibilités d'analyses offertes seront également étudiées. La première partie de l'ouvrage introduit le modèle de base places/transitions, et la seconde traite de quelques extensions du modèle initial pour traiter des problèmes liés aux applications de contrôle des procédés.

Lorsqu'un système est modélisé par un réseau de Pétri, on adopte un certain nombre de conventions qui font correspondre les places, les transitions et les jetons aux fonctions et aux conditions du système. Cette correspondance fait évidemment intervenir une part d'arbitraire, et c'est la raison pour laquelle il existe de nombreuses façons différentes de modéliser un système par réseaux de Pétri. Ces variantes sont d'ailleurs justifiées par la nécessité d'arriver pour chaque problème à une représentation qui soit à la fois simple et fidèle.

La méthode de modélisation la plus simple et la plus naturelle consiste à associer :

- les places aux actions (ou sorties) du système,
- les transitions aux conditions (entrées) et/ou aux actions en exploitant les conditions normales de sensibilisation des transitions.
- les jetons aux conditions et/ou actions du système.

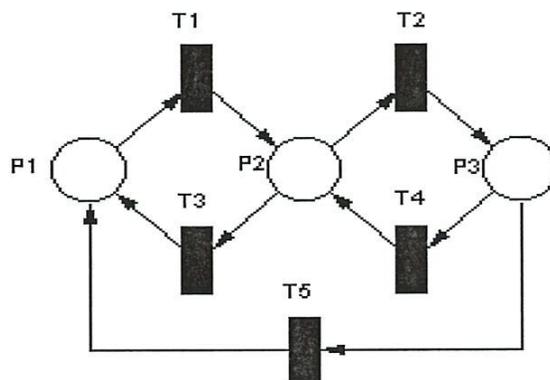
Compte tenu des propriétés des réseaux de Pétri, où le franchissement des transitions est supposé instantané, il est naturel de n'associer celles-ci que des actions de courtes durées. On aboutit ainsi à un réseau de Pétri étiqueté, dans lequel chaque étiquette spécifie un état ou une action, mais sans qu'il y ait de conditions extérieures imposées pour le franchissement des transitions.

6- Rdp Particuliers :

6.1. Graphe d'état :

Un réseau de Pétri non marqué est un graphe d'état si et seulement si toute transition a exactement une seule place d'entrée et une seule place de sortie.

Exemple 1: graph d'état

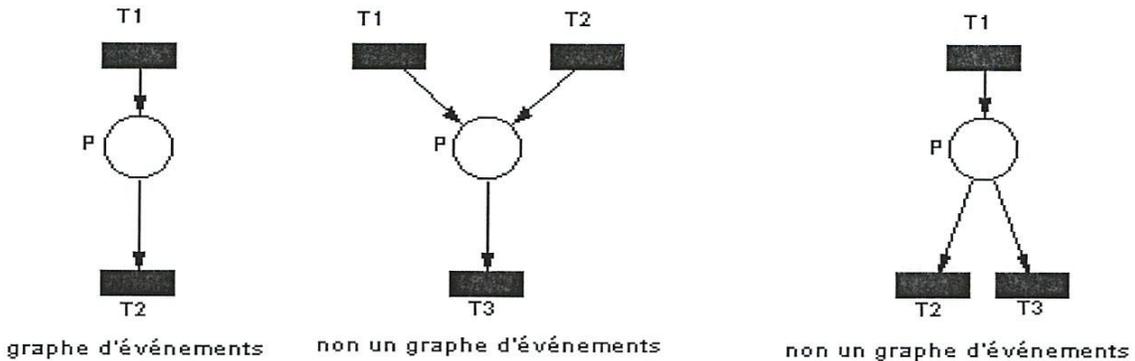


Chacune des transitions T1, T2, T3, T4 et T5 possède une seule place d'entrée et une seule place de sortie.

6.2. Graphe d'événement :

Un Rdp est un graphe d'événement si et seulement si chaque place possède exactement une seule transition d'entrée et une seule transition de sortie.

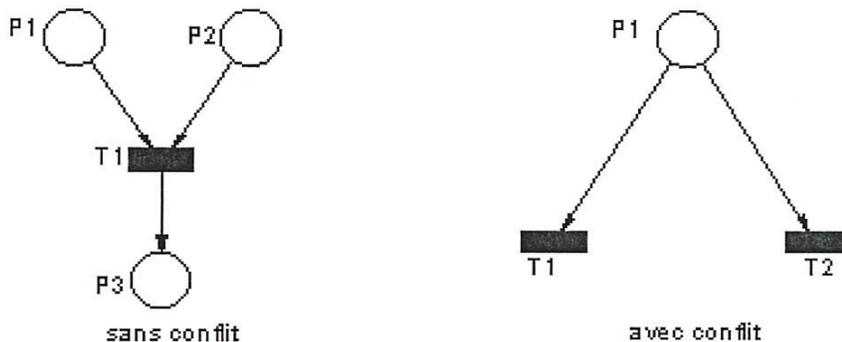
Exemple 2: graph d'événement



6.3. RdP sans conflit:

- Un Rdp sans conflit est un réseau dans lequel chaque place a au plus une transition de sortie.
- Un Rdp avec conflit est un réseau qui possède donc une place avec au moins deux transitions des orties. Un conflit est noté: $[P_i, \{T_1, T_2, \dots, T_n\}]$; avec T_1, T_2, \dots, T_n étant les transitions de sorties de la place P_i .

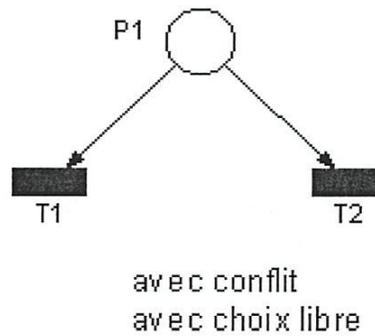
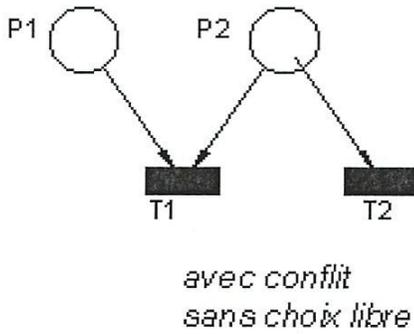
Exemple 3: RdP sans conflit



6.4. RdP à choix libre :

Un Rdp est à choix libre est un réseau dans lequel pour tout conflit $[P_i, \{T_1, T_2, \dots, T_n\}]$ aucune des transitions T_1, T_2, \dots, T_n ne possède aucune autre place d'entrée que P_i

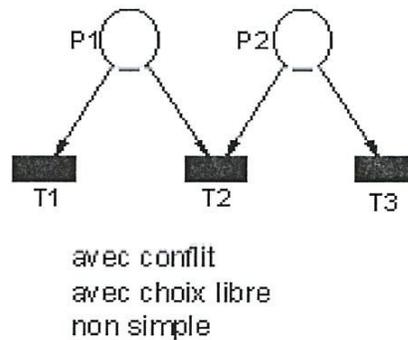
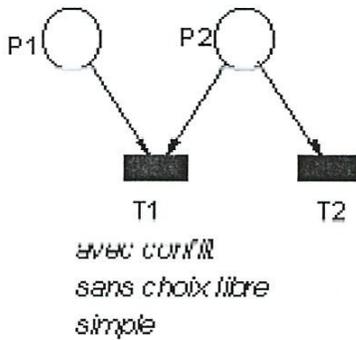
Exemple 4: Rdp à choix libre



6.5. Rdp simple :

Un Réseau de Pétri simple est un Rdp dans lequel chaque transition ne peut être concernée que par un conflit au plus.

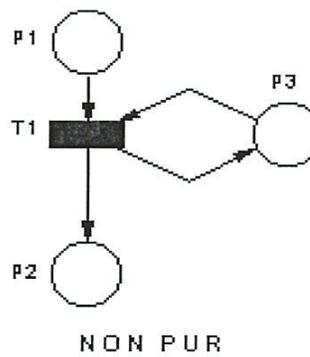
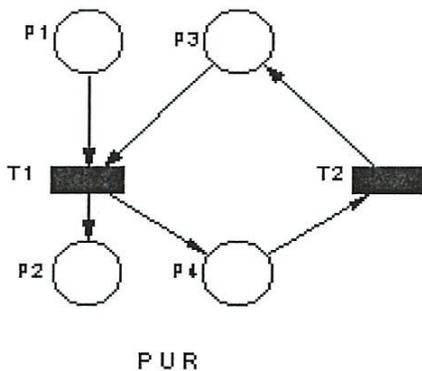
Exemple 5: Rdp simple



6.6. Rdp pur :

Un Rdp pur est un réseau dans lequel il n'existe pas de transition ayant une place d'entrée qui soit à la fois place de sortie de cette transition.

Exemple 6: Rdp pur

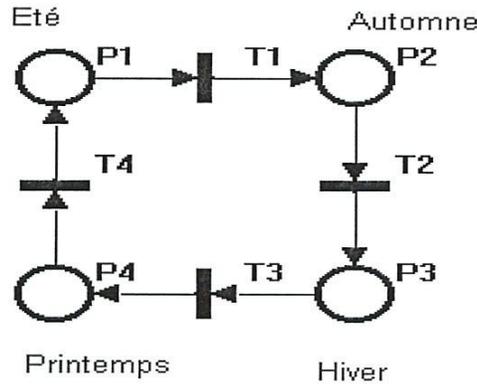


[6]

7- Classification Des Réseaux De Pétri:

7.1 Rdp autonome:

• Un Rdp autonome décrit le fonctionnement d'un système dont les instants de franchissement ne sont pas connus ou indiqués.



7.1.1 Réseau de Pétri generalise:

• Un Rdp généralisé est un Rdp dans lequel des poids (nombres entiers strictement positifs) sont associés aux arcs.

• Si un arc (P_i, T_j) a un poids k : la transition T_j n'est franchie que si la place P_i possède au moins k jetons. Le franchissement consiste à retirer k jetons de la place P_i .

• Si un arc (T_j, P_i) a un poids k : le franchissement de la transition rajoute k jetons à la place P_i .

• Lorsque le poids n'est pas signalé, il est égal à un par défaut.

7.1.2. RdP à capacités:

• Un Rdp à capacités est un Rdp dans lequel des capacités (nombres entiers strictement positifs) sont associées aux places. Le franchissement d'une transition d'entrée d'une place P_i dont la capacité est $cap(P_i)$ n'est possible que si le franchissement ne conduit pas à un nombre de jetons dans P_i qui est plus grand que $Cap(P_i)$.

7.1.3. Rdp à priorités:

Dans un tel réseau si on atteint un marquage tel que plusieurs transitions sont franchissables, on doit franchir la transition qui a la plus grande priorité.

7.1.4. Réseau de Pétri ordinaire:

Un Réseau de Pétri ordinaire est un réseau dont les poids des arcs sont tous égaux à 1.

7.1.5. Réseau conforme:

Un réseau de Pétri vivant et sauf est dit conforme: 1 jeton, sans blocage

7.1.6. Réseau de Pétri interprété:

On appelle un Rdp interprété un réseau tel que :

- les événements (entrées) sont associés aux transitions T_i
- les conditions (actions, sorties) sont associées aux places P_i
- les états sont associés aux marquages M_i

Tir de la transition si:

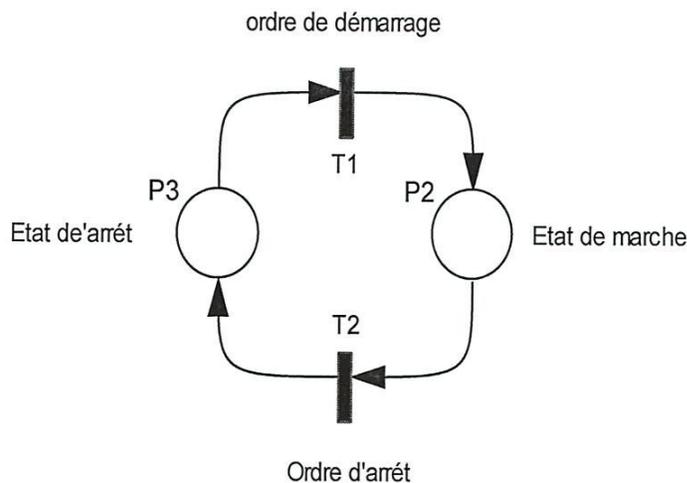
1. transition sensibilisée
2. prédicat sur des entrées soit vrai

7.1.7. Réseau de Pétri coloré

Dans chaque place, on n'a plus des jetons indifférenciés mais des jetons colorés : on les compte par couleur dans un multi-ensemble.

7.2. Réseaux de Pétri non autonomes :

Un Rdp non autonome décrit le fonctionnement d'un système dont l'évolution est conditionnée par des événements externes ou par le temps. Un Rdp non autonome est synchronisé et/ou temporisé.



Réseaux de petri non autonome

7.2.1. Réseau de Pétri Synchronisé :

Un Réseau de Pétri Synchronisé (RdPS) est un réseau de Pétri auquel on a associé un ensemble d'événements externes associés à ces transitions.

7.2.2. Réseau de Pétri Temporisé :

Un réseau de Pétri Temporisé (RdPT) permet de décrire un système dont le fonctionnement dépend du temps.

7.2.3. Réseau de Pétri Continue :

Un réseau de pétri continu est un modèle dans lequel les nombres de marques dans les places sont des nombres réels. Ce modèle peut être introduit en considérant que le franchissement d'une transition se fait de façon continue avec une certaine vitesse. Il s'apparente aux réseaux de Pétri temporisés sur les transitions.

8- Conclusion:

L'intérêt des réseaux de Pétri dans la modélisation des systèmes de production et, plus généralement, des systèmes continus, discontinus ou discrets n'est plus à démontrer. Vieux d'un quart de siècle, cet outil graphique a conquis les laboratoires d'automatique ; il lui reste à pénétrer plus profondément le monde industriel. Dans ce chapitre on a rappelé des quelque notion de base concernant les Rdp, ensuit les règles d'évolution et leur extension, principe de modélisation.

Chapitre III

Systeme Dynamique Hybride

1-Introduction :

Les systèmes dynamiques sont généralement continus ou discrets ou les deux à la fois. Les Systèmes Dynamiques Continus (SDC) ont des variables qui ont un comportement continu dans le temps (tension, courant, vitesse, couple....). Ils sont souvent modélisés par des équations différentielles ou équations d'états ou fonctions de transferts. Les systèmes basés sur les principes de la physique sont des systèmes dynamiques continus.

Pour les Systèmes Dynamique Discrets (SDD), l'espace des variables des sorties est un ensemble discret de valeur booléenne (états ouverture / fermeture d'un interrupteur, nombre d'interrupteurs ouverts/fermés simultanés dans un convertisseur statique, nombre d'impulsions pour la commande des interrupteurs). Les modèles classiques utilisés pour les SDD sont: les réseaux de Pétri, les automates, les réseaux de file d'attente et le Grafset.

Les systèmes incluant les deux caractéristiques continues et discrètes sont appelés les Systèmes Dynamiques Hybrides. Sous une forme très simplifiée, un SDH comporte deux sous ensembles, un bloc continu, un bloc discret :

- le bloc continu symbolise l'évolution dynamique de l'état continu.
- le bloc discret présente le système à événement discret il reçoit des événements internes, externes et condition.

Tout procédé comprend ces deux caractéristiques, c'est l'utilisateur en fonction de son point de vue qui opère un choix. Donc il existe divers modèles de même procédé correspondant à divers systèmes. Si les techniques de modélisation des systèmes continus et discrets sont connues. Pour les systèmes dynamiques hybrides un outil unifié de modélisation est nécessaire pour:

- Comprendre et assurer la consistance de l'interaction des deux parties, continue et discrète du système hybride.
- Aider à la conception, à la surveillance et au développement de la commande;
- Simplifier la simulation et mener des analyses formelles plus précises.

2- Les Réseaux De Pétri :

Les réseaux de Pétri sont un outil bien adapté pour modéliser les systèmes à événements discrets, car il possède deux caractéristiques importantes. D'abord, de nature graphique, il permet de modéliser et d'analyser les primitives de comportement telles que la synchronisation, le parallélisme, le partage de ressources etc. Puis, sur les modèles obtenus, on peut aisément effectuer une analyse qualitative lorsque l'on considère le modèle autonome,

et une analyse quantitative lorsque le temps lui est adjoint (David et al.1992).

Dans un premier instant, les Réseaux de Pétri ont été largement utilisés pour modéliser les systèmes discrets (systèmes de calcul, de production, de communication etc.), car le marquage d'une place peut correspondre, soit à l'état booléen d'un dispositif (par exemple, Une ressource est disponible ou pas), soit à un nombre entier (par exemple le nombre de pièces dans un stock).

2.1 Les Réseaux de Pétri Discrets:

Un réseau de Pétri est un graphe biparti fait de deux types de sommets : les places et les transitions. Des arcs orientés relient certaines places à certaines transitions, Ou certaines transitions à certaines places. Un arc ne relie jamais deux sommets de même nature. Généralement, les places sont représentées par des cercles et les transitions par des rectangles (ou des barres). Chaque place peut contenir un ou plusieurs jetons, représentés par des points, qui vont permettre de modéliser la dynamique du système, (Figure 3.1). Dans un Réseau de Pétri, le marquage d'une place comparable à une variable booléenne peut correspondre à l'état d'un appareil, par exemple une machine est disponible ou n'est pas disponible. Un marquage peut également être associé à un nombre entier, par exemple le nombre de pièces dans le stock d'entrée d'une machine.

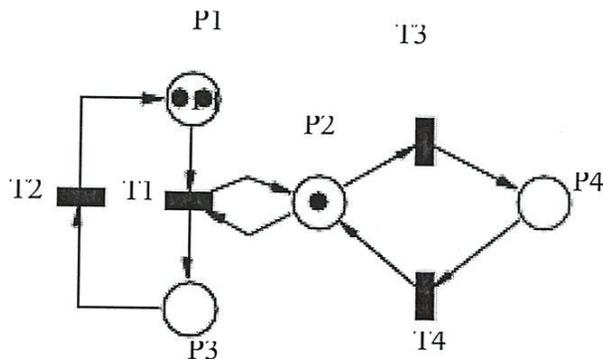


Figure 3.1 Exemple d'un Réseau de Pétri discret

De manière plus formelle, un Réseau de Pétri est un couple $PN = (P, T, A, W, \mathbf{M0})$, où

$P = \{P1, P2, \dots, Pn\}$ est un ensemble fini de places,

$T = \{T1, T2, \dots, Tq\}$ est un ensemble fini de transitions,

la fonction poids des arcs et $\mathbf{M0} : P = \{0, 1, 2, \dots\}$ est le marquage initial du réseau.

Une méthode générale d'analyse pour ces types des réseaux (places – transitions) consiste à déterminer tous les états atteignables et à en déduire diverses propriétés

Du système. Ainsi, un marquage M atteint à partir de M_0 par franchissement d'une séquence S peut être obtenu en utilisant la relation fondamentale :

$$M = M_0 + U \cdot s$$

Avec :

U : la matrice d'incidence du réseau ;

s : le vecteur caractéristique de la séquence S .

De plus, les Réseaux de Pétri temporisés sont bien adaptés pour évaluer quantitativement un système. Cependant un modèle peut contenir un grand nombre de marques ou bien on peut trouver des durées n'ayant pas le même ordre de grandeur. Par exemple, le temps de production d'une pièce est en général beaucoup plus court que le temps moyen entre deux pannes d'une machine. Dans ce cas le nombre d'états accessibles explose. Ce phénomène constitue une limite pratique à l'utilisation des réseaux discrets. L'utilisation des modèles continus pour étudier des systèmes à événements discrets peut constituer une bonne approximation.

2.2 Les Réseaux de Pétri Continus:

Le Réseau de Pétri continu défini comme un cas limite de réseau discret - est un modèle dans lequel les nombres de marques dans les places sont des nombres réels.

Ce modèle qui s'apparente aux Réseaux de Pétri temporisés sur les transitions a été introduit en considérant que le franchissement d'une transition se fait de façon continue avec une certaine vitesse $v(t)$, (Figure 3.2).

Cela signifie qu'entre l'instant t et l'instant $t+dt$, une quantité de marque $v dt$ est retirée aux places en amont de la transition et une quantité de marques $v dt$ est ajoutée aux places en aval de cette transition (cas des réseaux ordinaires).

Le marquage initial indiqué est aussi (2, 1, 0, 0), mais dans ce cas les marques sont des nombres réels et non plus des entiers, (Figure 3.2).

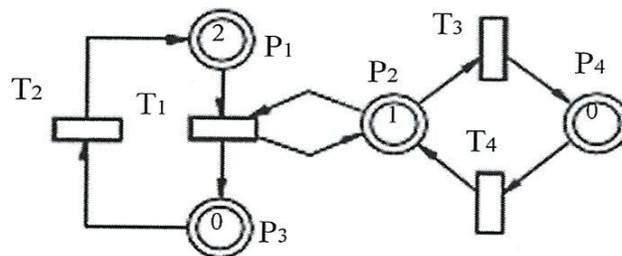


Figure 3.2 Exemple d'un Réseau de Pétri continu

Dans cet état les transitions $T1$ et $T3$ sont validées, c'est à dire franchissables, puisque les marquages de leurs places d'entrée ne sont pas nuls. Par exemple, la transition $T1$ peut être franchie mais on ne peut maintenant avoir une quantité de franchissement qui est un nombre réel compris dans l'intervalle continu $[0, 1]$; la valeur maximale 1 dans ce cas correspond à $m2$ (qui est le minimum de $m1$ et $m2$). Pour une quantité de franchissement 0.2 on atteint le marquage $(1.8, 1, 0.2, 0)$.

Dans un Réseau de Pétri continu, une séquence de franchissements S à partir d'un marquage M implique une trajectoire correspondant à une suite de marquages successifs.

Le vecteur caractéristique s d'une trajectoire est un vecteur dans lequel chaque composante est un nombre réel correspondant à une quantité de franchissements de la transition correspondante. Donc, la relation fondamentale pour un réseau de Pétri continu est identique à la relation fondamentale pour un réseau discret. Donc, toute propriété des réseaux discrets basée sur cette relation peut être transposée aux réseaux continus.

2.3 Les Réseaux de Pétri Hybrides;

Les réseaux continus constituent une bonne approximation lorsqu'il s'agit de modéliser un flux de pièces – par exemple. Cependant l'état opérationnel ou en panne d'une machine, ou en règle générale toute condition booléenne ne peut être modélisée par un nombre réel. Ceci a conduit naturellement à définir les réseaux hybrides, réunissant une partie discrète et une partie continue. Ainsi, dans un réseau hybride, on retrouve des places et des transitions discrètes (représentées en simple ligne) et des places et des transitions continues (représentées en double ligne), avec une influence mutuelle des parties discrètes et continues, (Figure 3.3).

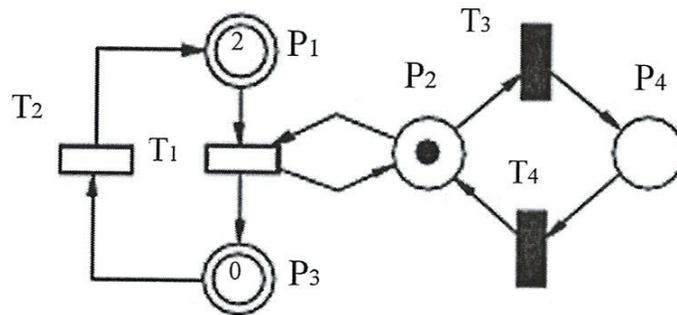


Figure 3.3 Exemple d'un Réseau de Pétri hybride

Les places continues sont $P1$ et $P3$, les transitions continues sont $T1$ et $T2$, les places discrètes $P2$ et $P4$, et les transitions discrètes $T3$ et $T4$. Les transitions $T1$ et $T3$ sont

validées, donc franchissables. Alors, si la transition continue $T1$ sera franchie avec une vitesse constante, pour une quantité de franchissement 0.1 on obtient le marquage (1.9, 1, 0.1, 0). On a retiré donc une quantité de marquage 0.1 de $P1$ et $P2$ qui sont les places d'entrée, et l'on a ajouté la même quantité à $P3$ et $P2$ qui sont les places de sortie. On voit que le marquage de la place discrète $P2$ est encore un entier, puisque l'on a retiré et ajouté la même quantité. [7]

3- Structure D'un Système Hybride :

Un SDH est un système dynamique composé de l'interaction d'une partie événementielle et d'une partie continue. Les deux composantes, continue et discrète, sont interconnectées avec une loi qui orchestre cette interconnexion voir (figure 3.4)

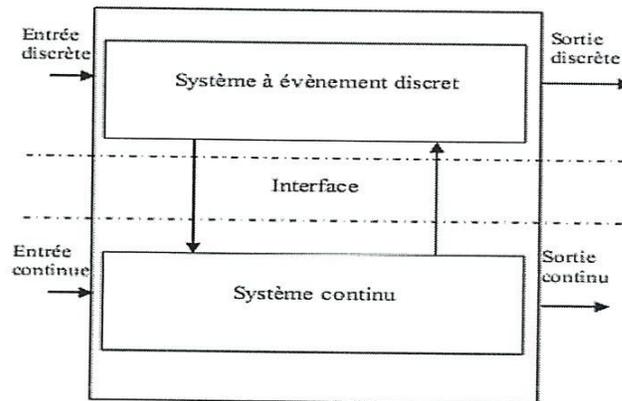


Figure 3.4 Structure d'un système hybride

- La partie « Système à Evénements Discrets » (SED) représente l'état discret du SDH. Son évolution est gouvernée par l'occurrence d'événements tels que l'opération d'usinage sur une pièce, l'instruction traitée par un processeur, un interrupteur ouvert ou fermé D'habitude, les SED sont classiquement représentés par l'algèbre de Boole combinée à des formalismes états transitions décrits par les modèles usuels tels que les automates à états finis
- La partie continue symbolise l'environnement physique dans lequel évolue le système. Elle est constituée d'une infinité de valeurs décrivant le comportement d'un phénomène physique tel que la température d'une pièce ou d'un objet, la vitesse d'un mobile, le niveau dans un réservoir..... L'étude de ces systèmes fait appel à des outils mathématiques capables de représenter la dynamique continue: équations différentielles, inclusions différentielles, méthodes d'état à forme matricielle....

- L'interface ou bien l'interaction exprime la relation liant la partie discrète à la partie continue et vice versa. Le rôle de cette partie est de fournir des informations à la partie discrète respectivement à la partie continue sur l'évolution continue ou discrète. Sous l'effet d'un événement interne ou bien d'un événement externe, le système peut changer de configuration ou de mode.

De ce fait, les interactions entre les deux modèles se font par l'intermédiaire des événements. Au niveau de la partie discrète, un événement correspond à un franchissement de transition. Alors qu'au niveau des systèmes continus, il s'agit d'un dépassement de seuil d'une variable continue. Une transition d'un mode vers un autre mode a lieu lorsque certaines conditions logiques sont vérifiées.

4- Les Automates Hybrides :

Un automate hybride est un automate à états finis qui a été étendu par des variables continues. Dans chaque sommet discret, la dynamique des variables continues est définie par des équations différentielles. Et les transitions entre les états discrets dépendent des valeurs des variables continues. Nous commençons dans la suite par définir les automates à états finis. C'est partir de ce formalisme que les automates hybrides ont été définis.

Ainsi, l'état global d'un automate hybride, à un instant donné, est défini par une paire (q, X) ; q représentant la situation (état discret) et X la valeur du vecteur d'état (au sens du continu). Cet état global se modifie pour deux raisons :

- le franchissement d'une transition discrète, qui change brusquement la situation et souvent alors l'évolution de l'état continu, voire directement la valeur de cet état (saut). Ce franchissement se produit sur occurrence d'un événement approprié et/ou si une condition devient vraie ;

- l'évolution temporelle qui affecte X suivant l'équation différentielle associée à la situation courante. Cette situation reste inchangée.

L'avantage de cette représentation est sa simplicité. Décrivant sans ambiguïté les évolutions possibles d'un système hybride, elle sera à la base de l'analyse en vue d'établir des propriétés formelles. À chaque instant, un seul état discret est actif, donc il n'y a qu'un seul jeu d'équations (un seul modèle continu). Le caractère hybride se marque par le fait qu'un événement discret peut entraîner le changement d'état, donc la commutation du jeu d'équations, mais l'atteinte d'une valeur seuil sur une variable continue peut aussi entraîner un changement d'état discret.

5- Outil De Modélisation :

Le couplage d'un modèle en RdP avec une représentation d'activité continue à été étudié par plusieurs auteurs. Ont modifié la théorie de base en ajoutant de nouvelles places et de nouvelles transitions destinés à représenté l'évolution linéaire ou exponentielle d'une variable continue. L'objectif initial du RdP continu était de diminuer la taille des modèles classiques lorsque le nombre de jeton devenait trop important et déraisonner en termes de flux.

Ont étendu cette approche à des systèmes caractérisés par des phénomènes d'accumulation de pièces et régit par des lois de comportement des places dont les transitions sont contrôlées par le calcul d'une équation d'état.

Dans les travaux de Le Bail, Alla et David ils ont développé à partir des RdP continus les RdP hybrides.

Ces réseaux contiennent des places et des transitions discrètes (représentées graphiquement avec un contour simple) et continues (représentées avec un contour double). Ainsi, la partie continue permet de modéliser les flux continus et la partie discrète les fonctionnements logiques (vanne ouverte/fermée). Au niveau de l'interface continu/discret et afin de garantir que le marquage des places discrètes reste entier, tout arc connectant une place discrète et une transition continue doit avoir son arc réciproque.

L'outil de modélisation proposé est les Réseaux de Pétri Hybride temporisés (RdPHT).

Le Réseau de Pétri Hybride temporisés est une extension des réseaux Pétri qui intègre deux types de RdP:

- Un réseau de Pétri continu modélise l'évolution de l'état continu du SDH
- un réseau de Pétri temporisés modélise l'évolution de la variable discrète du SDH.

6- Surveillance Des Systèmes Hybrides :

La surveillance est un dispositif passif informationnel qui analyse l'état du système et fournit des indicateurs. La surveillance consiste notamment à détecter et classer en temps réel les défaillances en observant l'évolution du système, puis à les diagnostiquer en localisant les éléments défaillant et en identifiant les causes premières. De plus, la surveillance est habituellement complétée par un module de supervision décisionnel et opérationnel qui reconduit le système en fonction de la situation courante. La surveillance requiert une bonne connaissance de l'ensemble des évènements qui modifient l'évolution du système et leur date d'occurrence. La dépendance du temps est primordiale puisque dans la plupart des cas, le non-respect de ces dates est une alerte de défaillances. Les RdP continus et hybrides sont une

fois de plus privilégiés. Nous pourrions développer une méthodologie qui permet d'estimer les événements attendus, leur date d'occurrence ainsi que leur fréquence.

- La détection des défaillances peut être développée à l'aide des réseaux de neurones, par une comparaison entre le comportement des équipements surveillés et celui de leur modèle de référence. Pour la fonction diagnostic généralement basée sur l'évaluation des défaillances détectées, nous pensons à l'utilisation des systèmes à base de règles floues après modélisation des différentes classes de défaillances par les ensembles flous.

7- Conclusion :

La plupart des systèmes techniques sont des systèmes hybrides composés d'une partie continue et d'une partie discrète, qui agissent en permanence une sur l'autre. Pour les modéliser à l'aide des Réseaux de Pétri (RdP) il est nécessaire de trouver une configuration qui réponde en même temps au caractère continu qu'au caractère discret du système, bien que le nombre d'états atteignables soit fini et les événements externes qui pilotent le système sont asynchrones.

Chapitre IV

Modélisation Et Simulation D'un Réseau Du Trafic Urbain Par Automate Hybride

1-INTRODUCTION:

Un Système de Trafic Urbain (STU) est composé d'un réseau, de règles de fonctionnement, d'un système de gestion et de contrôle, et d'entités empruntant le réseau, la mise en place de stratégies de commande des feux de signalisation constitue l'épine dorsale de la gestion du trafic urbain. Ces stratégies reposent principalement sur l'estimation des temps d'attente et des longueurs des files d'attente aux intersections. Ces paramètres permettent d'évaluer la qualité de service des intersections à feux.

Le réseau est un ensemble d'axes de communications et d'intersections. Les entités (les véhicules) parcourent le système en respectant les règles de fonctionnement (code de la route). Le système de contrôle répercute sur le réseau les données fournies par le système de gestion, par le biais d'afficheurs (feux, panneaux). Le système de gestion décide de la politique de trafic à appliquer (en calculant et modifiant les plans de feux).

Le but principal d'un STU est de permettre aux usagers de parcourir le réseau en un temps raisonnable et avec un niveau de sécurité suffisant.

2- Les Approches:

Une étape essentielle pour la gestion du trafic est la modélisation de l'écoulement du trafic. Les différentes études menées pour cerner le phénomène du trafic ont conduit à définir des paramètres caractéristiques, des variables descriptives et des équations mathématiques reliant ces différentes variables et paramètres, établissant ainsi des modèles de trafic qui permettent de traduire le comportement de la circulation aux différents niveaux de détails sur une section de route considérée. Selon le niveau de détail avec lequel les phénomènes de circulation sont décrits, les modèles de trafic sont principalement classés en deux catégories: les modèles microscopiques et les modèles macroscopiques et mésoscopiques.

Les modèles microscopiques qui décrivent le comportement individuel de chaque véhicule. Dans la littérature scientifique il existe deux approches adéquates à la modélisation microscopique: les modèles *véhicule-suiveur*, et les modèles *de particules*,

Modèles macroscopiques considèrent la circulation comme un phénomène continu par analogie avec la mécanique des fluides dont l'objectif est de décrire le comportement dynamique global de la circulation, à travers des variables agrégées telles que le débit, la densité, et la vitesse du flot de véhicules. Ils sont basés sur deux théories principales : la

théorie de l'hydrodynamique et la théorie des files d'attente, Ainsi des modèles dérivés de la dynamique des fluides sont utilisés. La densité (ou concentration) ρ (en véhicules/mètre), le débit de trafic f (en véhicules/seconde) et la vitesse du flot V (en mètres/seconde) utilisés vérifient la relation fondamentale $f = \rho.V$

Les modèles mésoscopiques et l'hybridation des modèles se situent au niveau intermédiaire de détails entre les modèles microscopiques et macroscopiques. [10]

Le modèle d'écoulement du trafic cité auparavant considère seulement la partie continue. Évidemment, cela n'est pas suffisant pour décrire le comportement réel du trafic urbain puisque le trafic urbain se comporte comme un système dynamique hybride où la vitesse, la densité, la longueur de la file d'attente, le volume et la position des véhicules sont des variables continues, mais l'arrivée et le départ des véhicules, le dépassement, le changement des feux de circulation, sont des événements à états discrets .

La nature hybride des systèmes du trafic urbain fait appel a plusieurs outils de modélisation graphique tels que le *réseau de Pétri* et ses différentes représentations. Dans ce présent travail, nous étudions le phénomène de la file d'attente dans un réseau du trafic urbain tout en rapprochant son comportement à un système dynamique hybride dont l'objectif est de présenter un modèle à base d'*Automate Hybride* caractérisant son évolution réelle. Dans un premier lieu, nous décrivons la topologie d'un réseau du trafic urbain ensuite nous présentons le modèle macroscopique d'écoulement des flux du trafic dans une section de la route. Le modèle du trafic établi par l'automate hybride.

3-MODELISATION D'ÉCOULEMENT DU TRAFIC DANS LE RESEAU URBAIN:

Le réseau urbain est un ensemble de liens qui représentent les routes, les voies urbaines et les jonctions qui représentent les intersections et les carrefours. Notre travail s'intéresse aux liens urbains qui ne sont pas dues à la dynamique inhérente d'écoulement du trafic (comme liens sur l'autoroute), mais en raison de la commutation des feux de signalisation aux carrefours à feux.

Les modèles macroscopiques sont basés sur l'analogie avec la dynamique des fluides. Ces modèles assimilent le flux du trafic, supposé homogène et unidirectionnel, à un fluide dans un réservoir. La (figure 4.1) représente l'analogie entre les deux dynamiques.

La plupart des modèles macroscopiques du trafic développés sont issus de la théorie de l'hydrodynamique qui considère l'écoulement de la circulation comme un fluide

incompressible. Ces modèles assimilent le flux du trafic, supposé homogène et unidirectionnel, à un fluide dans un réservoir. La figure 1 représente l'analogie entre les deux dynamiques. Or, dans la réalité, on constate certaines différences entre la circulation des flots de véhicules et l'écoulement des fluides, notamment l'instabilité du trafic, la congestion et le phénomène "arrêt-départ". D'autre part, la circulation du trafic est caractérisée par un mélange de comportements : continu sur les autoroutes et discret au niveau des intersections à feux. Partant de ce constat, les chercheurs ont fait appel à des outils issus de la théorie des systèmes à événements discrets, entre autres les RdP . En effet, un RdP est connu comme étant un outil de modélisation graphique et mathématique permettant de révéler ainsi des caractéristiques importantes d'un système concernant sa structure et son comportement dynamique.

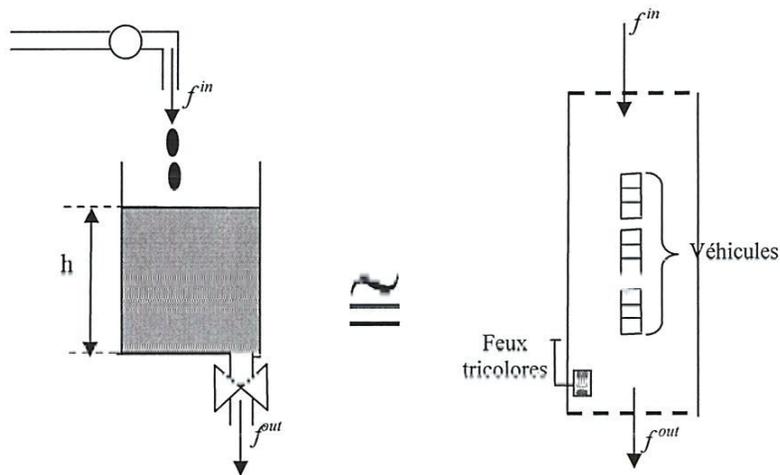


Figure 4.1 Analogie d'une section de la route avec un réservoir hydraulique

La modélisation de l'écoulement du trafic est réalisée le plus souvent à l'aide du modèle macroscopique du premier ordre qui s'articule principalement sur trois postulats de base :

- **Principe de continuité**

On considère le débit $f(x,t)$ et la densité $\rho(x,t)$ sont des fonctions continues, l'équation de la vitesse moyenne est

$$v(x,t) = \frac{f(x,t)}{\rho(x,t)} \quad (1)$$

La représentation continue ne prend pas en compte la dimension du véhicule.

• **Equation de conservation de la masse**

Le principe de conservation de la masse correspondant est défini comme suit, La variation du nombre de véhicules sur la section de route $[x_{j-1} \ x_j]$ est égale à la différence entre la masse entrante en x_{j-1} et la masse sortante en x_j dans l'intervalle de temps $[t_1, t_2]$.

$$\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial f(x,t)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

• **Diagramme fondamental**

Le diagramme fondamental est une relation phénoménologique qui relie le débit avec la densité.

$$f(x,t) = g(\rho(x,t)) \quad (3)$$

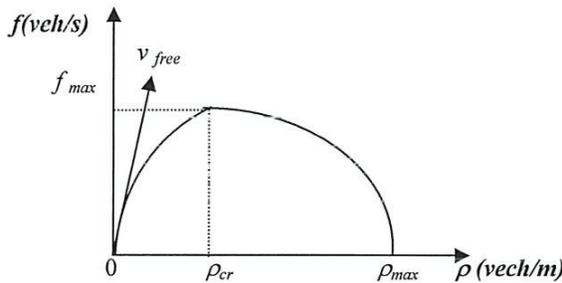


Figure 4.2. Diagramme fondamental dans le plan (ρ, f)

En effet, le diagramme fondamental de la (figure 4.2) est composé de deux parties décrivant l'état du trafic: la première partie correspond à l'état fluide tandis que la deuxième correspond à l'état congestionné. Parmi les relations algébriques les plus utilisées, notons celles données par les fonctions

$$g(\rho(x,t)) = v_{free} \cdot \rho(x,t) \cdot \left(1 - \left(\frac{\rho(x,t)}{\rho_{max}(x,t)} \right)^a \right)^b$$

$$g(\rho(x,t)) = v_{free} \cdot \rho(x,t) \cdot \exp \left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{\rho(x,t)}{\rho_{cr}(x,t)} \right) \quad (5)$$

Où a et b sont des constantes liées aux Modèles et à la géométrie de la route.

• **La discrétisation spatio-temporelle**

Vu les difficultés rencontrées lors de la résolution analytique du modèle de trafic du premier ordre de nombreux auteurs ont adopté la résolution numérique de ce modèle en effectuant une discrétisation spatio-temporelle. Cette discrétisation permet d'aboutir à un modèle constitué par des équations aux différences aisées à résoudre par des méthodes itératives.

• **Discrétisation spatiale**

La discrétisation spatiale consiste à subdiviser le lien urbain en segments appelé section, les variables macroscopiques dépendent seulement du temps permettant de décrire l'écoulement du trafic dans une section (figure 4.3).

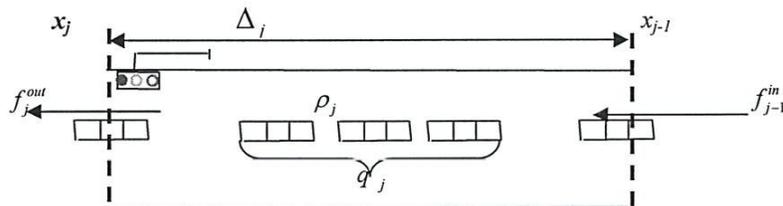


Figure 4.3 Section d'un lien urbain

$(\Delta_j) \quad j=1, \dots, m$ Longueur de la section $[x_{j-1}, x_j]$

$f_j^{in}(t)$ et $f_j^{out}(t) \quad j=1, \dots, m$ sont respectivement le début d'entrée et le début de sortie d'une section de route (qui représente le nombre de véhicules laissant la file d'attente à chaque fois)

$q_j(t) \quad j=1, \dots, m$ désigne la file d'attente des véhicules en attente pour le signal vert à chaque direction j entrant.

$\rho_j(t), v_{free}(t)$ La densité et la vitesse libre du trafic dans une section j

L'équation (2) discrétisée dans l'espace est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{d\rho_j(t)}{dt} + \frac{f_{j-1}^{in}(t) - f_j^{out}(t)}{\Delta_j} = 0 \tag{6}$$

La relation entre la file d'attente et la densité est définie par

$$\rho_j(t) = \frac{q_j(t)}{\Delta_j} \tag{7}$$

D'après (6) et (7), on aboutit à l'équation de la dynamique de la file d'attente exprimé par :

$$\dot{q}_j(t) = f_{j-1}^{in}(t) - f_j^{out}(t) \tag{8}. [12]$$

4. Modélisation Par Automate Hybride

4.1. Définition :

Un automate hybride se présente, fondamentalement, comme un automate à état fini avec des équations différentielles associées à ses états discrets. Ainsi, l'état global d'un automate hybride, à un instant donné, est défini par une paire (q, x) , q représentant la situation (état discret) et x le vecteur d'état (au sens du continu).

4.2. Exemple d'un automate à états finis le contrôle de feu de signalisation :

Les feux sont généralement déclinés à partir de deux couleurs de base : le rouge pour Stop, le vert (ou plus rarement le jaune) pour Go. Le feu jaune, en fait de couleur orange, est également utilisé et sert à signaler le passage du vert au rouge. Ces couleurs ont l'avantage d'être très différentes :

- | | |
|----------------------------------|--------------------------|
| 1: STOP Red light | a: T_R , after (35sec) |
| 2: Go, Green light | b: T_G , after (28sec) |
| 3: Prepare to Stop, Yellow light | c: T_Y , after (3sec) |

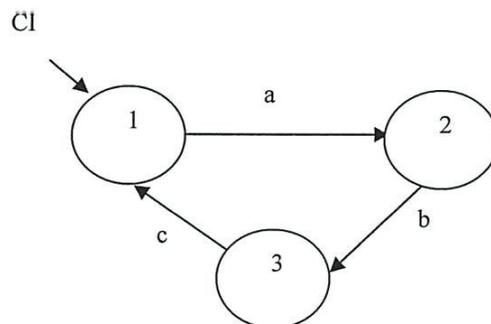


Figure 4.4 Automate à états finis d'un feu tricolore

4.3. Modèle d'Automate hybride de réseau du trafic urbain :

A. Description du phénomène d'attente au niveau d'un carrefour à feu

La file d'attente est l'une des variables clé d'un système de régulation adaptatif par la commande des feux. En effet, la plupart de ces systèmes cherchent le meilleur agencement des couleurs des feux minimisant le temps d'attente moyen par véhicule sur le carrefour. Or ce critère s'exprime directement en fonction de l'évolution de la file autour du temps. Un fils d'attente apparaît lorsqu'un véhicule stoppe au niveau du feu. Elle se prolonge ensuite à

chaque fois qu'un nouveau véhicule s'y insère. Inversement, elle diminue quand les véhicules redémarrent. La tête de file recule alors à chaque départ, et ce jusqu'à ce que tous les véhicules soient partis.

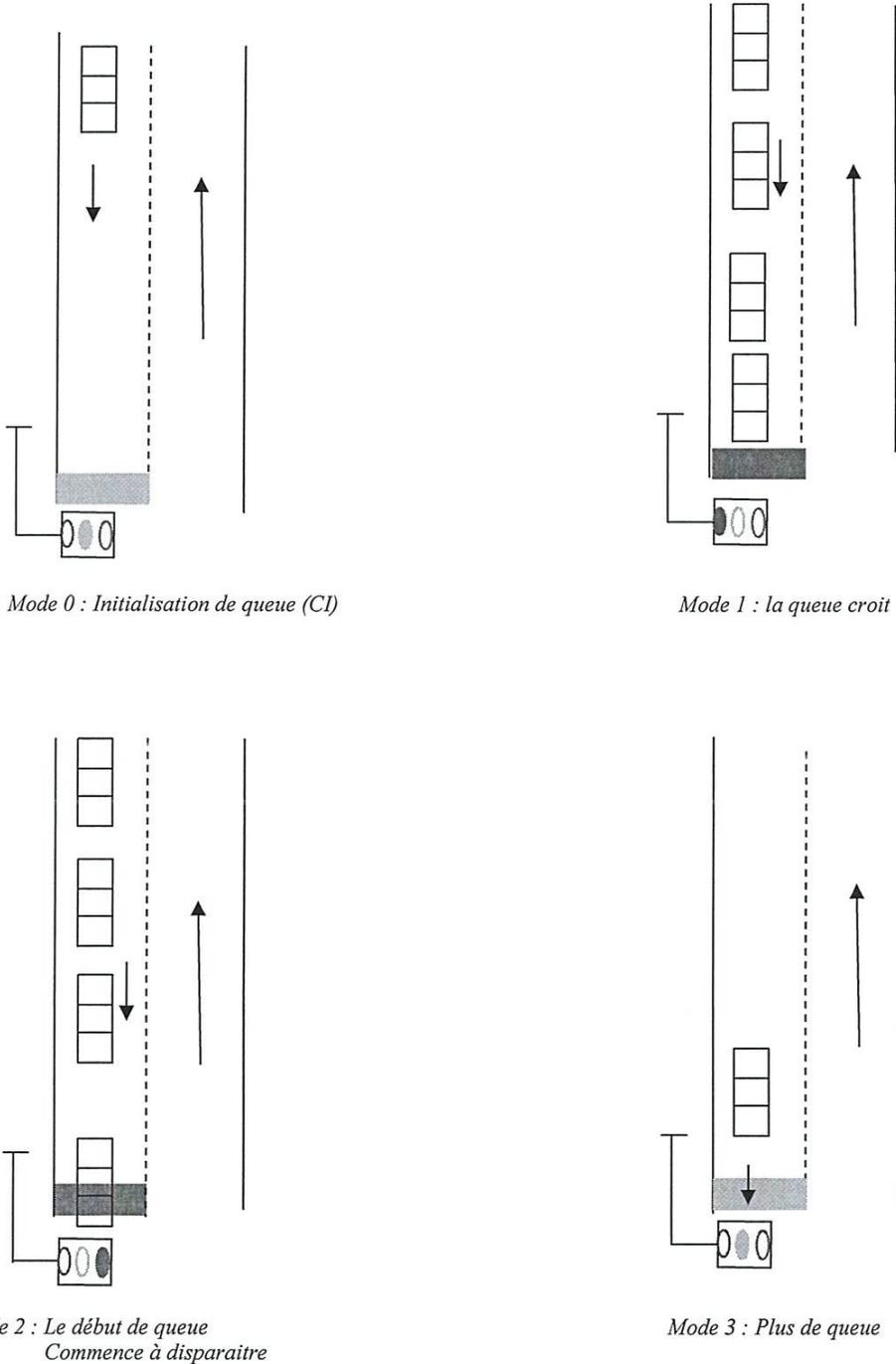


Figure 4.5 Différents états de l'évolution de la file d'attente dans un tronçon de la route

B. Analyse du fonctionnement du système

De manière générale, ce système fait intervenir explicitement et simultanément des modèles de type dynamique continu et événementiels. La partie événementielle fait intervenir la notion de mode ou chaque mode est associé à une dynamique continue propre. L'ensemble des modes caractérise le fonctionnement complet du système. Un automate génère le passage d'un mode à l'autre par l'intermédiaire des mesures et en prenant en compte l'ensemble des évènements contrôlés et spontanés générés par le système.

Les modes de fonctionnement sont contrôlés par le cycle de feux : $C_f = T_R + T_G + T_Y$

Mode 0 : Initialisation de queue (CI)

$$\begin{cases} \dot{q} = 0 \\ f^{in} \geq 0, f^{out} = 0 \\ T_Y : Yellowlight \end{cases}$$

Dans cette étude, nous nous limitons aux modes normaux où le basculement d'un mode à un autre est contrôlé par la commutation du feu de signalisation.

La (figure 4.6) décrit les trajectoires correspondantes aux configurations du système en fonctionnement normal. Le modèle ainsi conçu représente une version réduite du comportement global du système. [12]

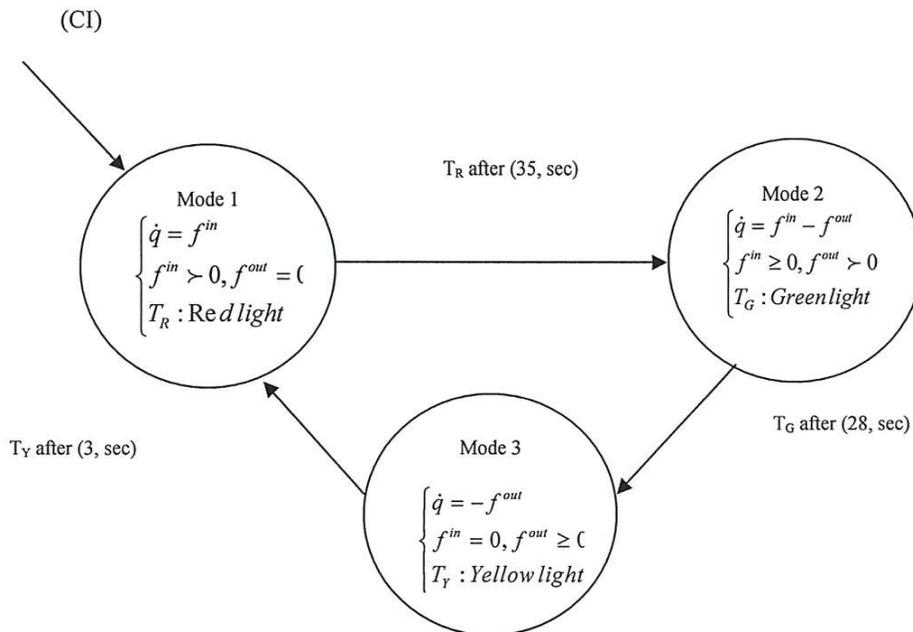
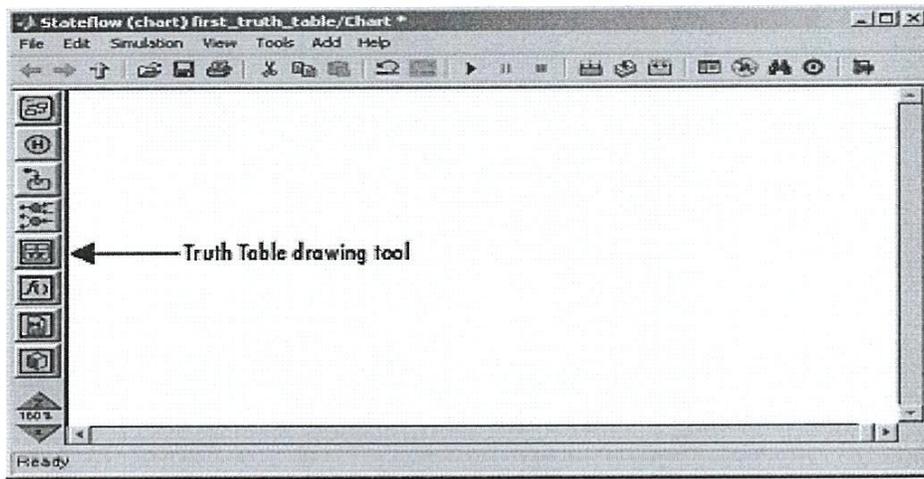


Figure 4.6 Automate hybride du système en comportement normal

5- Etude Et Validations Des Résultats :

5.1 Généralité sur stateflow :



5.1.1 Définition :

Stateflow est destiné à la représentation des systèmes discretes et à la simulation de leur fonctionnement, il communique parfaitement avec simulink dont il renforce la capacité de prise en compte des séquences logiques que les blocs conditionnels avaient commencé à introduire. D'ailleurs, le bloc stateflow n'est autre qu'un bloc de simulink masqué.

Stateflow s'utilise de manière analogue à Simulink. On construit tout d'abord le schéma en plaçant, grâce à un éditeur, les différents éléments du diagramme (chart) à construire et qui sont essentiellement :

- les états (states)
- leur liaison (transition)
- ainsi que les libellés attribués à l'événement (événements) et aux actions

Stateflow produit des blocs Simulink, alimentés par les entrées et produisant des résultats, Un bloc Stateflow peut "exécuter" blocs Simulink comme des actions, Fournit une intégration transparente des machines d'état dans un schéma de formalisme (Figure 4.7).

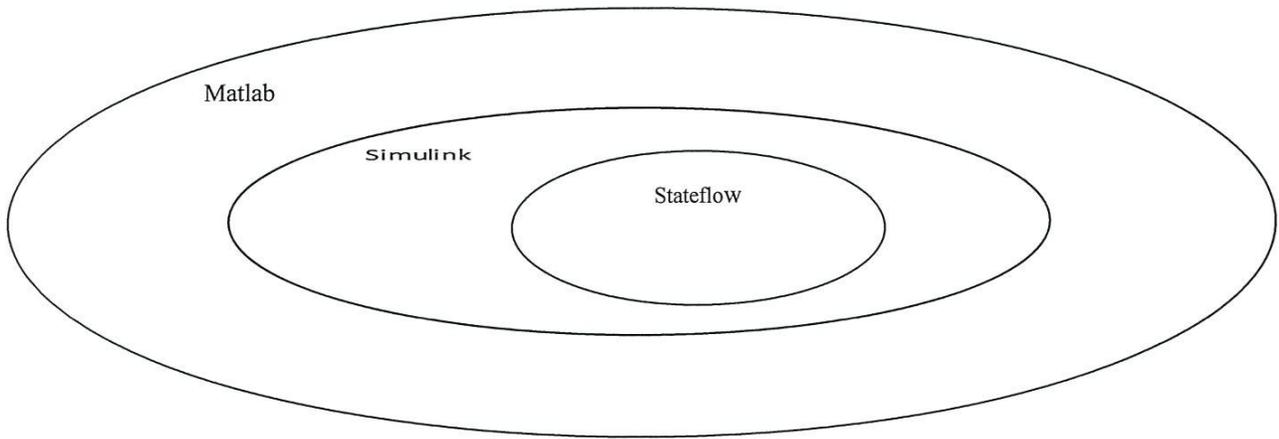


Figure 4.7 stateflow

Qu'est-ce que Stateflow fait?

Stateflow intègre trois éléments de base:

1. Machines à états hiérarchiques et parallèles empruntées diagrammes d'états,
2. Diagrammes de flux de contrôle permettant de concevoir des transitions complexes entre Stateflow-Unis,
3. Tables de vérité permettant de concevoir des actions complexes.

5.1.2 Caractéristiques Stateflow :

Plusieurs éléments méritent d'être remarqués:

- Stateflow englobe aussi bien les machines de Mealy et Moore:
 - Actions associées aux deux états et les transitions,
 - Des actions d'entrée effectuées lors de la saisie d'un état,
 - Lors d'actions, réalisée si elle reste en l'état,
 - Actions de sortie, réalisés au moment de quitter l'Etat,
 - Les actions de condition, effectuées avant de quitter l'Etat de la source,
 - Les mesures de transition, effectuée après avoir quitté l'Etat de la source, mais avant entrer Dans l'état de destination.

Plus de fonctionnalités Stateflow

- grande variété de moyens pour décrire les actions:
 - Diffusion événement - Tables de vérité,
 - Bloc Simulink "d'exécution",
 - Fonctions Matlab

5.2 Description :

Ce travail entre dans le cadre d'étudier le comportement du trafic urbain appliqué à la ville de Guelma dans un tronçon routier en utilisant les techniques de modélisation existantes.

La figure ci-dessous représente la couverture géographique du réseaux avec les points chauds de circulation.

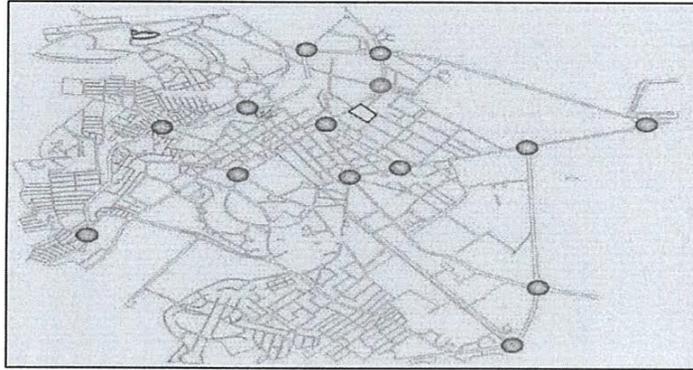


Figure 4.8 Le réseau du trafic routier de la ville de Guelma et les points chauds de la circulation

5.3 Simulation de la file d'attente (q) au niveau d'un carrefour :

Notre étude porte sur une section de la rue Ali Chorfa au niveau de la ville de Guelma, liant en entrée le centre de la ville à la sortie de la ville et présentant plusieurs ruelles (branchements) de part et d'autres de la route ce qui provoque souvent des phénomènes de congestion rendant la circulation de plus en plus lente et même difficile surtout aux moments des heures de pointes. Plusieurs essais ont été effectués au cours des journées sur des durées de 11 minutes. Ces mesures sont principalement la mesure des files d'attente sur les entrées et sorties du carrefour, les débits sur les entrées et l'occupation spatiale dans la zone d'étude considérée.

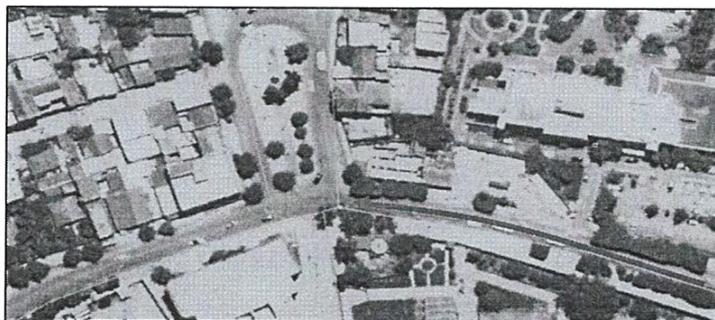


Figure 4.9 Présentation de la zone d'étude

Dans cette première application, nous nous intéressons au comportement de la file d'attente. La (figure 4.10) illustre l'aspect continu du système sur un horizon de [0 666s].

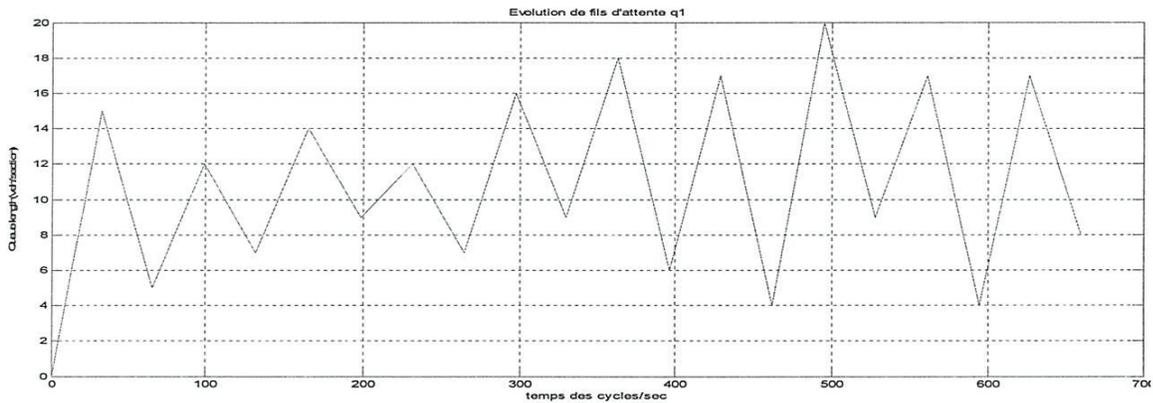


Figure 4.10 Evolution de la file d'attente au niveau d'un carrefour

5.4 Évolution des modes (simulation de comportement du contrôle de feu tricolore) :

La dynamique de l'aspect discret est illustrée par la (figure 4.11) où le comportement normal d'un contrôle du feu tricolore est décrit par la séquence des

modes normaux suivante : 1 2 3, 1 2 3, 1 2 3, 1 2 3,..

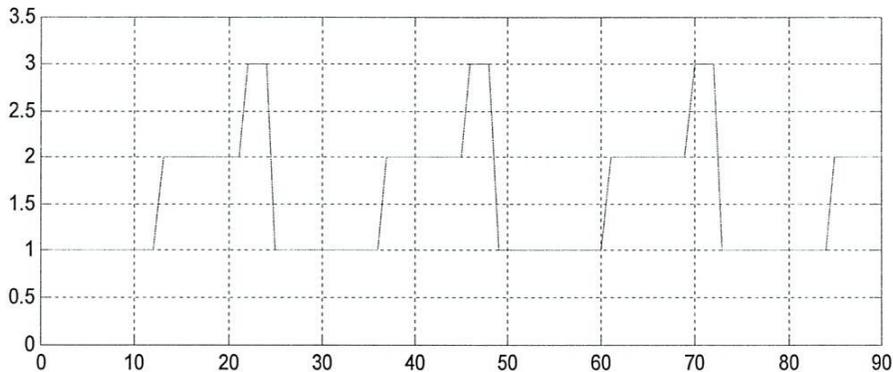


Figure 4.11 Evolution des modes

La (figure 4.11) illustre l'influence du contrôle des feux sur le comportement du flux des véhicules, de telle sorte que, la longueur de la file d'attente croît dans le mode 1 et dèsqu'il y aura basculement de feu rouge au feu vert, on constate une diminution de la queue. A la fin de chaque cycle, une partie de la queue demeure dans la file. Ce comportement peut être traduit par un AH avec les deux modes dominants.

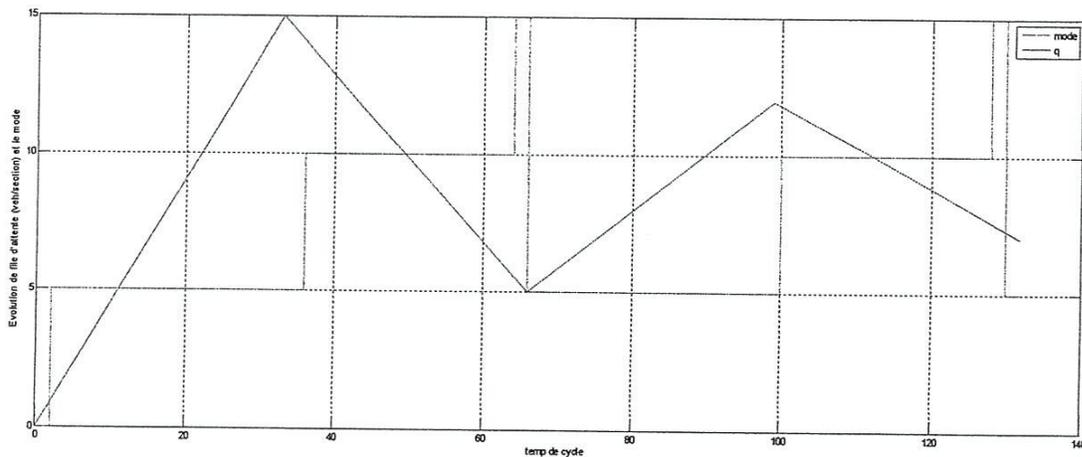


Figure 4.12 Évolution de la dynamique hybride

6-Modèle par RdP des intersections:

Le RdPCV présenté est bien adapté pour modéliser l'écoulement continu du trafic sur une voie du carrefour. Toutefois, dans un carrefour à feux, la circulation des véhicules est inhérente aux changements d'état des feux. Dans un cycle de feu, l'évolution du trafic sur une voie est caractérisée par un comportement de passage pendant le vert et un comportement d'attente pendant le rouge. Cette dynamique peut être modélisée par un RdPH composé de modèles élémentaires RdPCV similaires à celui de la figure 3 et d'un RdPT modélisant les feux de signalisation. La présence d'un jeton dans la place discrète P_1^* (représentée par un simple cercle,) indique l'état « vert » du feu sur la voie (O-E). La transition continue T_2 est donc franchissable pendant une durée du vert égale à d_1 (temporisation associée à la transition discrète T_1^* représentée sur la figure 4 par une barre).

En revanche, l'absence d'un jeton dans la place P_2^* rend la transition T_4 non franchissable (i.e., état « rouge » du feu sur la voie (N-S)). Lorsque des véhicules arrivent sur la voie (N-S), ils forment une file d'attente pendant une durée égale à d_1 .

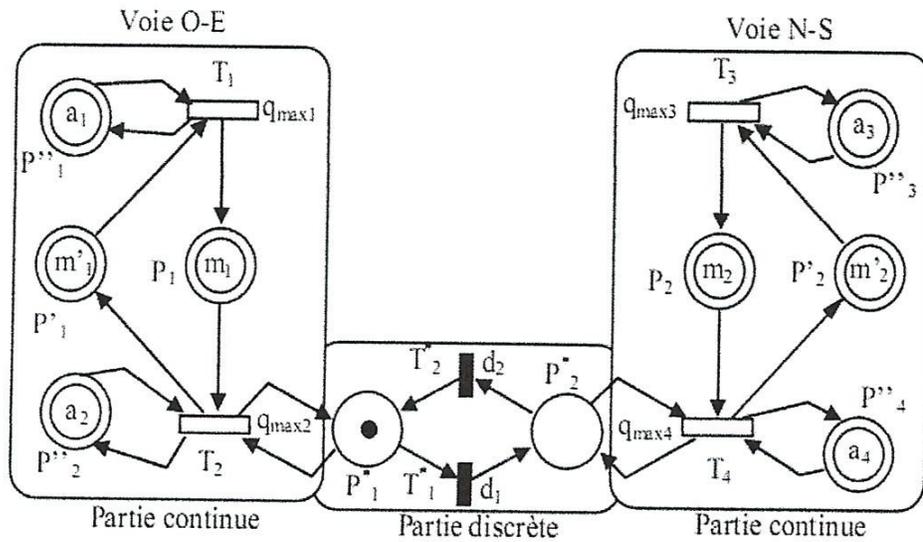


Figure 4.13 Modèle par RdPH du carrefour

Pendant un cycle de feu $[t_0, t_f]$, l'écoulement du trafic dans le carrefour est régi par les deux systèmes, d'équations différentielles, suivants :

Pour $t \in [t_0, t_c]$:

$$S_1 \begin{cases} \dot{m}_1(t) = q_{\max 1} \min(a_1, c_1 - m_1(t)) - q_{\max 2} \min(a_2, m_1(t)) & \text{Feu vert sur la voie O-E} \\ \dot{m}_2(t) = -q_{\max 3} \min(a_3, c_2 - m_2(t)) + q_{\max 4} \min(a_4, m_2(t)) & \text{Feu rouge sur la voie N-S} \end{cases}$$

avec les conditions initiales $m_1(0) = m_1^0$ et $m_2(0) = m_2^0$.

Pour $t \in [t_c, t_f]$:

$$S_2 \begin{cases} \dot{m}_1(t) = -q_{\max 1} \min(a_1, c_1 - m_1(t)) + (1 - \varphi(t)) q_{\max 2} \min(a_2, m_1(t)) & \text{Feu rouge sur la voie O-E} \\ \dot{m}_2(t) = q_{\max 3} \min(a_3, c_2 - m_2(t)) - \varphi(t) q_{\max 4} \min(a_4, m_2(t)) & \text{Feu vert sur la voie N-S} \end{cases}$$

avec les conditions initiales $m_1(t_c)$ et $m_2(t_c)$ calculées par S_1 .

$$S \begin{cases} \dot{m}_1(t) = q_{\max 1} \min(a_1, c_1 - m_1(t)) - (1 - \varphi(t)) q_{\max 2} \min(a_2, m_1(t)) \\ \dot{m}_2(t) = q_{\max 3} \min(a_3, c_2 - m_2(t)) - \varphi(t) q_{\max 4} \min(a_4, m_2(t)) \end{cases}$$

Où $\varphi(t)$ est une fonction discrète prenant des valeurs dans l'ensemble $\{0,1\}$ et représentant le marquage des places P_1^* et P_2^* . $\varphi(t)$ vaut 0 quand le jeton est dans P_1^* , il vaut 1 quand le jeton se trouve à la place P_2^* . Dans l'exemple qui nous intéresse, puisque l'on commence le cycle par un feu vert sur la voie O-E et rouge sur la voie N-S, cela revient à prendre $\varphi(t) = 0$ pour $t \in [t_0, t_c]$ et $\varphi(t) = 1$ pour $t \in [t_c, t_f]$

7-Conclusion :

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une étude de gestion du trafic routier urbain et notamment le phénomène de la file d'attente. Dans cette première phase, nous nous sommes intéressés à la modélisation du comportement de la file en se basant sur le modèle AH. D'après les courbes, nous constatons une présence continue des véhicules sur le tronçon d'où un croisement de la file d'attente, qui est du d'une part au comportement du conducteur et de la taille des véhicules et d'autres part au contrôle des feux du carrefour. Ce qui impose, comme solutions afin de réduire ce phénomène:

- la conception d'un système de régulation adaptatif,
- l'optimisation de la longueur de la file d'attente,

CONCLUSION GENERALE

L'étude que nous avons présentée dans ce mémoire nous a permis de constituer d'une part, une idée générale sur l'automatisation industrielle et en particulier la technique de modélisation par réseaux de pétri et d'autre part d'étudier une application concernant une problématique relevée du monde réel que nous subissons au quotidien qui est la gestion du trafic au niveau d'une ou plusieurs intersections.

Cette étude n'est qu'un petit pas dans ce vaste domaine qui concerne la gestion du trafic urbain, cependant elle peut avoir plusieurs perspectives tel que :

- ◆ Modélisation du réseau de la voirie d'une ville.
- ◆ Réalisation d'un simulateur.
- ◆ Gestion du trafic urbain d'une ville.
- ◆ ...etc.

En fin, nous espérons que la qualité de ce travail égaliserait nos efforts et notre persévérance et qu'il sera bénéfique aux futurs étudiants.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Dr. Fei YAN "Contribution à la modélisation et à la régulation du trafic aux intersections : Intégration des communications Véhicule-Infrastructure " *l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard en Sciences pour l'Ingénieur, 14 Mars 2012, Belfort, France.*
- [2] http://fr.wikipedia.org/wiki/Carrefour_%C3%A0_feux#Les_contraintes_des_carrefours_.C3.A0_feux
- [3] N.BENNIS " Les Réseaux de Pétri théorie propriété et application "
<http://www.specialautom.net/automatisme/cours%20version%20revue%20pour%20le%20site.pdf>
- [4] Yann Morere "Cours de réseau de Pétri " Avril 2002
http://www.moreere.eu/IMG/pdf/cours_petri2.pdf
- [5] Jean-paul comet " Les Réseaux de Pétri pour la simulation de systèmes biologiques " laboratoire I3S, UMR 6070 CNRS/UNSA Université de Nice-Sophi-Antipolis Ecole Polytech, May 2012, Nice, France
- [6] <http://www.metz.supelec.fr/metz/personnel/vialle/course/CNAM-ACCOV-NFP103/extern-doc/RdP/Introduction-RdP.pdf>
- [7] Mircea Adrian DRIGHICIU "sur l'analyse des systèmes hybrides l'aide de réseaux de pétri" Universitatea din Craiova, Facultatea de Electromecanic
- [8] SAIT. BELKACEM "Evaluation des performances d'une unité de production de semoule par : Réseaux de Pétri hybrides" International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007, du 03au 04 November 2007, Serif, Algeria.
- [9] Michelle Chabrol, David Sarramia "MODELLISATION MULTIPLE DES SYSTEMES DE TRAFIC URBAIN " *Conférence Francophone de Modélisation et Simulation «Conception, Analyse et Gestion des Systèmes Industriels», du 25 au 27 avril 2001, Troyes, France,*
- [10] Michelle Chabrol, David Sarramia "Modélisation orientée objets du système d'information des Systèmes de l'rafic Urbain : une approche multi-agents" *Université Blaise Pascal – Clermont-Ferrand II*
- [11] Zainea Marius "Du composant a l'automate hybride pour la modélisation et la simulation des systèmes en commutation : application a l'électronique de puissance" Université de rennes 1,20 novembre 2008
- [12] Bourriachi Fares et all "Modélisation d'un réseau du trafic urbain par Automate hybride" *Conférence Internationale System and Information Processing, du 12 au 14 May 2013, Guelma, Alegria.*