

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'électrotechnique

N° :/2023

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE: Scienceset Technologies

FILIERE: Electromécanique

SPECIALITE: Electromécanique

Thème

**Étude et optimisation du flux de trafic urbain d'une
agglomération**

Présenté Par : MEGHLAOUI Younès

Encadré Par : DERAÏ Samir

SABOUNI Soumia

Date de soutenance: 03/07/2023

Jury de Soutenance

Président : BOUSBA Issam

Grade : MCB

UnivMSB jijel

Encadreur : DERAÏ Samir

Grade : MCB

Univ MSB jijel

Examineur 1: CHOUIKHI Lotfi

Grade : MCB

Univ MSB jijel

Promotion : 2022 /2023

REMERCIEMENTS

*Avant tout Nous remercions ALLAH tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience pour terminer ce travail. Ce présent mémoire, n'aurait pu voir le jour sans la contribution de nombreuses personnes dont nous faisons aujourd'hui un plaisir et un devoir de les remercier, et de leur témoigner notre profonde gratitude Nous remercions notre encadreur **M^{er} DERAI Samir** pour l'intérêt qu'il a apporté à ce travail, qu'il nous a accordé tout au long de ce travail.*

*A tous les enseignants de **Département d'électrotechnique** de la **Faculté des Sciences et de la Technologie**, qui n'ont pas cessé de nous porter aide et assistance.*

Nous n'oublions pas nos parents de leur soutien moral et matériel Qu'il soit de même pour tous nos ami(e) s dont le soutien indéfectible et leur fidélité en amitié.

*Merci. Nous présentons également nos remerciements aux **membres de jury** qui daigneront, évaluer et juger notre travail Enfin, nos remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidés, de près ou de loin durant notre formation.*

Résumé :

La congestion du trafic routier constitue un défi pour toutes les zones urbaines et reçoit beaucoup d'attention; aujourd'hui la commande des feux de circulation en milieu urbain constitue un sujet de recherche important et stimulant ; l'idée dans ce travail consiste à rapprocher le comportement d'une intersection à un système hybride caractérisé par deux comportements distincts: la partie continue correspond au flux de trafic et la partie discrète représente la séquence de commutation des feux d'intersection. Ces systèmes dynamiques ont un double comportement et peuvent être modélisés par des Réseaux de Petri hybrides (RdPH).

Dans ce mémoire, Nous avons alors adapté quatre algorithmes de commande des feux tricolores : Un algorithme de commande par cycle fixe et un algorithme de commande par rupture de seuil haut, le troisième algorithme est par rupture de seuil bas le dernier algorithme de commande par rupture de seuils mixtes (bas et hauts).

Dans notre projet, nous avons étudié la dynamique du trafic urbain gérée par les feux tricolore de carrefour, en vue de résoudre les problèmes liés à la congestion et afin d'améliorer la fluidité de la circulation et rendre le trafic plus facile.

Mots clés: Modélisation, Contrôle, RdP D-élémentaire, Congestion , Trafic urbain.

Abstract :

Road traffic congestion poses a challenge for all urban areas and receives much attention; nowadays the control in urban traffic network of signalized intersections constitutes an important and challenging research topic, intersection can be considered as a hybrid system which is characterized by two major behaviors: the continuous part corresponds to the traffic flow and the discrete event part represents the switching sequence of the signals at intersection. These dynamical systems with a double behavioral component can be modeled by hybrid Petri nets (HPN).

In this memory, we then adapted four traffic light control algorithms: A control algorithm by fixed cycle and a control algorithm by high threshold break, the third algorithm is by low threshold break the last control algorithm by breaking mixed thresholds (low and high).

In our project, we studied the dynamics of urban traffic managed by traffic lights at intersections, with a view to solving problems related to congestion and in order to improve traffic fluidity and make traffic easier.

Keywords: Modeling, control, D-elementary hybrid Petri Net, Congestion, urban traffic.

ملخص:

يشكل الازدحام المروري تحديا لجميع المناطق الحضرية ويحظى بالكثير من الاهتمام. حاليا التحكم في حركة المرور في هذه المناطق على مستوى التقاطعات ذات الإشارات الضوئية موضوع مهم ومحفز على البحث. يمكن اعتبار التقاطع كنظام هجين يتميز بسلوكيين رئيسيين: الجزء المتواصل يتوافق مع تدفق حركة المرور وجزء منفصل يمثل تبديل تسلسل الإشارات عند التقاطع. هذه النظم الديناميكية ذات المكون المزدوج للسلوكيات يمكن تشكيلها من خلال شبكات بتري الهجينة.

في هذه المذكرة، قمنا بتكليف أربع خوارزميات للتحكم في إشارات المرور: خوارزمية التحكم بدورة ثابتة وخوارزمية التحكم عن طريق فاصل عتبة عالية، والخوارزمية الثالثة بواسطة عتبة منخفضة كسر والأخير خوارزمية التحكم عن طريق كسر العتبات المختلطة (المنخفضة والعالية).

في مشروعنا، درسنا ديناميكيات حركة المرور الحضرية التي تديرها إشارات المرور عند التقاطعات، بهدف حل المشكلات المتعلقة بالازدحام ومن أجل تحسين انسيابية حركة المرور وتسهيلها.

الكلمات المفتاحية: النمذجة، التحكم، شبكات بتري الهجينة، ازدحام، حركة المرور في المناطق الحضرية.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I : Modélisation du trafic: Etude et caractéristiques	
I.1. Introduction	5
I.2. Composantes du trafic	6
I.2.1. Les autoroutes	7
I.2.2. Les intersection	8
I.3. Caractéristiques du trafic	9
I.3.1. Distribution	9
I.3.2. Complexité	9
I.3.3. Dynamique	10
I.3.4. Hétérogénéité	10
I.4. Instruments de mesure du trafic	10
I.5. Etat de l'art sur les modèles de flux de trafic routier	14
I.5.1. Modèles microscopiques	15
I.5.2. Modèles mésoscopiques	17
I.5.3. Modèles macroscopiques	18
I.6. Variables élémentaires du trafic routier	19
I.6.1. L'écart du temps inter-véhiculaire	19
I.6.2. Le débit	20
I.6.3. La concentration (ou la densité)	21
I.6.4. Le taux d'occupation	23
I.6.5. La vitesse des véhicules et les vitesses moyennes	23
I.6.6. Le diagramme fondamental	24
I.7. Conclusion	24
Chapitre II : Les Systèmes dynamiques hybrides	
II.1. Introduction	28
II.2. Comportement hybride des systèmes dynamiques	28
II.3. Notions de Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH)	30
II.3.1. Définition des Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH)	30
II.4. Caractéristiques des systèmes	32
II.5. Structure d'un système hybride	34
II.6. Classification des comportements hybrides	35
II.6.1. Commutations autonomes	36
II.6.2. Commutation contrôlée	36
II.6.3. Saut autonome	37
II.6.4. Saut contrôlé	37
II.7. Modélisation des systèmes dynamiques hybrides	37
II.5.1. Les Automates à états finis	38
II.5.2. Les Réseaux de Petri	39
II.5.3. Le Grafcet	40

II.7. Conclusion	47
-------------------------------	----

Chapitre III : Modélisation et commande des feux de trafic

III.1. Introduction	49
III.2. Le découpage en phases	50
III.2.1. Notions de conflits.....	50
III.2.2. Concept de supervision	51
III.3. Paramètres essentiels au calcul	52
III.4. Régulation des carrefours à feux	53
III.4.1. Carrefour à plan de feux fixe	54
III.4.2. Régulation du trafic avec les systèmes adaptatifs.....	56
III.5. Modélisation du flux des voitures par les Réseaux de Petri	59
III.5.1. Hypothèses	59
III.5.2. Modélisation	59
III.6. Algorithme de commande des feux tricolores par l'état de remplissage des voies	
Symboles utilisés	63
III.6.1. Algorithme de commande avec commutation à cycle fixe.....	64
III.6.2. Commande a seuil max.....	66
III.6.3. Commande a seuil min	68
III.6.4. Commande a seuil mixte.....	70
III.7. Résultats des Algorithmes de commande	72
III.8. Conclusion	85
Conclusion générale	87

Liste des figures

Chapitre I : Modélisation du trafic: Etude et caractéristiques

Figure. I.1 : Représentation schématique d'un réseau routier selon Gazis (1974).....	6
Figure. I.2 : Discrétisation spatiale du tronçon autoroutier m	7
Figure. I.3 : Exemple d'implantation de boucles sur une chaussée à deux voies.....	12
Figure. I.4 : Principe de la détection par boucle électromagnétique	7
Figure. I.5 : Mesure de la vitesse avec deux boucles	12
Figure. I.6 : Détecteur ultrasons à effet Doppler	13
Figure. I.7 : Classification des modèles du flux de trafic	15
Figure. I.8 : Modèle de la voiture suiveuse	16
Figure. I.9 : Modèle de changement de voie	16
Figure. I.10 : Classification des modèles du flux de trafic macroscopiques	19
Figure. I.11 : L'écart du temps inter-véhiculaire.....	20
Figure. I.12 : Le diagramme fondamental.....	25

Chapitre II : Les Systèmes dynamiques hybrides

Figure. II.1 : Comportement d'une variable d'état dans un système continu.....	29
Figure. II.2 : Comportement d'une variable dans un SED.....	29
Figure. II.3 : Comportement d'une variable dans un SDH.....	30
Figure. II.4 : Classification des systèmes	33
Figure. II.5 : Structure d'un système hybride	34
Figure. II.6 : Classification des systèmes hybrides.....	35
Figure. II.7 : Fonction d'hystérésis.....	36
Figure. II.8 : Automate hybride associé.....	36
Figure. II.9 : Exemple d'automate à états finis.....	38
Figure. II.10 : Modèle D'un RdP.....	40
Figure. II.11 : Concepts de base du Grafcet.....	41
Figure. II.12 : exemple d'un Grafcet	42
Figure. II.13-a : système à réservoir d'eau	44
Figure. II.13-b : RdP continu équivalent	44
Figure. II.13-c : Dynamique des marquages et évolution de vitesses.....	44
Figure. II.13-d : Graphe d'évolution d'un RdPCC	44
Figure. II.14 : Nœud d'un RdP hybride	45
Figure. II.15 : RdP hybride	46

Chapitre III : Modélisation et commande des feux de trafic

Figure. III.1 : Exemples de conflits primaires	50
Figure. III.2 : Exemples de conflits secondaires	51
Figure. III.3 : Exemples de conflits tertiaires	51
Figure. III.4 : Mouvements se produisant à un carrefour à trois branches	52
Figure. III.5 : Matrice des conflits.....	52
Figure. III.6 : Illustration d'un carrefour isolé	54
Figure. III.7 : Carrefour isolé d'un réseau de trafic urbain	60
Figure. III.8 : RdP D-élémentaire modélisant les deux voies du carrefour	61
Figure.III.9-a : Commande par cycle fixe de la voie N-S (cycle fixe-Heures normales)	73
Figure. III.9-b : Commutation des feux a cycle fixe de la voie N-S (cycle fixe-Heures normales).....	73
Figure. III.10-a : Commande par cycle fixe de la voie N-S (cycle fixe-Heures de pointes).....	74
Figure. III.10-b : Commande par cycle fixe de la voie N-S (cycle fixe-Heures de pointes).....	75
Figure. III.11.a : Commande à seuil maximal de la voie N-S (seuil maximal- Heures normales).....	76
Figure III.11.b : Commutation des feux a seuil maximal de la voie N-S (seuil maximal- Heures normales).....	77
Figure III.12.a : Commande à seuil maximal de la voie N-S (seuil maximal- Heures de pointe).....	78
Figure III.12.b : Commutation des feux à seuil maximal de la voie N-S (seuil maximal- Heures de pointe).....	78
Figure III.13.a : Commande à seuil minimal de la voie N-S (seuil minimal- Heures normales).....	79
Figure III.13.b : Commutation des feux à seuil minimal de la voie N-S (seuil minimal- Heures normales).....	79
Figure III.14.a : Commande à seuil minimal de la voie N-S (seuil minimal- Heures de pointe).....	80
Figure III.14.b : Commutation des feux à seuil minimal de la voie N-S (seuil minimal- Heures de pointe).....	80
Figure III.15.a : Commande à seuil mixte de la voie N-S (cycle mixte- Heures normales).....	82
Figure III.15.b : Commutation des feux à seuil mixte de la voie N-S (cycle mixte- Heures normales).....	82

Figure III.16.a : Commande à seuil mixte de la voie N-S (cycle mixte- Heures de pointe).....83

Figure III.16.b : Commutation des feux à seuil mixte de la voie N-S (cycle mixte- Heures de pointe)
.....83

Figure III.17.b : Etat du feu vert dans la voie N-S (Cas d'accident).....84

Introduction Générale

Introduction générale :

Depuis la seconde moitié du 20^{ème} siècle l'augmentation des besoins en circulation des biens et des personnes et la croissance du parc automobile qui en résulte, les infrastructures routières en zones urbaines et inter urbaines sont le plus souvent saturées. La conséquence immédiate est l'apparition de plus en plus fréquente des congestions avec leurs impacts négatifs sur la santé et sur l'environnement. Ces phénomènes ont des répercussions sur l'économie, plus particulièrement des pays industrialisés, et ont aussi des conséquences néfastes sur la qualité de vie des citoyens. [1]

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. [2]

Les exploitants d'infrastructures font face à des difficultés telles que des saturations dues à des grands flux (grandes migrations de week-ends et de vacances), d'autre part à des incidents (accidents, véhicules en panne, travaux, événements météorologiques...). Ces congestions récurrentes et non récurrentes peuvent être traitées de différentes manières. [3]

L'une des solutions la plus naturelle consiste à construire de nouvelles infrastructures. Néanmoins, elles ne peuvent être retenues aussi facilement car elles nécessitent de réaliser des investissements importants. Elles se trouvent confrontées, le plus souvent, au manque d'espace disponible pour la construction de nouvelles routes ou à la réticence des citoyens directement concernés par ces projets de construction. [1]

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. [2]

Les outils de régulation élaborés jusqu'à présent reposent sur des techniques d'estimation et de prévision des flux de trafic. La mise en œuvre de telles techniques nécessite l'utilisation des modèles de trafic. La plupart de ces modèles sont issus de la théorie de l'hydrodynamique et considèrent l'évolution du trafic comme un fluide incompressible. Or, dans la réalité

l'évolution du trafic est plus complexe. Elle est conditionnée par la cinématique de chaque véhicule et ses interactions avec son environnement. [4]

L'évolution du trafic est un processus dynamique où deux types de comportement coexistent. Le flux des voitures peut être vu comme un flux continu qui s'écoule le long des voies de circulation. Il sera modélisé par des variables continues. Ce flux est interrompu par les feux de signalisation qui correspondent à un système discret. Il s'agit donc là typiquement d'un système hybride.

Notre contribution, dans le cadre de la modélisation, nous avons approché les variables de trafic avec une extension continue des réseaux de Petri. Les réseaux de Petri continus à vitesses constantes, Nous avons d'abord modélisé la dynamique du carrefour par un réseau de Petri hybride D-élémentaire.

Ensuite, nous nous sommes intéressés à la commande des feux de carrefour en vue de résoudre les problèmes liés à la congestion du trafic.

Dans un carrefour à feux, le trafic est qualifié d'hétérogène du fait de l'évolution continue des files d'attente sur les voies et de l'évolution discrète des feux tricolores. L'évolution des files d'attente et les changements des feux sont inhérents à l'occurrence des événements dans le carrefour. Ainsi, le fonctionnement du carrefour est modélisé par un réseau de Petri hybride. L'évolution des files d'attente est régi par deux équations linéaires interagissant conformément aux changements d'états des feux. La commande des feux ainsi élaborée repose sur la commande des instants de commutation des feux conformément à l'état de remplissage des voies du carrefour.

Dans le premier chapitre, nous présentons les différents types de modèles du trafic routier. Ensuite nous donnons les éléments qui composent le trafic urbain, ainsi que son environnement.

Dans le deuxième chapitre, nous introduisons les notions fondamentales relatives aux systèmes dynamiques hybrides. Leur définition ainsi que les principaux phénomènes hybrides, sont présentés. Nous passons en revue les principaux formalismes de modélisation des systèmes hybrides dont nous avons besoin, à savoir : Les réseaux de Petri hybrides D-élémentaires.

Au troisième chapitre nous présentons un modèle du trafic. Ce modèle est respectivement articulé sur les réseaux de Petri continus à vitesses constantes, nous avons proposé une approche de modélisation hybride en développant un modèle réseau de Petri hybride. La

commande des feux à partir de ce modèle fait l'objet de la deuxième partie du troisième chapitre. La mise au point d'une telle commande nécessite une adaptation du modèle utilisé aux outils de commande existants. Etant donné que le réseau de Petri hybride obtenu est un modèle linéaire, nous avons opté pour une approche de commande à seuils qui régit le passage du système d'une phase à une autre. L'exploitation des instants de passage d'un modèle à l'autre nous a permis de mettre en œuvre quatre algorithmes de commandes événementielles.

Chapitre I

Modélisation du trafic: Etude et caractéristiques

1.1. Introduction	5
1.2. Composantes du trafic	6
1.2.1. Les autoroutes	7
1.2.2. Les intersection	8
1.3. Caractéristiques du trafic	9
1.3.1. Distribution	9
1.3.2. Complexité	9
1.3.3. Dynamique	10
1.3.4. Hétérogénéité	10
1.4. Instruments de mesure du trafic	10
1.5. Etat de l'art sur les modèles de flux de trafic routier	14
1.5.1. Modèles microscopiques	15
1.5.2. Modèles mésoscopiques	17
1.5.3. Modèles macroscopiques.....	18
1.6. Variables élémentaires du trafic routier	19
1.6.1. L'écart du temps inter-véhiculaire	19
1.6.2. Le débit.....	20
1.6.3. La concentration (ou la densité)	21
1.6.4. Le taux d'occupation	23
1.6.5. La vitesse des véhicules et les vitesses moyennes	23
1.6.6. Le diagramme fondamental	24
1.7. Conclusion	24

I.1. Introduction :

Le trafic routier consiste en un déplacement des usagers de la route sur le réseau routier. Ce réseau a été développé pour répondre aux demandes de déplacement. Les routes, « chemins de communication », ont été conçues tout au long de l'histoire pour répondre notamment à la demande commerciale. Depuis quelques dizaines d'années, cette demande est complétée par celle liée aux déplacements domicile- travail, qui est devenue de plus en plus importante.

La fin des années cinquante a notamment été marquée par l'apparition des problèmes de congestion dans la plupart des villes, suite à une croissance rapide du trafic urbain automobile, augmentant le volume du trafic véhiculaire avec un taux nettement supérieur à celui de l'augmentation des capacités des routes. En Europe, le temps qu'un conducteur passe bloqué dans des embouteillages est estimé à plusieurs jours par an. Durant la période des vacances, la taille d'un embouteillage peut aller jusqu'à 100 kilomètres. Face à cet accroissement constant du trafic, le développement de nouvelles infrastructures n'est plus une solution envisageable. Les nuisances associées à l'explosion du trafic (pollution, perte de temps, etc.) et l'augmentation du nombre d'accidents ne sont plus acceptées par les populations citadines.

L'optimisation de l'utilisation des infrastructures existantes tant en terme de capacité qu'en terme de sécurité s'est donc imposée comme étant un enjeu économique et social important. Cette optimisation n'est possible que par une meilleure compréhension des mécanismes qui régissent les phénomènes de trafic. [5]

Ce chapitre est consacré à des généralités sur la théorie de la modélisation du trafic ainsi leur caractéristiques et composantes.

I.2. Composantes du trafic :

Un réseau est un ensemble d'itinéraires caractérisé par une topologie donnée, des propriétés relatives à l'écoulement tel que la demande origine-destination ainsi que les contraintes relatives à la capacité, aux choix d'itinéraires, etc.

D'un point de vue graphique un réseau routier est considéré comme un graphe composé d'un ensemble de liens et un ensemble de nœuds (Figure 1.1).

Les liens désignent soit des autoroutes soit de simples routes urbaines ou interurbaines, Les autoroutes ont pour rôles d'assurer une circulation ininterrompue du trafic grâce à l'absence de feux de signalisation. Leur topologie (multivoies, grands axes, etc.) leur permet de garantir une meilleure qualité de service en assurant une circulation d'un grand nombre de véhicules, Néanmoins, l'augmentation croissante en besoin de circulation et l'évolution des pratiques d'exploitation de ce type de liens, rend indispensable la mise en œuvre de modèles mathématiques de description afin de comprendre les phénomènes et d'agir sur le flux de trafic afin d'éviter les congestions.

Les nœuds sont matérialisés par les intersections et les rampes d'entrée/sortie. Les intersections se situent le plus souvent ou en plus grand nombre à l'intérieur des zones urbaines et assurent le lien entre les différentes routes, Les rampes d'entrée/sortie assurent la transition entre les grands axes routiers. [6]

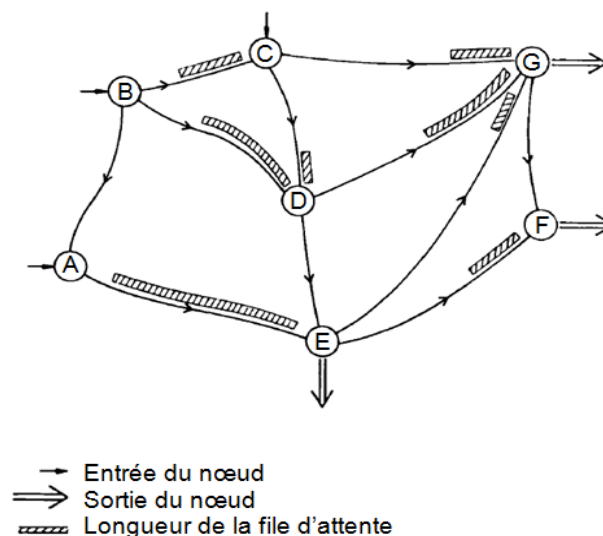


Figure 1.1 : Représentation schématique d'un réseau routier selon Gazis (1974)

I.2.1. Les autoroutes :

Grâce à leur topologie (multivoies, grandes lignes), les autoroutes offrent une bonne qualité de service. D'une part, elles laissent circuler un grand nombre de véhicules et d'autre part les vitesses des véhicules deviennent moins sensibles aux changements de l'état du trafic. Au contraire, sur les routes urbaines les vitesses de véhicules sont inhérentes à la densité du trafic. Compte tenu de la taille des autoroutes ainsi que du temps de calcul requis, leur modélisation est généralement conçue par des modèles macroscopiques. Dans ces modèles, l'autoroute est subdivisée en N segments identiques (figure 1.2). Divers modèles ont été développés dans ce contexte entre autres : le modèle META a été élaborée en 1971 par H.J. Payne, aux Etats-Unis. D'autres développements ont, depuis lors, été entrepris; METACOR, SIMAUT ; INTRAS. A partir des équations régissant l'écoulement du trafic sur chaque section, ces modèles reproduisent certains phénomènes rencontrés sur les autoroutes (les situations fluides et denses, la propagation de la congestion, etc).

Représentation des voies autoroutières :

Considérons un axe autoroutier m qu'on subdivise en N_m segments de même longueur L_m il est représenté par la figure suivante:

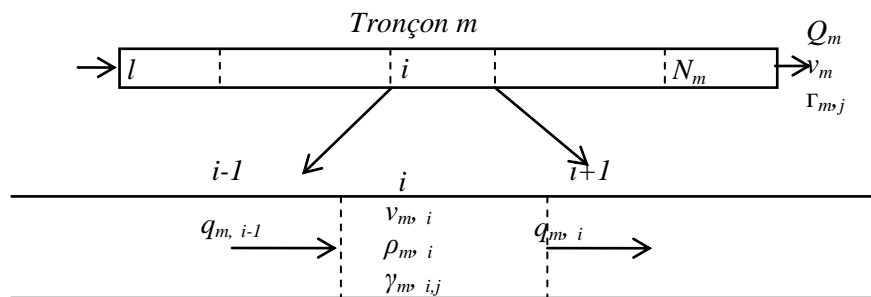


Figure1.2 : Discrétisation spatiale du tronçon autoroutier m .

$\rho_{m,i}(k)$: nombre de véhicules existant dans le $i^{\text{ème}}$ segment à l'instant kT quotienté par la longueur L_m du segment.

$q_{m, i}(k)$: nombre de véhicules quittant le $i^{\text{ème}}$ segment dans l'intervalle de temps $[kT, (k+1) T]$ quotienté par la durée de l'intervalle T .

$v_{m, i}(k)$: la vitesse moyenne des véhicules circulant dans le $i^{\text{ème}}$ segment à l'instant kT .

$q_{m, i-1}(k)$: nombre de véhicules entrant dans $i^{\text{ème}}$ segment pendant l'intervalle de temps $[kT, (k+1) T]$ divisé par T .

λ_m : le nombre de voies du tronçon m .

I.2.2. Les intersection :

Un carrefour est situé à la rencontre de plusieurs rues déterminant des couloirs d'entrée et de sortie. Un couloir est caractérisé par sa largeur et son nombre de voies; certaines de ces voies - voies spéciales - peuvent être affectées par un courant particulier.

Les courants de véhicules sont soit directs, soit des courants de tourne-à-gauche, soit des courants de tourne-à-droite.

Pour un couloir d'entrée, le débit réel désigne le nombre effectif de véhicules empruntant l'entrée.

Les indications des feux - vert, jaune, 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 partagé en phases, temps pendant lequel un ou plusieurs courants 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.

On appelle temps de vert effectif, la somme du temps de vert réel et du temps de jaune (qui est souvent de 3 ou 5 s selon la vitesse d'approche dans le cas d'un carrefour urbain ordinaire).

On définit aussi le temps de vert utile, en retranchant du temps de vert effectif le temps perdu (somme des temps perdus au début du vert, c'est-à-dire au démarrage, et du temps perdu en fin de phase). Les temps perdus par phase se situent en moyenne autour de 8 s. Une telle valeur doit être pondérée cas par cas, selon les caractéristiques propres à chaque carrefour.

On appelle rouge utile la différence entre la durée du cycle et celle du vert utile. Pour des raisons de sécurité, à la fin de chaque phase, l'ensemble des feux du carrefour est maintenu au rouge pendant une certaine durée, appelée rouge intégral. Dans le cas de carrefours simples à 4 branches par exemple, on adopte une durée de rouge intégral de deux secondes.

On appelle longueur de stockage, la longueur sur laquelle se stockent tous les véhicules pouvant pénétrer le carrefour pendant la durée de vert.

Dans les intersections on distingue deux types: les nœuds et les carrefours. Les nœuds autoroutiers représentent une bifurcation ou une fusion de deux autoroute ou encore un changement de nombre de voies sur un axe autoroutier, ces dernières ne sont pas l'objet de notre étude. Les carrefours urbains, en général sont des carrefours à feux. Chaque carrefour possède une topologie qui est caractérisée par les entrées, les sorties et l'aire qu'occupent les véhicules à l'intérieur de ce carrefour. Les carrefours peuvent être classés en deux catégories : les carrefours isolés et les carrefours coordonnés entre eux, constituant un réseau urbain.

La gestion de la circulation au niveau des carrefours (depuis la simple gestion des priorités jusqu'au système de régulation centralisé) produit des avantages individuels et collectifs dont le bénéfice monétarisé peut être substantiel grâce notamment à :

- La réduction des temps de parcours (sans pour autant augmenter les vitesses de pointe) ;
- La diminution des points de congestion ;
- La réduction de la consommation de carburant et par conséquent une diminution de la pollution.

Le rôle du carrefour dans la gestion globale des trafics doit être appréhendé en amont de l'étude afin de prévoir les marges de manœuvres au niveau de son réaménagement.

Enfin, le fonctionnement des carrefours au niveau de certaines grandes villes peut constituer un des outils d'une politique multimodale de déplacement. [7]

I.3. Caractéristiques du trafic:

I.3.1. Distribution :

Le trafic routier peut être défini comme étant le résultat des déplacements des véhicules sur le réseau routier. Ce phénomène résulte en fait de l'interaction de chaque usager de la route avec son environnement, constitué par l'infrastructure routière (dimensionnement géométrique de la route) et les autres usagers, ainsi qu'avec la réglementation. Le trafic routier est donc un phénomène naturellement distribué au sein duquel les interactions entre les différents participants constituent le cœur du fonctionnement.

I.3.2. Complexité :

La complexité d'un système est définie comme étant l'imprévisibilité potentielle (non calculable à priori) des comportements de ce système, liée en particulier à la dynamique qui affecte le fonctionnement de ses composants, et qui suscite des phénomènes d'émergence

certes intelligibles, mais pas toujours prévisibles (<http://www.mcxapc.org/lexique.htm>). Le phénomène du trafic routier est un phénomène complexe car un de ses composants essentiels (le conducteur) a parfois un comportement imprévisible et qu'il se trouve potentiellement en interaction avec plusieurs autres usagers.

I.3.3. Dynamique :

Les phénomènes du trafic sont fortement dynamiques. En effet, le nombre d'intervenants inclus dans le système varie largement dans le temps. Un grand nombre de participants actifs, présents dans le système en même temps, se traduit par un grand nombre d'interactions simultanées. Des observations montrent qu'en cas de trafic dense, une petite perturbation peut être amplifiée et se transformer en congestion. Un certain nombre de recherches montrent que le trafic est caractérisé par un comportement chaotique [Forbes, 1958], [Eddie, 1960].

I.3.4. Hétérogénéité :

Le système du trafic routier fait intervenir des participants variés. On peut citer notamment : les conducteurs, le législateur et le concepteur de l'infrastructure. Les conducteurs sont hétérogènes (débutants et expérimentés), et utilisent des véhicules aux caractéristiques variées (poids lourds et véhicules légers, par exemple). Les conditions météorologiques sont un facteur supplémentaire d'hétérogénéité des comportements. [5]

I.4. Instruments de mesure du trafic :

L'évolution rapide de la technologie dans le domaine de la métrologie routière résulte 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 traduit l'information en un signal élémentaire, transmis au détecteur. Le signal reçu est transformé en une information électrique simple, significative du paramètre de circulation.

On peut retenir trois principaux capteurs qui sont utilisés en majorité dans l'observation et la régulation du trafic (le capteur pneumatiques, la boucle électromagnétique, le capteur à ultrason).

❖ **Les 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 de nombre d'essieux passant sur le capteur en cumulant les impulsions dans un compteur. Les comptages sont par suite exprimés en unité de voiture particulière u.v.p.: 1 u.v.p. = 2 essieux.

Ces capteurs, encore répandus pour les comptages routiers, présentent quelques avantages, notamment

- la facilité de pose
- la bonne portabilité de l'ensemble capteur-détecteur
- la possibilité de fonctionnement sur batterie procurant une autonomie de plusieurs jours.

En revanche, le système est d'un coût moyen élevé. De plus, le câble peut être arraché lors du passage de véhicules lourds.

❖ **Les 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. A titre d'exemple, à la fin de l'année 1986, le recueil des données de trafic du réseau autoroutier de Los Angeles était constitué de 6380 boucles¹ couvrant 965 km environ.

Le capteur est constitué par 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.

Avec une seule boucle par voie, on mesure bien sûr le débit mais aussi le taux d'occupation t , défini par

$$t = \frac{100 \sum_{i=1}^n t_i}{T}$$

où t_i désigne le temps d'occupation de la boucle à la période de mesure i , et T le temps total de mesure.

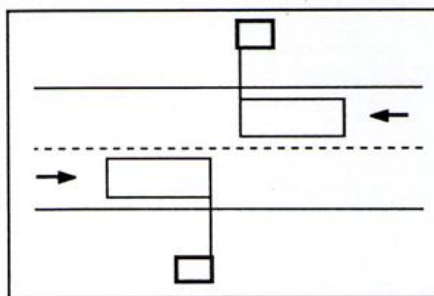


Figure 1.3 : Exemple d'implantation de boucles sur une chaussée à deux voies [8]

Le principe de fonctionnement est schématisé par la figure suivante. Lorsque l'avant du véhicule aborde la boucle, le front de montée du créneau se forme. Quand le véhicule parcourt la boucle, le créneau a une amplitude constante. Enfin, le front descendant du créneau se forme lorsque l'arrière du véhicule quitte la boucle.

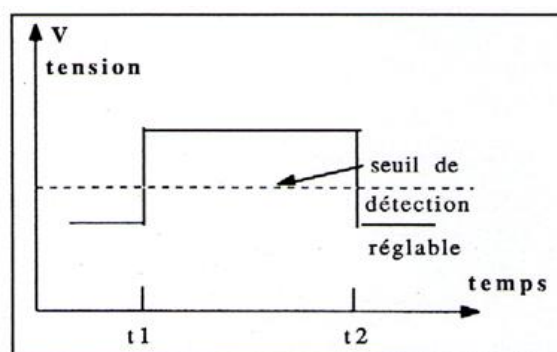


Figure 1.4 : Principe de la détection par boucle électromagnétique [8]

Avec 2 boucles par voie, de longueur l et distante de d , on mesure en plus la vitesse instantanée v des véhicules.

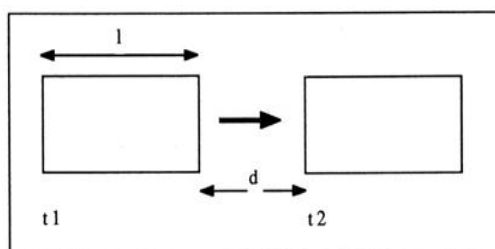


Figure 1.5 : Mesure de la vitesse avec deux boucles [8]

On a en effet

$$v = \frac{1 + d}{t_2 - t_1}$$

où t_1 (resp. t_2) désigne l'instant d'entrée sur la première (resp. seconde) boucle.

La vitesse moyenne d'un flot de n véhicules peut être calculée comme la moyenne harmonique des vitesses instantanées.

L'avantage de cette technologie réside dans son faible coût, négligeable devant celui des travaux de génie civil nécessaires à l'installation. Une fois implantée, la boucle a une durée de vie importante. Cependant, la fiabilité globale du système est fortement liée à la qualité des réglages et à la qualité de la maintenance. [8]

❖ Les détecteurs ultrasons à effet Doppler :

Ce type de détecteurs mesure la vitesse des véhicules mobiles par l'utilisation des ondes Doppler ultrasonores. Le capteur est constitué par une antenne fixée sur un portique au dessus et dans l'axe de la voie de circulation (figure 1.6). Cette antenne émet constamment des ondes ultrasonores à vitesse w et lors du passage d'un véhicule circulant à vitesse v , l'onde émise rencontre une surface réfléchissante. A partir de la différence entre la fréquence de l'onde ultrasonore source et celle réfléchiée, la vitesse relative du véhicule par rapport au capteur peut ainsi être mesurée. La durée de la mesure permet aussi le calcul du taux d'occupation et le comptage de véhicules. La vitesse d'un véhicule est mesurée avec une précision de 10% de sa valeur réelle. [4]

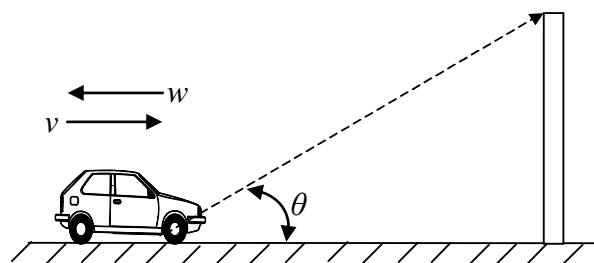


Figure 1.6. Détecteur ultrasons à effet Doppler. [4]

I.5. Etat de l'art sur les modèles de flux de trafic routier :

Avant de passer en revue les différents modèles de flux de trafic routier que l'on peut trouver dans la littérature, il est important de présenter les éléments caractéristiques d'une circulation de véhicules dans un réseau routier. Il s'agira également de définir l'intérêt d'obtenir un modèle de flux de trafic routier. Un modèle de flux de trafic routier ne peut pas présenter de part son caractère abstrait en tout point les situations réelles rencontrées. Plusieurs types de modèles existent donc dans la littérature. De plus, et ceci de manière à simplifier les approches de modélisation que l'on peut rencontrer, il est possible de distinguer, de façon arbitraire, deux types de milieu à analyser :

- ✓ Les milieux urbains où le trafic est très hétérogène et variable (présence de carrefours, de feux de signalisations, passages piétons - le réseau est très maillé avec beaucoup de changement de structure).
- ✓ Les milieux interurbain où le trafic est plutôt invariable ou peu variable (les voies rapides et les autoroutes présentent peu de changements de structure – rampes d'entrée et de sortie, des rétrécissements), ils sont relativement homogènes.

Différentes situations peuvent ensuite être prises en considération, ce qui peut permettre une répartition des modèles en plusieurs groupes selon des critères de comportement individuel ou de comportement global de chaque véhicule.

Les différents modèles du trafic routier sont issus le plus souvent du raisonnement basé sur la similarité qui peut être faite entre un flux de véhicules et des phénomènes physiques comme : l'écoulement d'un fluide dans une canalisation, la propagation d'une onde, le déplacement de particules dans un milieu homogène ou hétérogène, etc.

Différents modèles existent également suivant la granularité selon laquelle le flux de véhicules est représenté, ce qui a conduit les auteurs à distinguer jusqu'à aujourd'hui trois grandes familles de modèles (Papageorgiou M. 1998), (Leclercq (2002), (Bourrel (2003) (schéma 1.1) :

- Les Modèles microscopiques (de choix d'itinéraire) – dynamique des véhicules individuels.
- Les Modèles mésoscopiques – dynamique par groupe de véhicules homogènes.
- Les Modèles macroscopiques (d'écoulement) – dynamique globale basée sur l'idée du mouvement d'un fluide.

Chacune des trois familles impacte un comportement différent sur un réseau routier en intégrant des lois de propagation des véhicules, un choix d'itinéraires et des conditions de circulation différents.

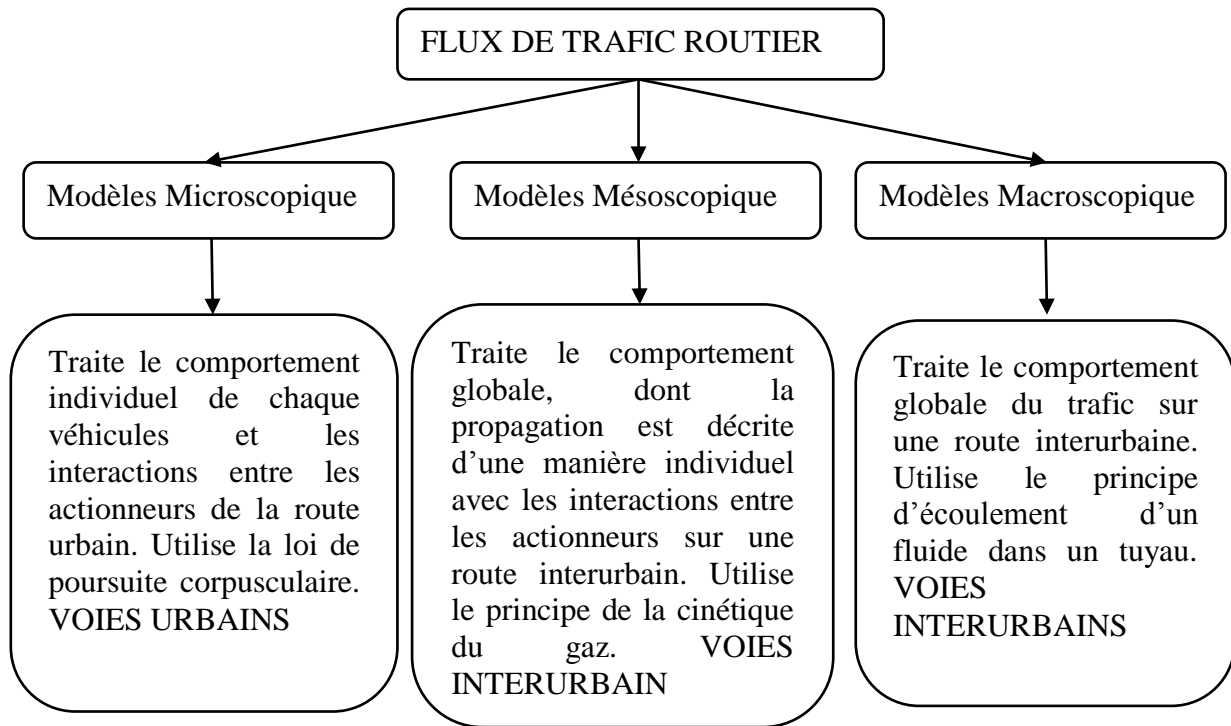


Figure 1.7 : Classification des modèles du flux de trafic.

I.5.1. Les modèles microscopiques :

Un « MODELE DE TRAFIC MICROSCOPIQUE » représente une situation de circulation, généralement dans des zones urbaines, basé sur un comportement individuel des véhicules. C'est chaque couple véhicule-conducteur avec leur interaction avec chaque participant dans la circulation (environnement) que le modèle représente. Les interactions entre les véhicules sont prises comme un phénomène corpusculaire (interaction moléculaire). Le comportement de chaque véhicule est pris individuellement. C'est une loi de poursuite corpusculaire qui est utilisée dans ce type de modèle pour expliquer le comportement global du trafic. Dans le cas d'une représentation de circulation multivoies et afin de rendre le comportement global plus

réaliste, il est possible d'associer deux types de comportement des véhicules différents dans le même modèle :

- le premier exprime le phénomène de la voiture-suiveuse (1.1) (fig.1.8) ;

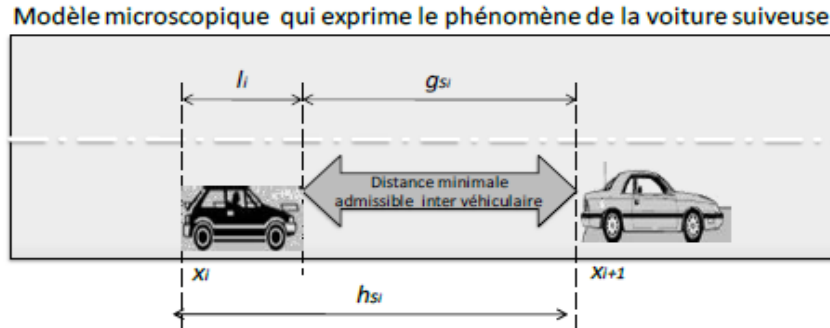


Figure.1.8 : Modèle de la voiture suiveuse

$$h_{si}(t) = g_{si}(t) + l_i \text{ où } h_{si}(t) = x_{i+1}(t) + x_i$$

$$h_{ii}(t) = g_{ii}(t) + \rho_i(t)$$

$g_{ii}(t)$ – espace entre le véhicule i et $i+1$, $h_{si}(t)$ – espace total admissible, $h_{ii}(t)$ – temps total admissible, $\rho_i(t)$ – temps d'occupation.

- le deuxième modèle exprime le changement de voies (fig.1.9).

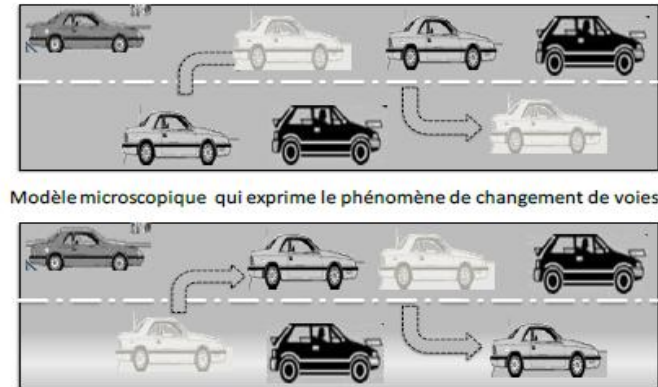


Figure.1.9 : Modèle de changement de voie.

$$\partial_t \rho_j(x, t) + v \partial_x \rho_j(x, t) = \partial_t \rho_j(x, t)_{acc} + \partial_t \rho_j(x, t)_{int} + \partial_t \rho_j(x, t)_{diff-v} + \partial_t \rho_j(x, t)_{change-voie}$$

j – voie, $\partial_t \rho_j(x, t)_{acc}$ – terme d'accélération, $\partial_t \rho_j(x, t)_{diff-v}$ – terme de diffusion de la vitesse, $\partial_t \rho_j(x, t)_{int}$ – terme d'interaction, $\partial_t \rho_j(x, t)_{change-voie}$ – terme de changement de voie.

Le modèle de changement de voie est complexe et prend en considération non seulement les distances admissibles entre les véhicules et les temps de réponse du conducteur lors d'un événement qui peut survenir en aval, mais aussi les conditions de circulation sur les voies adjacentes. Les vitesses limites autorisées doivent être respectées (ou pertes de vitesses pour les véhicules en amont) ainsi que les concentrations entre les différentes voies. Le nombre de variables à prendre en compte dans un tel modèle est très important, à cette échelle il s'agit de mémoriser à chaque instant : la position, la vitesse et l'accélération de chaque véhicule, ainsi que les distances inter-véhiculaires admissibles ce qui rend ce type de modèle complexe à utiliser dès lors que le réseau routier à représenter est lui-même important.

Dans un modèle microscopique de trafic routier, il est relativement difficile de décrire avec précision le comportement individuel des conducteurs. L'écoulement du trafic résulte du comportement individuel qui a été intégré dans le modèle. Souvent les phénomènes sont représentés sur la base d'observations empiriques. A l'échelle microscopique, un changement de situation en aval ne provoquera nécessairement pas un changement sur le comportement du couple véhicule-conducteur si celui-ci n'a pas été intégré à l'avance. Les modèles microscopiques sont donc souvent simplifiés et ne considèrent qu'un comportement des conducteurs de façon unique.

I.5.2. Les modèles mésoscopiques :

Un « MODELE DE TRAFIC MESOSCOPIQUE » représente le trafic routier sous forme de paquets de véhicules dont la progression est décrite individuellement. Ce type de modèle donne une représentation d'un système de flux de trafic routier qui se situe entre les modèles microscopiques et les modèles macroscopiques.

Le flux de trafic est décomposé en sous-groupes de véhicules ayant des caractéristiques équivalentes en leur ajoutant une destination déterminée et un itinéraire donnés. Le premier modèle mésoscopique proposé est celui de Prigogine, Hoogendorn. Il est basé sur la cinétique des gaz et décrit la dynamique de réduction de la densité spatio-temporelle. Prigogine et Herman ont ensuite introduit deux termes à cette première équation décrivant la dynamique de l'ensemble du flux routier. Le premier terme décrit le changement de la densité causé par l'accélération conduisant à la vitesse désirée et le deuxième terme correspond au changement de la densité provoqué par les interactions entre les véhicules eux-mêmes. Le modèle mésoscopique est représenté par la relation (1.1.3) :

$$\frac{\partial \rho(x, t, v)}{\partial t} + v \frac{\partial \rho(x, t, v)}{\partial x} = \frac{\partial \rho(x, t, v)_{acc}}{\partial t} + \frac{\partial \rho(x, t, v)_{int}}{\partial t}$$

$\frac{\partial \rho(x, t, v)_{acc}}{\partial t}$ – changement de la densité causé par l'accélération

$\frac{\partial \rho(x, t, v)_{int}}{\partial t}$ – changement de la densité provoqué par les interactions entre les véhicules

Les auteurs proposent que les changements de l'état du système sont provoqués en général par:

- l'accélération afin de conduire à la vitesse désirée ;
- la décélération provoquée par les événements en aval.
- les conducteurs ;

I.5.3. Les modèles macroscopiques :

Un « MODELE DE TRAFIC MACROSCOPIQUE » représente le comportement global du flux de trafic. Ces modèles sont développés sur la base d'une analogie hydrodynamique selon laquelle le flux de véhicules peut être assimilé à un fluide compressible en déplacement continu.

Les premiers modèles macroscopiques sont issus des travaux indépendants de Lighthill et Whitham en 1955 et de Richards l'année suivante Richards (1956). Ils ont conduit aux modèles dits du premier ordre de type LWR. Néanmoins, les modèles de ce type possèdent plusieurs désavantages qui se résument en un nombre de suppositions irréalistes. Plus tard les modèles de type Payne, dits du deuxième ordre, éliminent les principaux défauts du modèle LWR. De nombreux autres modèles sont proposés dans la littérature, ils sont en général tous issus de ces modèles de base. [9]

Une classification simplifiée des modèles macroscopiques peut être représentée sur le schéma.1.3 suivant :

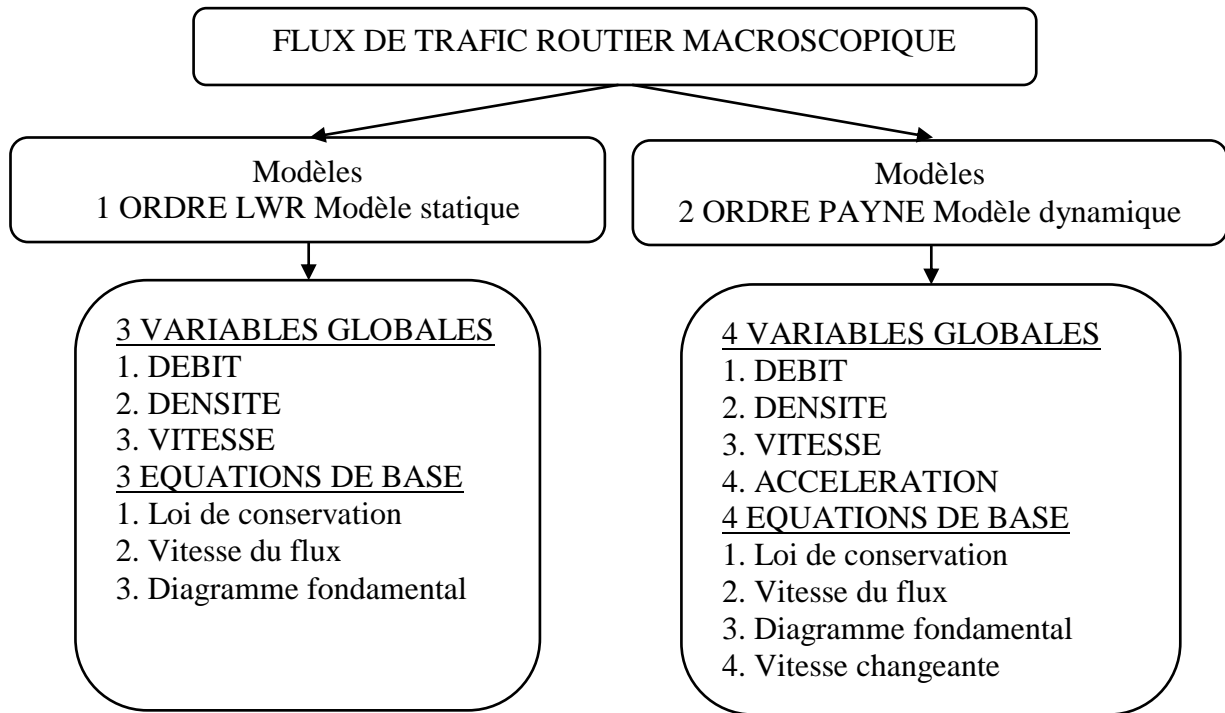


Figure.1.10 : Classification des modèles du flux de trafic macroscopiques [9]

I.6. 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.

I.6.1. L'écart du temps inter-véhiculaire :

Le premier concept introduit est l'écart du temps inter-véhicule (en anglais, « *the headway* »). En un point donné de la route, c'est le temps qui s'écoule entre les instants de passage de deux véhicules successifs (voir Figure 1.11).

Cette variable se révèle particulièrement utile dans les études relatives à la sécurité routière et dans de nombreux problèmes de simulation du trafic. Certains algorithmes de régulation de carrefours à feux en ville, utilisent ce temps inter-véhiculaire. Sur autoroute, la « *régulation*

d'intervalles » continue aujourd'hui d'être une mesure d'exploitation de plus en plus répandue. Enfin, ce paramètre permet d'appréhender les effets de la composition du trafic sur les conditions d'écoulement de la circulation.

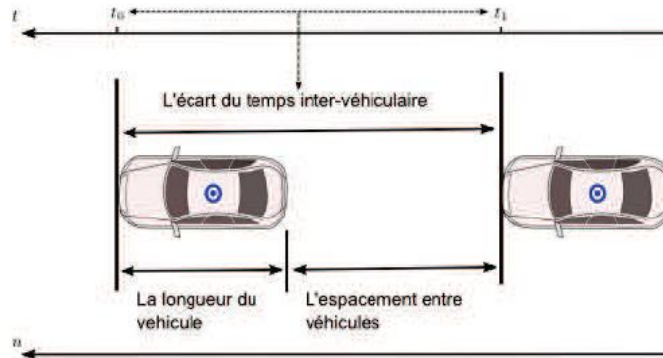


Figure 1.11 : L'écart du temps inter-véhiculaire.

L'observation expérimentale permet l'obtention des distributions empiriques de ces écarts. Outre les caractéristiques habituelles de position et de dispersion, ces distributions empiriques fournissent plusieurs indicateurs utiles comme par exemple la « *proportion d'intervalles courts* », c'est-à-dire inférieurs à un seuil considéré comme dangereux.

Les caractéristiques de ces distributions varient selon le type de la route, le niveau du trafic, sa composition, les conditions météorologiques et celles de visibilité,...

I.6.2 Le débit :

Il correspond à la répartition des véhicules dans le temps. On définit tout d'abord le débit moyen $q(t_1, t_2, x)$ au point d'abscisse x entre les instants t_1 et t_2 par le rapport :

$$q(t_1, t_2, x) = \frac{n(t_1, t_2, x)}{t_2 - t_1}$$

Dans lequel $n(t_1, t_2, x)$ désigne le nombre de véhicules passés en x entre les 2 instants. Expérimentalement, le débit peut être déterminé par de simples comptages sur la route.

Dans certaines théories, le flot des véhicules est parfois considéré comme continu. On définit alors le débit $q(x, t)$ au point x et à l'instant t par :

$$q(x, t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} q\left(t - \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}, x\right)$$

Une telle définition ne s'applique pas en ces termes à une théorie discrète de l'écoulement de la circulation, car cette limite vaudrait l'infini ou zéro, selon qu'il passerait ou non un véhicule à l'instant t . Il s'agit donc d'une schématisation mathématique. En fait, on considère qu'il y a identité entre $q(x, t)$ et $q(t - \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}, x)$ pour de petites valeurs de Δt , par exemple de l'ordre de 20 secondes.

Soulignons au passage le lien avec l'approche microscopique: le débit moyen est l'inverse de l'écart de temps inter-véhiculaire moyen h , pour un flot stationnaire (débit ne variant pas beaucoup autour de sa moyenne):

$$q = \frac{1}{h}$$

En effet, si N désigne le nombre de temps inter-véhiculaires observés durant une période de temps T , au passage en un point donné, alors :

$$T = \sum_{i=1}^N h_i = N * h_{moy}$$

Où h_{moy} désigne l'intervalle de temps moyen. Le débit mesuré q_i vaut donc :

$$q = \frac{N}{T} = \frac{1}{h_{moy}}$$

Remarque: Si l'on associe un débit individuel q_i au passage de chaque véhicule $[i]$, on a :

$$q_i = \frac{1}{h_i}$$

Calculé à partir de ces débits, le débit moyen q correspond à la moyenne harmonique des débits individuels. En effet :

$$q = \frac{1}{h_{moy}} = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i} = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{q_i}}$$

I.6.3. La concentration (ou la densité) :

Elle décrit la répartition des véhicules dans l'espace. La concentration moyenne $k(x_1, x_2, t)$ à l'instant t sur une section de route limitée par les points d'abscisses x_1 et x_2 correspond au rapport :

$$k(x_1, x_2, t) = \frac{n(x_1, x_2, t)}{x_2 - x_1}$$

Dans lequel $n(t_1, t_2, x)$ désigne le nombre des véhicules présents sur la section à l'instant t .

Une telle grandeur est par exemple directement observable par photographie aérienne ou encore par caméra vidéo. Les théories continues définissent la concentration $k(x, t)$ au point x et à l'instant t par :

$$k(x, t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} q(x - \frac{\Delta x}{2}, x + \frac{\Delta x}{2}, t)$$

Sans reprendre le précédent commentaire, soulignons cependant que si Δx est de l'ordre de 50 à 100 mètres, il y a pratiquement identité entre les valeurs de $k(x, t)$ et $K(x - \frac{\Delta x}{2}, x + \frac{\Delta x}{2}, t)$.

En conclusion des approximations précédentes, relatives au débit et à la concentration, sur une petite section de route ou pendant un temps très court, il peut passer une certaine quantité de véhicules. En pratique, dans les observations et les analyses, on ne considère que des longueurs et des durées qui font que les quantités débit et concentration ainsi définies, aient bien un sens.

Si l'on observe le passage de N véhicules, on peut définir des concentrations individuelles k_i , par :

$$k_i = \frac{1}{S_i}$$

Où S_i est l'espacement du véhicule [i]. Compte tenu que la somme des espacements des véhicules L :

$$L = \sum_{i=1}^N S_i$$

La concentration moyenne k sur le segment vaut :

$$k = \frac{N}{L}$$

Comme précédemment pour les débits, la concentration moyenne est la moyenne harmonique des concentrations individuelles.

Remarquons enfin que, concentration moyenne et espacement moyen sont inverses l'un de l'autre, pour un courant de circulation stationnaire :

$$k = \frac{1}{s}$$

I.6.4 Le taux d'occupation :

Cette variable est aujourd'hui très couramment employée dans le domaine de l'exploitation. Le procédé de mesure du taux d'occupation le plus répandu fait appel à des capteurs – boucles magnétiques – enfouis dans la chaussée et sensibles aux variations du champ magnétique produites par le passage des masses métalliques des véhicules. Grandeur sans dimension, définie par la proportion de temps durant laquelle la boucle est occupée, le taux d'occupation τ est directement lié à la concentration k par la relation :

$$\tau = (L+l).k$$

Où L et l désignent respectivement la longueur moyenne des véhicules et celle du capteur. Une telle relation se relève très utile car à la différence du taux d'occupation, les procédés de mesure de la concentration sont actuellement complexes et coûteux.

I.6.5 La vitesse des véhicules et les vitesses moyennes

✓ **Vitesse instantanée d'un véhicule:** Pour un même véhicule, l'enregistrement des vitesses instantanées permet de caractériser le profil temporel de la vitesse. Cet enregistrement est utile à l'obtention de divers paramètres. Il est révélateur de la qualité du trafic sur un itinéraire et s'emploie fréquemment dans les calculs relatifs à la consommation d'énergie des véhicules. En un point fixé de la route, le recueil des vitesses individuelles des véhicules définit une distribution empirique. Pour une catégorie de véhicules donnée, ce type de distribution peut souvent être ajusté selon une loi théorique : loi normale ou loi d'Erlang.

En ville, les distributions de la vitesse instantanée ont une forme caractéristique. Le pic important constaté à l'origine révèle la part prépondérante due aux arrêts : plus de 25% du temps total de déplacement dans les agglomérations françaises.

✓ **Vitesse moyenne d'un véhicule:** Sur un parcours de durée T , la vitesse moyenne v_{moy} d'un véhicule est définie par :

$$v_{moy} = \frac{\int_0^T v(t) dt}{T}$$

Où $v(t)$ désigne la vitesse instantanée du véhicule à l'instant t .

✓ **Vitesse moyenne temporelle.** Dans l'approche macroscopique, nous nous intéressons non plus à un seul véhicule isolé mais à un ensemble de véhicules. En un point fixé de la route, la vitesse moyenne temporelle u_t , est la moyenne arithmétique des vitesses instantanées u_i des N véhicules, passant pendant un intervalle de temps indéterminé :

$$u_t = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{d_i}{t}}{N}$$

Où d_i est la distance parcourue par le $i^{\text{ème}}$ véhicule pendant la période t .

✓ **Vitesse moyenne d'espace:** La notion de vitesse moyenne d'espace u_s , définie par [J.G.Wardrop 1952], s'avère plus utile en pratique. Ainsi, sur une section de route de longueur fixée, la moyenne arithmétique des vitesses des véhicules à un instant donné est :

$$u_s = N \cdot \frac{d}{\sum_{i=1}^N t_i}$$

Où t_i est le temps nécessaire au $i^{\text{ème}}$ véhicule pour parcourir la distance d .

Les deux concepts de vitesse ainsi définis sont différents. Pour un flot de circulation à l'état stationnaire, nous établissons la relation suivante :

$$u_s = u_t + \frac{\sigma^2 s}{u_t}$$

Où σ désigne l'écart-type de la distribution des vitesses dans l'espace. On observe donc l'inégalité $u_t \geq u_s$. D'autre part, l'espace moyen s , l'écart de temps moyen h et la vitesse moyenne u_s sont liés par:

$$h = \frac{s}{u_s}$$

I.6.6. Le diagramme fondamental :

Le trafic est supposé homogène et stationnaire. Autrement dit, le débit, la concentration et la vitesse varient peu autour de leurs moyennes respectives q , k et u . A faible concentration de véhicules, nous observons une vitesse moyenne de flot généralement élevée, appelée vitesse libre ou vitesse désirée u_{max} . A l'inverse, lorsque k augmente, les espaces entre les véhicules deviennent plus importantes et u diminue. Ce constat suggère que u est une fonction décroissante de k . L'hypothèse $u=u(k)$ s'appelle hypothèse du diagramme fondamental. La courbe observée est dans la Figure 1.12.

Compte tenu de la relation liant les trois variables, la loi d'écoulement du trafic sur une section de route peut donc être formulée par une fonction liant deux des trois variables : débit, concentration et vitesse.

Le diagramme fondamental est sensible à de nombreux facteurs comme la géométrie de la route, la nature et la composition du trafic, les conditions météorologiques, les mesures d'exploitation, ... [2]

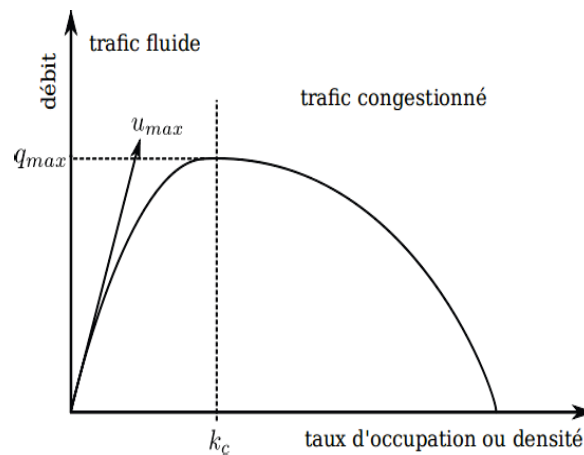


Figure 1.12 : Le diagramme fondamental. [2]

I.7. Conclusion :

Le développement considérable de la circulation automobile et l'accroissement constant de la motorisation ont rendu nécessaire l'élaboration de 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.

La théorie du trafic a donné naissance à plusieurs modèles pour l'étude et l'analyse du comportement et des phénomènes qui régissent son écoulement à différents niveaux de détails, dans ce contexte, nous avons identifié trois classes principales de modèles, La première repose sur des considérations microscopiques et s'intéresse au véhicule individuel et ses interactions avec son environnement. Située au niveau intermédiaire, la seconde classe regroupe les modèles mésoscopiques, Ces modèles étudient le comportement d'un paquet de

véhicules caractérisés par des propriétés identiques, Enfin, la troisième classe, ignore le véhicule individuel et s'intéresse au mouvement du flux considéré d'un point de vue macroscopique.

Chapitre 2

Les Systèmes dynamiques hybrides

2.1. Introduction	28
2.2. Comportement hybride des systèmes dynamiques	28
2.3. Notions de Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH)	30
2.3.1. Définition des Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH)	30
2.4. Caractéristiques des systèmes	32
2.5. Structure d'un système hybride	34
2.6. Classification des comportements hybrides	35
2.6.1. Commutations autonomes	36
2.6.2. Commutation contrôlée	36
2.6.3. Saut autonome	37
2.6.4. Saut contrôlé	37
2.7. Modélisation des systèmes dynamiques hybrides	37
2.5.1. Les Automates à états finis	38
2.5.2. Les Réseaux de Petri	39
2.5.3. Le Grafcet	40
2.7. Conclusion	47

II .1. Introduction :

En automatique, les systèmes physiques sont souvent représentés par un modèle dynamique continu ou par un modèle à événements discrets. La nature de chaque modèle est définie selon les variables utilisées pour décrire l'état du système et la variable caractérisant le temps. Il est important dans de nombreux cas d'utiliser l'une de ces deux catégories de modèles. Cependant la majorité des systèmes complexes réalistes mélangeant le continu et le discret ne peuvent pas être classés ni dans la catégorie "système continu" ni dans la catégorie "système discret". Il est nécessaire alors d'utiliser des modèles hybrides permettant la prise en compte à la fois des variables continues et des variables discrètes ainsi que l'interaction entre elles.

Les systèmes continus se caractérisent par une évolution continue de leur état dans le temps. Les modèles utilisés sont essentiellement les équations différentielles ou aux différences. Par contre, l'état des systèmes à événements discrets prend ses valeurs dans un ensemble dénombrable et évolue d'une manière discontinue en fonction de changements discrets appelés événements. [10]

Depuis les dix dernières années, une attention considérable a été portée à la recherche concernant les systèmes hybrides car ils couvrent plusieurs domaines d'applications tels les systèmes électrotechniques, la commande de processus industriels, la robotique, les systèmes de transport.

Dans ce chapitre nous ferons un état de l'art sur les systèmes dynamiques hybrides (SDH) ainsi que les différentes propriétés qui les caractérisent.

II.2. Comportement hybride des systèmes dynamiques :

Les systèmes dynamiques peuvent être classifiés suivant la nature des variables d'état. Ainsi, les premiers systèmes dynamiques étudiés sont les systèmes continus ou les variables d'état évoluent de manière continue dans le temps, telles que la position, la vitesse, la température, la pression, etc. (figure 2.1). L'outil classique de modélisation de la dynamique des systèmes continus correspond aux équations différentielles.

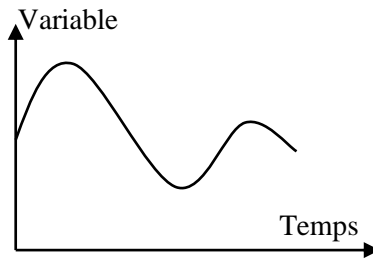


Figure 2.1 : Comportement d'une variable d'état dans un système continu. [11]

Les systèmes à événements discrets (SED) sont des systèmes où l'état change de valeurs de manière discrète dans le temps (nombre de pièces dans un stock, état d'une machine, ...). Le changement d'état est causé par l'occurrence d'un événement instantané, par exemple l'ouverture d'une vanne, l'occurrence d'une panne, ou la frappe d'une touche de clavier (figure 2.2). L'outil de modélisation de base des SED sont les automates à état finis.

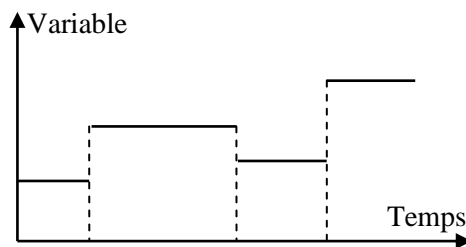


Figure 2.2 : Comportement d'une variable dans un SED. [11]

La fusion de ces deux classes de systèmes à donné lieu à une nouvelle classe dite systèmes dynamiques hybrides (SDH). Les SDH sont donc des systèmes comportant des dynamiques continues et des dynamiques événementielles en interaction. Ils sont représentés par des variables d'état continues, qui prennent leurs valeurs dans un ensemble continu (\mathbb{R}) et d'autres discrètes, prenant leurs valeurs dans un ensemble d'événements discret (\mathbb{N}). Ces variables continues et discrètes dépendent de la variable indépendante *temps*, qui peut être à son tour considérée comme continue ou discrète. [11]

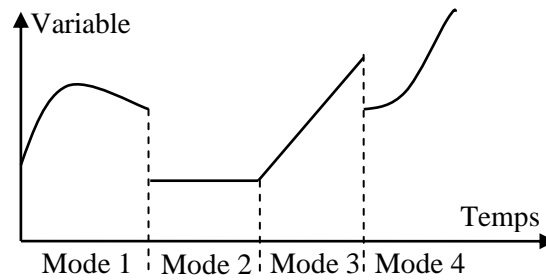


Figure 2.3 : Comportement d'une variable dans un SDH. [11]

II. 3. Notions de Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH) :

Les systèmes dans lesquels interagissent des composantes continues et discrètes sont appelés *Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH)*.

II. 3. 1. Définition des Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH) :

On peut mettre sous ce titre plusieurs définitions d'après la littérature trouvée. Mais avant de proposer ces définitions, on va citer quelques notions préliminaires nécessaires pour mettre l'image claire.

Définition II. 1 :

Une variable est dite **continue** si elle peut prendre ses valeurs dans un ensemble continu de valeurs (donc non dénombrable) et ses variations ne présentent pas de discontinuités.

Définition II. 2 :

Une variable est dite **discrète** si elle peut prendre ses valeurs dans un ensemble dénombrable de valeurs.

Les variables $V_1 \in \{0, 1\}$, $V_2 \in \{-4, 1, 3\}$, $N \in \{B, M, H\}$, $P \in \{\text{Arrêté}, \text{Démarré}, \text{Repos}\}$, sont des variables d'état discrètes.

Après ces définitions importantes et nécessaires, nous avons accueilli plusieurs définitions des SDH rencontrées dans la littérature.

Définition II. 3 :

A) Les SDH sont des systèmes dans lesquels les dynamiques discrètes et continues interagissent et où leur interaction détermine le comportement qualitatif et quantitatif de ses systèmes.

B) Les SDH sont des systèmes dynamiques faisant intervenir explicitement et simultanément des phénomènes ou des modèles de type dynamique continue et événementielle.

Ces systèmes sont classiquement constitués de processus continus interagissant avec ou supervisé par des processus discrets. Ils résultent également de l'organisation hiérarchique des systèmes de contrôle/commande complexes.

C) Les SDH sont des systèmes dont le comportement dynamique est défini par des entités ou des processus de nature différente.

D) Un SDH consiste en un système discret avec un environnement continu. On suppose que l'évolution d'un SDH est une séquence de pas continus alternée par des pas discrets. Dans chaque pas l'état du système hybride évolue d'une façon continue selon des lois dynamiques (équations différentielles par exemple) jusqu'à l'occurrence d'une transition discrète. Les transitions sont des états instantanés servent à séparer les évolutions d'état continues.

Définition II. 4 :

- Un système **discret** est tel que toutes ses variables d'état sont discrètes.

- Un système **continu** est tel que toutes ses variables d'état sont continues.

- Un système **hybride** comprend au moins : une variable d'état discrète et une variable d'état continue. [12]

II.4. Caractéristiques des systèmes :

✓ Systèmes dynamiques et systèmes statiques :

Les systèmes statiques ont une sortie qui est toujours indépendante des valeurs passées de son entrée. Les systèmes dynamiques ont une sortie qui dépend des valeurs passées de son entrée. Les équations différentielles ou aux différences sont requises pour décrire le comportement des systèmes dynamiques.

✓ Systèmes stationnaires et systèmes non stationnaires :

Le comportement des systèmes stationnaires ne change pas avec le temps. Cela implique qu'à une entrée spécifique appliquée au système correspondra toujours la même sortie.

✓ Systèmes linéaires et systèmes non linéaires :

Un système linéaire satisfait la condition suivante : $f(\lambda \times x + \mu \times y) = \lambda \times f(x) + \mu \times f(y)$, où x et y sont des vecteurs d'entrée, λ et μ des scalaires et $f(.)$ la sortie du système.

✓ Systèmes avec des variables d'état continues et systèmes avec des variables d'état discrètes :

Les variables continues prennent leurs valeurs sur l'ensemble des réels \mathbb{R} , alors que les variables discrètes prennent leurs valeurs dans un ensemble fini de valeurs distinctes, par exemple un sous-ensemble des entiers naturels \mathbb{N} .

Le temps est une variable particulière qui peut également être soit continue, soit discrète.

De plus, dans le temps discret, on distingue deux autres cas : les systèmes échantillonnés et les systèmes à événements discrets.

✓ Systèmes à temps continu, systèmes échantillonnés, systèmes à événements discrets :

Les systèmes à temps continu changent d'état continûment lorsque le temps change. Les systèmes à temps discret ne changent d'état qu'à des instants précis. Lorsque ces instants sont synchrones, réglés par une horloge, on dit que ces systèmes sont échantillonnés.

Lorsque ces instants sont asynchrones, on les appelle des événements. On définit alors les systèmes à événements discrets comme étant des systèmes à états discrets pilotés par des événements.

La figure 2.4 représente une classification des systèmes d'après les caractéristiques décrites ci-dessus. Dans cette classification, on identifie cinq types de systèmes :

- Les systèmes linéaires continus notés **SLC**. Ces systèmes peuvent être modélisés par des équations différentielles.
- Les systèmes échantillonnés à états continus sont notés **SE** continus et ceux à états discrets sont notés **SE** discrets. Ces systèmes peuvent être modélisés par des équations aux différences.
- Les systèmes discrets notés **SD**. L'évolution des variables d'état peut se faire par exemple à partir de fonctions booléennes paramétrées dans le temps.
- Les systèmes non linéaires continus notés **SNLC**.
- Les systèmes à événements discrets notés **SED**. [13].

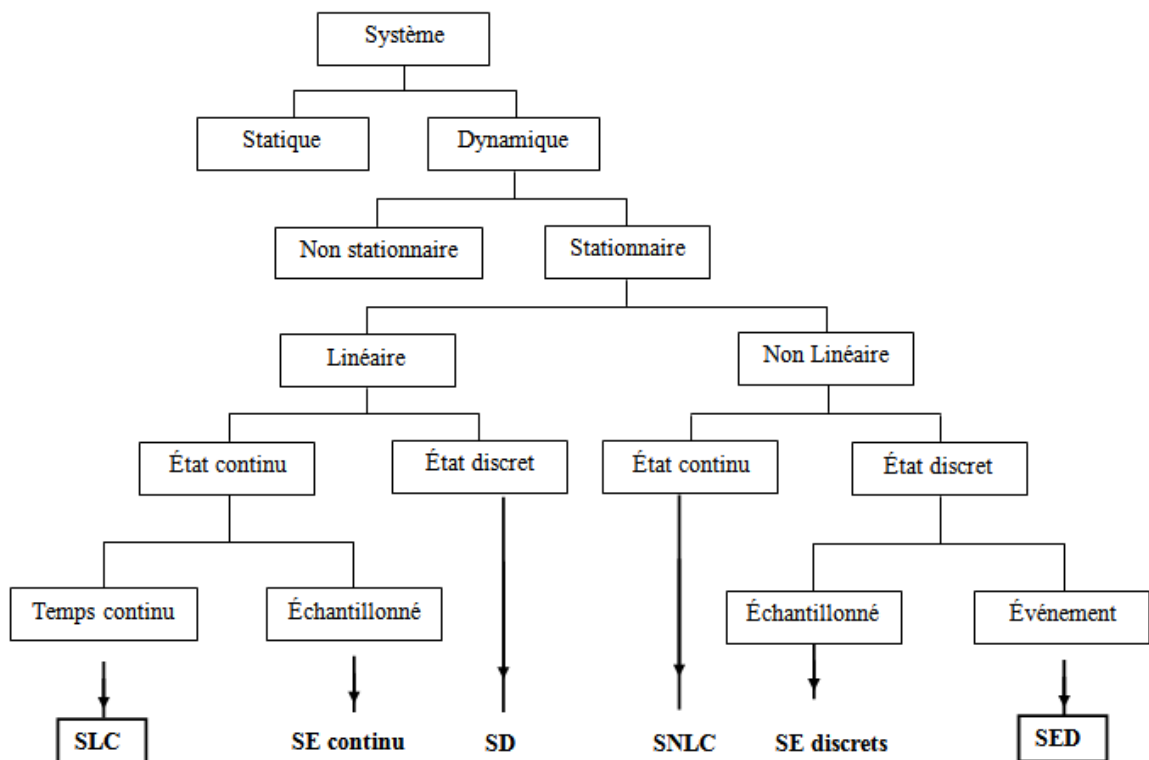


Figure 2.4 : Classification des systèmes. [13]

II.5. 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 d'un SDH sont interconnectées avec une loi qui orchestre cette interconnexion (voir Figure.5).

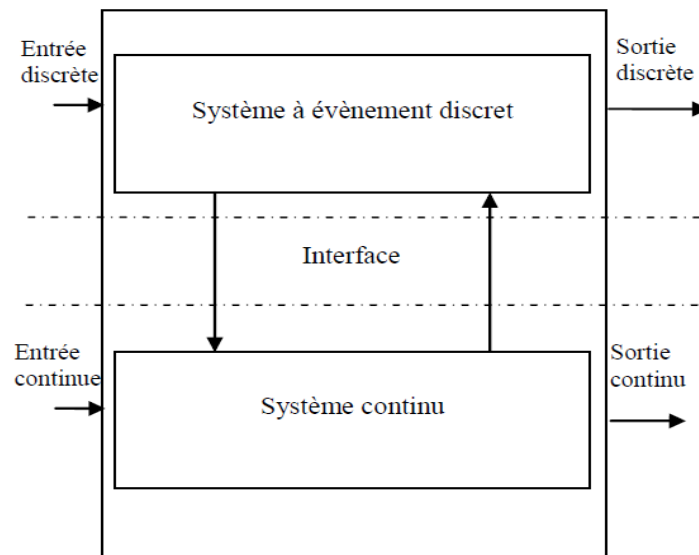


Figure 2.5 : Structure d'un système hybride.

- ✓ La partie « Système à Événements 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 [14] ou bien les réseaux de Petri [15].
- ✓ 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 évènement interne ou bien d'un évènement 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 évènements. Au niveau de la partie discrète, un évènement 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. [16]

II.6. Classification des comportements hybrides :

De manière générale, un système hybride à une dynamique continue peut être représenté par une équation différentielle :

$$\dot{x}(t) = \zeta(t), t \geq 0$$

Qui dépend de certains phénomènes discrets. Dans cette équation, $x(t)$ représente la composante continue et prends ses valeurs dans un sous espace de l'espace Euclidien. $\zeta(t)$ est un champ de vecteur dépendant généralement de $x(t)$, de la composante continue $u(t)$ de la commande et du phénomène discret.

Branicky a proposé une classification dans (Branicky, 1995, Branicky, 1998) en fonction des phénomènes discrets comme le montre la figure 2.6 :

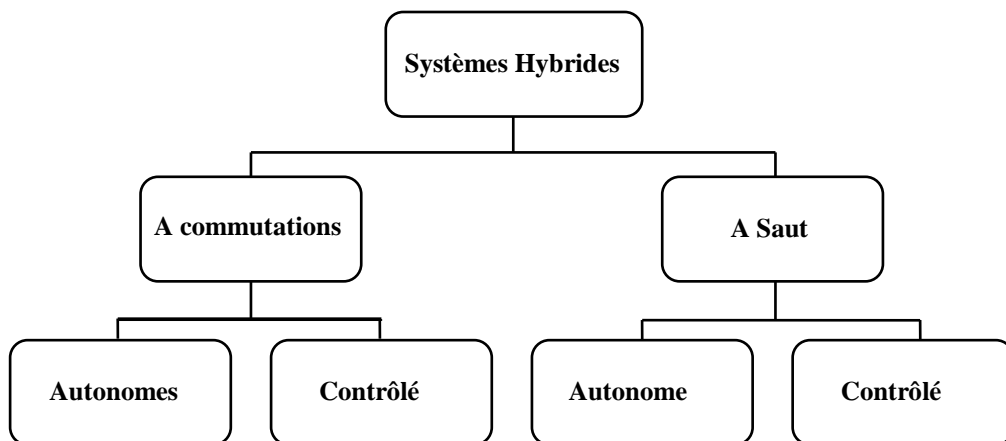


Figure 2.6 : Classification des systèmes hybrides.

II.6.1. Commutations autonomes :

Une commutation autonome est caractérisée par un changement discontinu du champ de vecteur $f(x)$ lorsque l'état atteint certains seuils. C'est le cas, par exemple, du système dont le comportement est décrit par l'équation $dx/dt = -H(x) + u$, où $H(x)$ est fonction d'hystérésis présentée en figure 2.7. Lorsque la valeur de x atteint e seuil $-h/2$ ou $+a/2$, le champ de vecteur est commuté de façon discontinue. On notera que ce système ne peut pas être modélisé par une simple équation différentielle avec un second membre discontinu, mais qu'il faut également prendre en compte le passé du système (effet mémoire de l'hystérésis) et que l'on peut modéliser celui-ci par l'automate à deux états présenté figure 2.8. [17]

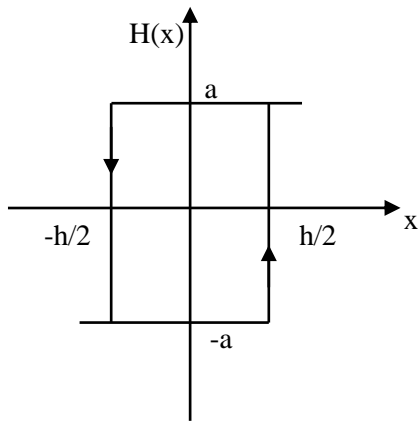


Figure 2.7 : Fonction d'hystérésis.

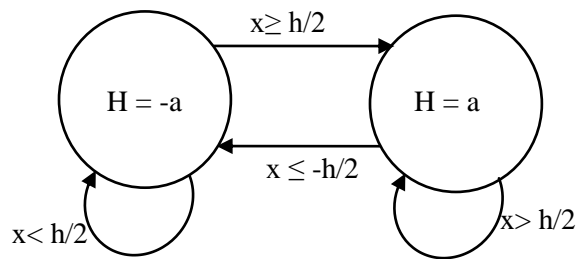


Figure 2.8 : Automate hybride associé.

II.6.2 Commutation contrôlée :

Un autre type de phénomène correspond à ce qu'on appelle la commutation contrôlée. Dans ce cas, le champ de vecteurs est commuté de façon instantanée en réponse à une commande. Considérons par exemple le modèle simplifié transmission manuelle :

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{\left[-a\left(\frac{x_2}{v}\right) + u\right]}{1 + v}$$

Où x_1 est la vitesse relative par rapport à un point fixe, x_2 la vitesse de rotation de l'engin, v la position du levier de vitesse $v \in \{1, 2, 3, 4\}$, $u \in \{0, 1\}$ la position d'accélérateur et a un

paramètre du système. Dans cet exemple, le champ vecteur est commuté par la valeur de v . [17]

II.6.3 Saut autonome :

Le second type de phénomène est appelé *saut autonome*. Dans ce cas, lorsque l'état atteint une certaine région de l'espace d'état, il effectue un saut, c'est-à-dire qu'il passe de façon discontinue de sa valeur courante à une autre. Un exemple de ce phénomène est donné par la collision de deux corps où la vitesse change brutalement et subit un saut.

Considérons une balle en chute libre qui rebondit sur le sol de façon élastique. Lors du contact avec le sol à un instant t_c , la vitesse v change de signe de façon instantanée et passe à $v = -v(t_c)$. Ce type de phénomène est en réalité engendré par une approximation lors la modélisation qui suppose que certains phénomènes sont infiniment rapides. [17]

II.6.4 Saut contrôlé :

Dans le cas du saut contrôlé, la valeur de l'état varie de façon discontinue en réponse à une commande. Un exemple d'un tel phénomène est donné par un modèle simple d'un stock où on dépose les quantités $\alpha_1, \alpha_2, \dots$, de matière aux instants $t_1 < t_2 < \dots$. L'équation d'évolution de la matière peut s'écrire:

$$\frac{dy}{dt} = -Q(t) + \sum_i \delta(t - t_i) \alpha_i,$$

Où y le niveau de la matière dans le stock, Q une fonction de dégradation ou d'utilisation, et δ l'impulsion de Dirac. [17]

II.7. Modélisation des systèmes dynamiques hybrides :

Il existe un grand nombre de formalismes qui permettent la modélisation des systèmes dynamiques hybrides. En effet, l'intérêt pour ces systèmes a connu un regain ces dernières années à la fois dans la communauté automatique et dans la communauté informatique. Parmi ces formalismes on peut citer les automates, les réseaux de Petri, les Grafcet...etc. Dans l'étude de l'art suivante nous faisons l'analyse des formalismes qui nous semblent les plus proches de notre application. [18]

II.7.1. Les Automates à états finis :

Les automates à états finis constituent le formalisme de base des SED. Le modèle décrit un système possédant un nombre d'états qui est fini. Ce type d'automates est souvent décrit par un quadruplet. Tout d'abord, trois de ces éléments principaux sont représentés sous forme d'un graphe sur lequel les états correspondent aux nœuds, les arcs aux transitions qui relient ces nœuds et les étiquettes placées sur les arcs aux événements qui déclenchent ces transitions. Enfin, le dernier élément du quadruplet donne l'état initial.

Les automates à états finis Un automate à états finis est une machine à états qui permet de décrire les évolutions possibles d'un système à événements discrets. Ainsi, le comportement d'un SED est représenté à travers un ensemble d'événements associé à un ensemble d'états. Formellement, un automate à états finis est défini par un quintuplet

$$G = (Q; \Sigma; \delta; q_0; Q_m)$$

Où :

- Q est un ensemble fini d'états ;
- Σ est un ensemble fini d'événements (ou de symboles) ;
- δ est une fonction de transition, $\delta : Q \times \Sigma \rightarrow Q$;
- $q_0 \in Q$ est un état initial ;
- $Q_m \subseteq Q$ est l'ensemble d'états finaux.

Un automate à états finis est dit déterministe si à partir d'un état donné, au plus, une seule transition est possible sur l'occurrence d'un événement.

La figure 2.9 présente l'exemple classique d'une machine qui peut être dans trois états: Arrêt (Ar), Marche (Ma), Panne (Pa). L'état initial Ar est désigné par une flèche entrant. Dans cet exemple, il y a 4 transitions associées chacune à l'un des 4 événements.

A : début du travail
B : Fin du travail
C : Panne de la machine
D : Réparation de la machine

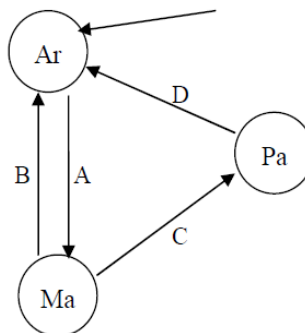


Figure 2.9 : Exemple d'automate à états finis. [19]

II.7.2. Les Réseaux de Petri :

Introduits par Carl Adam Petri en 1962, les réseaux de Petri (RdP) constituent un outil de représentation formel, graphique et mathématique très bien adapté pour la modélisation, l'analyse et le contrôle des SED. Ils disposent en effet d'une définition formelle et de nombreuses techniques de vérification automatique des propriétés (borné, vivant, réinitialisable). Ils permettent de décrire efficacement les contraintes de synchronisation, de parallélisme.

Graphiquement, un réseau de Pétri est un graphe orienté composé de deux types de nœuds : les places (cercles) et les transitions (traits). Des arcs orientés, auxquels un poids (nombre entier strictement positif) est éventuellement associé, relie les places aux transitions. Le graphe constitue la partie statique du réseau. L'aspect dynamique est introduit par les jetons qui se déplacent sur le réseau. Leur position sur les places à un instant donné est représentée par un vecteur et définit le marquage du réseau. Lorsque le poids n'est pas signalé, il est par défaut égal à un.

Le terme « réseaux de Pétri » désigne une famille de graphes orientés, munis d'un formalisme mathématique qui fait intervenir la manipulation des nombres entiers ou réels positifs ainsi que l'algèbre linéaire. Plusieurs classes de réseaux de Pétri ont été développées et étudiées.

Graphiquement, un réseau de Pétri est un graphe orienté qui comporte deux types de nœuds : les *places* représentées par des cercles et les *transitions* représentées par des traits (figure 2.10). A chaque place est associé un *marquage* qui est un nombre entier correspondant au nombre de jetons dans la place. Un *jeton* est un petit disque noir qui représente généralement une ressource disponible dans la place où il se trouve. Le marquage initial indiqué sur la figure 2.9 est $(1, 0, 1, 0, 0, 2, 0)$. Le marquage correspond à l'ordre croissant des indices, c'est à dire à $(P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7)$. Le *franchissement* consiste à retirer un jeton de chacune des places d'entrée et à rajouter un jeton à chaque place de sortie de la transition franchie. Le franchissement de *T1* conduirait au marquage $(0, 1, 1, 0, 0, 2, 0)$.

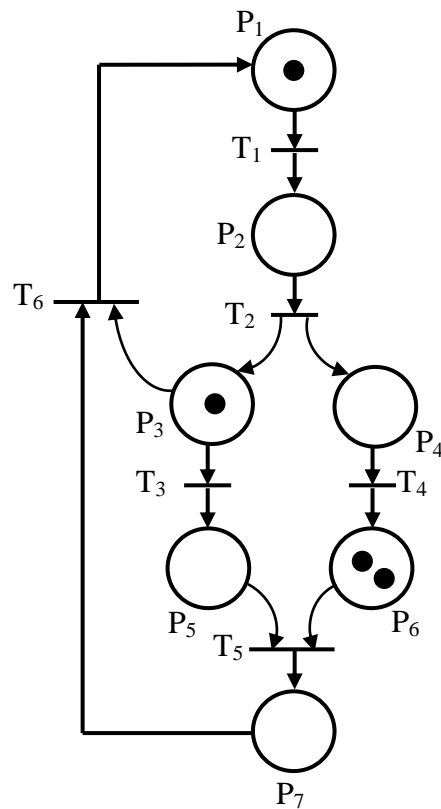


Figure 2.10 : Modèle D'un RdP. [20]

II.7.3. Le Grafcet :

Le GRAFCET est un outil qui a été élaboré par l'**AFCET** (Association Française pour la Cybernétique Économique et Technique) en 1977. Le mot GRAFCET est l'acronyme de **GRAPhe Fonctionnel de Commande d'Étapes-Transitions**.

Le GRAFCET a fait l'objet d'une norme française en juin 1982 (**NFC 03-190**).

Le GRAFCET est un langage graphique pour décrire, étudier, réaliser et exploiter les automatismes. Il est composé d'un ensemble d'étapes et de transitions représentant le déroulement du cycle de l'automatisme. Cette représentation graphique permet une meilleure compréhension de l'automatisme par tous les intervenants.

Un Grafcet est représenté par un graphe qui comporte deux types de nœuds, les étapes et les transitions (un Grafcet contient au moins une étape et une transition). Des arcs orientés relient soit une étape à une transition, soit une transition à une étape.

Éléments de base

Le Grafcet est un graphe constitué de séquences d'étapes et de transitions reliées par des liaisons orientées (figure 2.11).

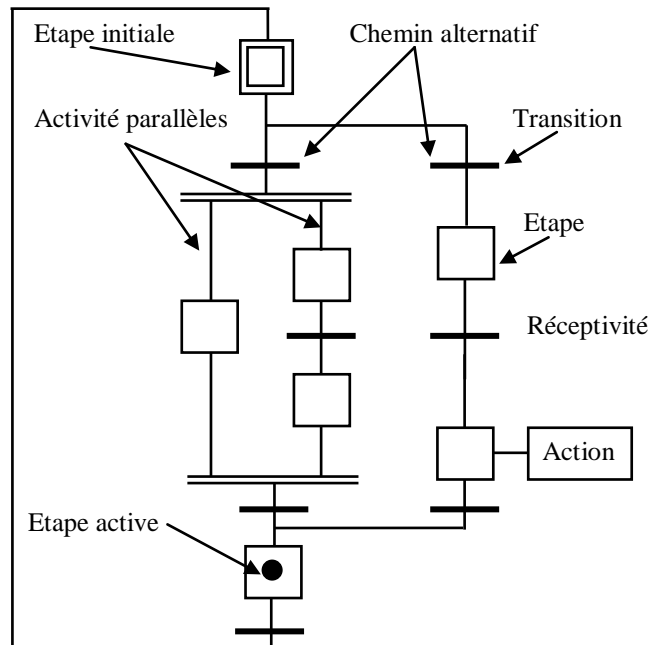


Figure 2.11 : Concepts de base du Grafcet. [21]

Étape : L'étape représente un état dans lequel l'automatisme est invariant vis à vis de ses entrées/sorties. Elle peut être active ou inactive. L'état du Grafcet est défini, à un instant donné, par l'ensemble de ses étapes actives.

Transition : La transition traduit la possibilité d'évolution d'un état vers un autre. Cette évolution est la conséquence du franchissement de la transition. Une transition est validée si toutes ses étapes immédiatement amont sont actives.

Liaison orientée : Une liaison orientée relie une étape à une transition et inversement. Elle indique les configurations atteignables à partir d'un état donné.

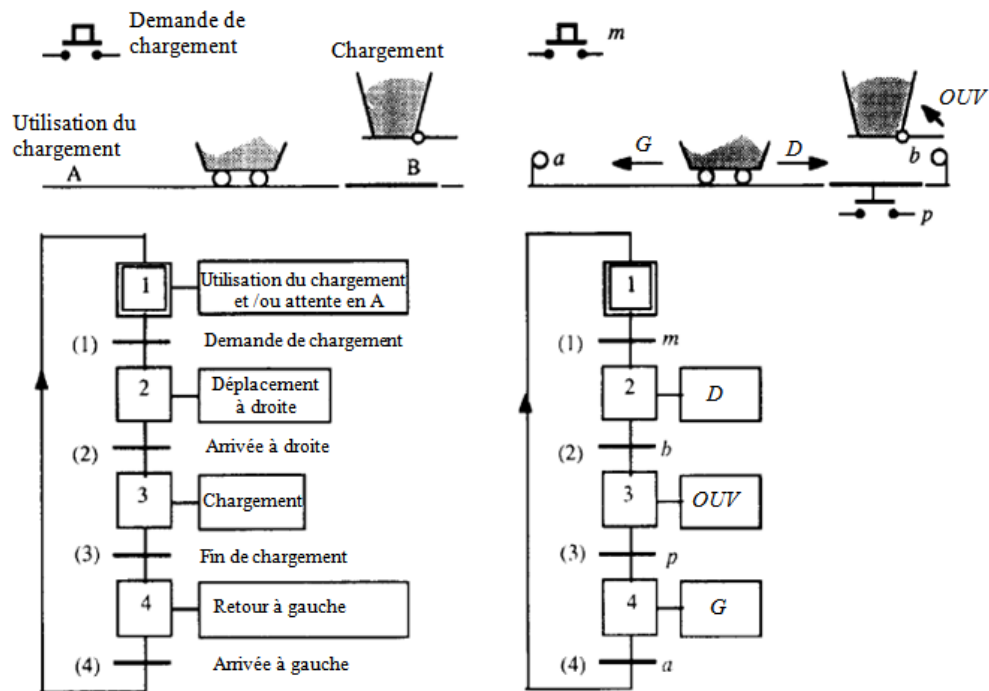


Figure 2.12 : exemple d'un Grafcet. [20]

Nous allons présenter Un exemple simple (figure 2.12). Considérons la figure d'un wagonnet peut se déplacer entre les points A et B. En A, un opérateur peut demander le chargement du wagonnet va jusqu'au point B, Lorsqu'il y arrive, le chargement s'effectue par l'ouverture d'une trémie, Dès que le chargement est terminé, la trémie se ferme et wagonnet revient jusqu'en A où sa charge est utilisée. Il repartira quand un nouveau chargement sera demandé par l'opérateur. A l'état initial, le wagonnet est en attente au point A. le **Grafcet " fonctionnel"** définissant ce fonctionnement est représenté sur la figure 2.11.

- **Les réseaux de Petri continus**

Dans un réseau de Petri ordinaire, le marquage d'une place est discret et, pour un système complexe, l'analyse du réseau qui en résulte conduit souvent à l'énumération d'un très grand nombre d'états accessibles. Afin de rendre le modèle plus compact, une autre forme de réseau de Petri, le *réseau de Petri continu*, étend l'évolution du marquage dans l'espace des réels et considère le franchissement des transitions comme un processus continu. Le franchissement des transitions n'est désormais plus instantané puisque la marque 4 franchit la transition par quantité infinitésimale; dans ce contexte, des vitesses de franchissement sont associées aux

transitions. Selon la nature de ces vitesses de franchissement, plusieurs modèles dérivent des RdP continus: les *RdP continus à vitesses constantes* [22], les *RdP continus à vitesses variables* [22], les *RdP continus asymptotiques* [23]. Nous nous sommes intéressés dans cette thèse par les *RdP continus à vitesses constantes*

- **Définitions et règles de fonctionnement**

Définition RdPCC. Un RdP continu à vitesses constantes est un sextuplet $R = \{P, T, V, \text{Pré}, \text{Post}, M_0\}$.

Les définitions de P, T, Pré, Post sont identiques à celles des RdP discrets, excepté que Pré et Post peuvent correspondre à des nombres réels.

V est une application de l'ensemble T des transitions de R dans l'ensemble des nombres $R^+ \cup \{\infty\}$. La vitesse $V(T_j) = V_j$ correspond à la vitesse maximale de franchissement de la transition T_j .

M_0 est le marquage initial du RdP continu. C'est un vecteur de nombres réels positifs ou nuls que l'on peut aussi noter $M_0 = M(0)$, sachant que $M(t)$ dénote le marquage à l'instant t. [20]

- **Fonctionnement d'un RdP à vitesses constantes: RdPCC**

Nous allons d'abord présenter de manière intuitive le fonctionnement d'un RdPCC. L'exemple du système à réservoir de la figure 2.13 a comprend deux réservoirs et une pompe. Le réservoir 1 se vide dans le second par l'effet de la gravité à la vitesse V_1 . Le réservoir 2 se vide à la vitesse V_2 grâce à une pompe P qui a son tour remplit le réservoir 1 et ainsi de suite. Ce système est continu et peut être représenté par le RdP continu de la figure 2.13 b. Deux places continues représentent les réservoirs 1 et 2. Le marquage de ses places indique la quantité d'eau initiale présente dans les réservoirs. Les vitesses V_1 et V_2 sont associées aux transitions T_1 et T_2 . Dans un premier temps, la place P_1 se remplit à la vitesse V_2 et se vide à V_1 . La place P_2 a exactement la dynamique opposée. D'où les équations :

$$m_1 = V_2 - V_1; \quad (1)$$

$$m_2 = V_1 - V_2. \quad (2)$$

et

$$m_1(t + dt) = m_1(t) + (V_2 - V_1) dt; \quad (3)$$

$$m_2(t + dt) = m_2(t) + (V_1 - V_2) dt. \quad (4)$$

m_1 et m_2 étant les marquages des places P_1 et P_2 respectivement.

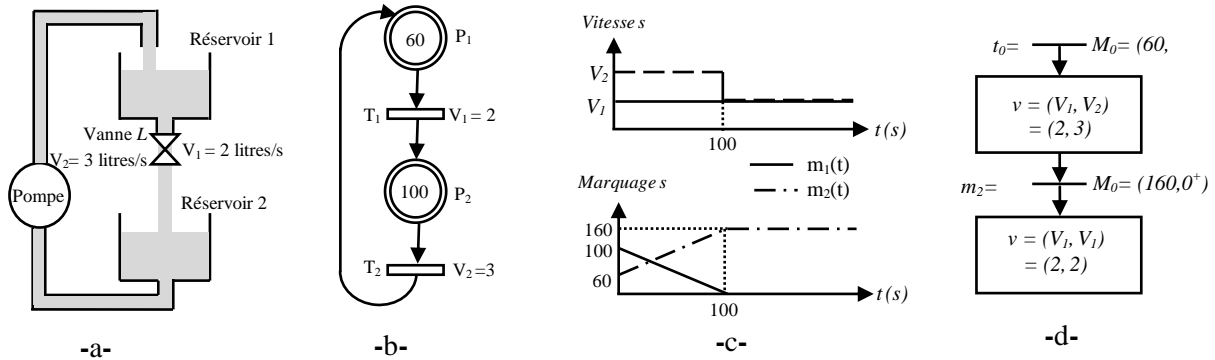


Figure 2.13 a) système à réservoir d'eau, b) RdP continu équivalent, c) Dynamique des marquages et évolution de vitesses, d) Graphe d'évolution d'un RdPCC.

Les vitesses $v_1(f)$ et $v_2(f)$ représentent les vitesses instantanées de franchissement des transitions T_1 et T_2 . Elles ont pour valeurs maximales V_1 et V_2 . Les vitesses associées aux transitions d'un RdP continu sont les vitesses maximales (figure 2.14b).

D'une part, selon que V_1 est supérieure à V_2 ou inversement, un des marquages, m_1 ou m_2 va s'annuler (équations 3 et 4). D'autre part, Un marquage ne peut pas être négatif. Il s'ensuit qu'*au moment du passage d'un marquage à zéro, les dynamiques vont changer.*

Les évolutions données par la figure 2.13 c sont obtenus en prenant $V_1 = 2$ l/sec, $V_2 = 3$ l/sec. $m_1(0) = 60$ litres et $m_2(0) = 100$ litres. Le comportement possède donc 2 phases. Une première phase pour $t \in [0, 100]$ où les vitesses sont constantes égales à $(v_1, v_2) = (V_1, V_2)$ et où l'évolution des marquages se fait selon les équations 3 et 4. Une deuxième phase où le vecteur de vitesses est constant à $(v_1, v_2) = (V_1, V_1)$, la dynamique des marquages devenant alors nulle. Les vitesses sont constantes par intervalle de temps, elles changent lors du passage d'un marquage à zéro. La dynamique des marquages de ce système est donc **constante par morceaux**.

- **Graphe d'évolution d'un RdPCC**

Le nombre de marquages d'une place étant infini dans les RdP continus, on ne peut pas établir de graphe de marquages. Cependant, les vecteurs vitesses instantanées de franchissement restent constantes dans des intervalles donnés. De ce fait, nous pouvons nous baser sur les vecteurs de franchissement ainsi que sur les vecteurs de marquages du RdP à chaque changement de dynamique pour définir complètement l'évolution de ce RdP. Ou construit donc un graphe d'évolution comme un RdP où chaque place représente un **IB-état** et

où à chaque transition est associé l'événement qui provoque le changement de l'état des vitesses (un changement de marquage). Un **IB-état** est une phase d'évolution du RdP où *le vecteur de vitesses instantanées reste constant*.

Déterminons le graphe d'évolution correspondant au RdP de la Figure 2.13 b. Le marquage initial est $M_0 = (60, 100)$ et à cet instant $v = (V_1, V_2) = (2, 3)$ (Figure 2.13 c). Ce vecteur vitesse restera constant jusqu'à l'instant $t_1=100s$ où m_2 atteint la valeur zéro (noté $m_2 = 0$ devant la transition correspondante). L'instant d'occurrence de cet événement est noté après la barre /. Ce marquage nul va entraîner un changement du vecteur vitesses à $v = (V_1, V_2) = (2, 2)$. Lorsque tous les bilans dynamiques B_i sont positifs ou nuls, le graphe d'évolution est obtenu. Figure 2.13 d.

- **Les réseaux de Petri hybrides :**

Les RdP continus sont bien adaptés pour modéliser un fonctionnement permanent. Cependant, dans un système de production par exemple, une machine peut tomber en panne et la vitesse maximale correspondante devient nulle au lieu de V . Ceci est équivalent à avoir brusquement un autre RdP continu. Cette situation peut être modélisée par un RdP hybride contenant des places et des transitions continues (C-places et C-transitions) contenant des places et transitions discrètes (D-places et D-transitions). Figure 2.14.

Pour distinguer les D-places des C-places et les D-transitions des C-transitions, on utilise la représentation de la figure 2.15. Le marquage d'une C-place est représenté par un nombre réel, dont l'unité est appelée marque, et le marquage d'une D-place est représenté par des ronds, appelé jetons (ou marques quand un mot commun est utilisé).



Figure 2.14 : Nœud d'un RdP hybride.

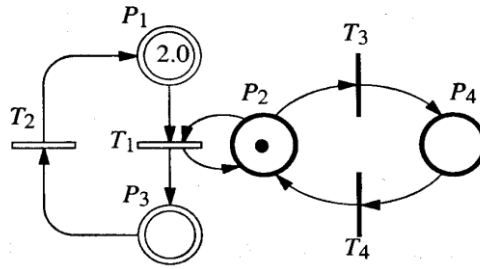


Figure 2.15 : RdP hybride [24]

- **Les réseaux de Petri hybrides D-élémentaires :**

Les RdPH D-élémentaires ont été introduits dans [25]. Ce formalisme est la combinaison d'un RdP continu C et d'un RdP T-temporel. Le fait que la partie discrète est représentée par un RdP T-temporel confère au modèle hybride un comportement non déterministe.

Rappelons que, pour un RdP T-temporel, les dates de franchissement des transitions ne sont pas déterministes mais prises dans des intervalles de franchissement. De plus dans un RdPH D-élémentaire la partie discrète évolue de manière indépendante par rapport à la partie continue qu'elle contrôle.

Définition (RdP hybride D-élémentaire) : Un RdP hybride D-élémentaire est une structure $PN_{HD} = (P, T, h, E, S, Pre, Post, U, V, M_0)$. Les définitions des paramètres $P, T, h, E, \Sigma, V, M_0$, sont identiques à celles du RdP hybride et :

- Pre et $Post$ sont les applications d'incidence avant et arrière. Ces applications sont telles que :

$$\forall (P_i, T_j) \in P^C \times T^D, Pre(P_i, T_j) = Post(P_i, T_j) = 0; \quad (1)$$

$$\text{And: } \forall (P_i, T_j) \in P^D \times T^C, Pre(P_i, T_j) = Post(P_i, T_j); \quad (2)$$

- $U: T^D \rightarrow \mathbb{R}^+ \times (\mathbb{R}^+ \cup \{\infty\})$ associe à chaque D-transition T_j son intervalle de franchissement $[\alpha_j, \beta_j]$.

Les conditions (1) and (2) sur les applications d'incidence avant et arrière signifient qu'aucun arc ne relie une place continue à une transition discrète. Et si un arc relie une place discrète P_i à une transition continue T_j , l'arc connectant T_j à P_i doit exister. Ceci apparaît graphiquement comme des boucles connectant des places discrètes à des transitions continues.

Physiquement ceci signifie que le RdP discret évolue indépendamment du RdP continu, mais contrôle l'évolution de ce dernier. [11]

II.8. Conclusion :

Les systèmes dynamiques hybrides sont des systèmes comportant une partie à évolution continue dans le temps et une partie à évolution événementielle. Ces dernières années, plusieurs travaux se sont intéressés à ce type de systèmes.

Ce chapitre a proposé un tour d'horizon général sur les systèmes dynamiques hybrides. Dans un premier temps, nous avons présenté un ensemble de définitions des systèmes continus, systèmes à événements discrets et les systèmes dynamiques hybrides.

Nous avons ensuite présenté les principales caractéristiques des systèmes que nous allons étudier avec les concepts nécessaires à la compréhension des systèmes dynamiques hybrides. Enfin, nous avons présenté une classification des comportements des SDH et les différents outils de leur modélisation.

Chapitre 3

Modélisation et commande des feux de trafic

3.1. Introduction	49
3.2. Le découpage en phases	50
3.2.1. Notions de conflits	50
3.2.2. Concept de supervision	51
3.3. Paramètres essentiels au calcul	52
3.4. Régulation des carrefours à feux	53
3.4.1. Carrefour à plan de feux fixe	54
3.4.2. Régulation du trafic avec les systèmes adaptatifs.....	56
3.5. Modélisation du flux des voitures par les Réseaux de Petri	59
3.5.1. Hypothèses	59
3.5.2. Modélisation	59
3.6. Algorithme de commande des feux tricolores par l'état de remplissage des voies Symboles utilisés	63
3.6.1. Algorithme de commande avec commutation à cycle fixe.....	64
3.6.2. Commande a seuil max.....	66
3.6.3. Commande a seuil min	68
3.6.4. Commande a seuil mixte.....	70
III.7. Résultats des Algorithmes de commande	72
III.8. Conclusion	85

III.1. Introduction :

Le boom économique de ces dernières décennies en Algérie avec l'adoption de la loi sur le crédit à la consommation et en particulier à l'achat de véhicules a conduit à une croissance importante du nombre des usagers du trafic urbain, sans que, ni les infrastructures routières urbaines, ni les schémas de circulation n'aient été modifiées. Ce phénomène a engendré une extension explosive des villes, Il s'en est suivi une circulation difficile allant jusqu'à la congestion du trafic durant les heures pointe.

Pour comprendre la congestion, il faut garder présent à l'esprit que c'est un phénomène qui survient lorsque la demande (le nombre de véhicules qui cherchent à utiliser une infrastructure donnée) est supérieure à la capacité de cette infrastructure. Si la demande excède la capacité, alors des véhicules seront ralentis à l'entrée de l'infrastructure, formant ainsi un bouchon.

Les problèmes de circulation sont aujourd'hui devenus une réalité dans la plupart des grandes villes du monde ; mieux encore, il s'agit d'un véritable casse-tête pour les responsables politiques, les experts, les automobilistes et les habitants.

Le carrefour est un lieu de conflit entre les flux de véhicules et de piétons, il est touché d'une manière directe par la congestion du trafic. Il est donc indispensable de bien réguler ces endroits sensibles et potentiellement dangereux.

La commande des feux, c'est à dire, la régulation du trafic, est considérée comme un problème d'optimisation qui consiste à minimiser une fonction coût. Cette fonction est inhérente à certains paramètres essentiels au calcul. Par ailleurs, avant d'élaborer une telle commande, il s'avère nécessaire d'analyser le fonctionnement du carrefour et les mouvements possibles des flux de véhicules. Cette technique permet de connaître les propriétés des flux et ainsi de parvenir au découpage en phases.

III.2. Le découpage en phases :

Ce point est essentiel dans toute analyse du fonctionnement d'un carrefour. Le découpage en phases fait appel à la notion de mouvements conflictuels. D'une manière générale, l'on s'efforce d'élaborer un phasage qui :

- supprime ou minimise les conflits
- prenne en compte les piétons: cheminement, temps de traversée, sécurité
- tienne compte de la géométrie existante.

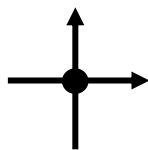
L'objectif est de parvenir à un fonctionnement optimum, minimisant le nombre de phases ainsi que la charge de chacune d'entre elles. Dans la mesure du possible, on tente de se rapprocher d'un fonctionnement à deux phases. Les mouvements d'importance équivalente sont souvent regroupés dans une même phase.

III.2.1. Notions de conflits :

On distingue 3 types de conflits.

- *les conflits primaires* : ce sont ceux qu'il convient impérativement de régler par le découpage en phases. Ils sont issus de la rencontre de 2 mouvements sécants. Par suite, au niveau du matériel chargé de réguler le carrefour, ces conflits déterminent la matrice des sécurités.

véhicules-véhicules



véhicules-piétons

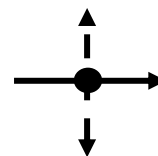


Figure 3.1 : Exemples de conflits primaires.

- *les conflits secondaires* : ce type de conflit n'est pas interdit, mais seulement gênant et en principe les règles du code de la route définissent les priorités respectives. Toutefois, pour des raisons de sécurité ou de fluidité, ces mouvements conflictuels peuvent être séparés.

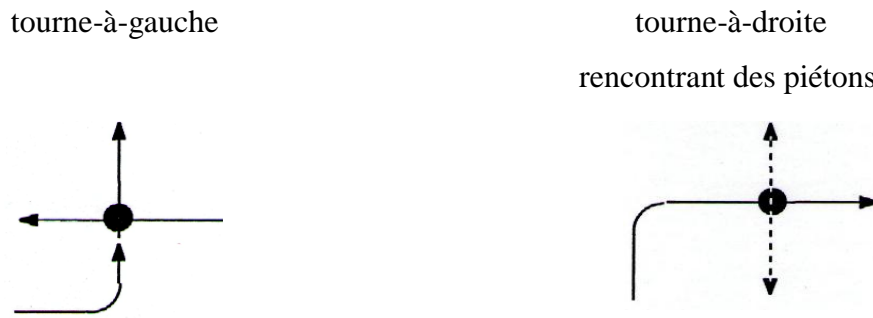


Figure 3.2 : Exemples de conflits secondaires.

- *les conflits tertiaires* : ce ne sont pas à proprement parler des conflits; cependant, dans certains cas précis, on peut être amené à séparer les courants.



Figure 3.3 : Exemples de conflits tertiaires.

III.2.2. Matrice des conflits :

Elle est obtenue à partir du repérage préalable des différents mouvements traversant le carrefour. Les mouvements des piétons sont pris en compte au même titre que ceux des véhicules ; toutefois, les sens de déplacement ne sont pas individualisés.

L'exemple suivant est relatif au cas d'un carrefour à 3 branches : 8 mouvements sont ainsi définis.

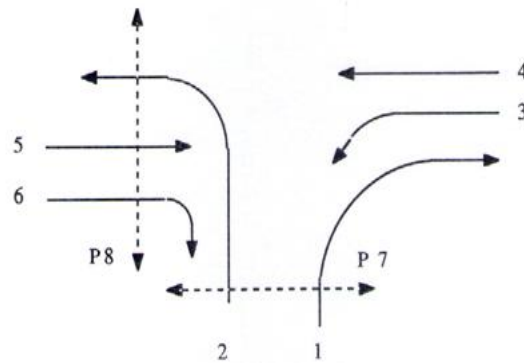


Figure 3.4 : Mouvements se produisant à un carrefour à trois branches.

La matrice des conflits correspondante, peut se présenter comme suit :

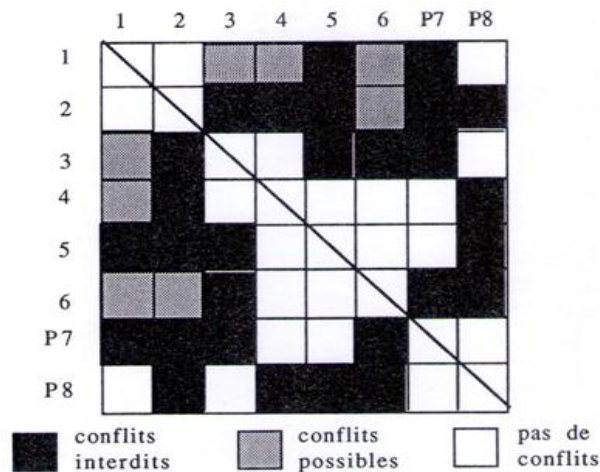


Figure 3.5 : Matrice des conflits.

Cette matrice se révèle particulièrement utile, lors du découpage en phases. [8]

III.3. Paramètres essentiels au calcul :

Ces paramètres sont très utiles pour la mise en œuvre des stratégies de commande. Leur évaluation est considérée comme un facteur déterminant pour l'efficacité d'une telle stratégie. Cependant, quelle que soit la méthode de commande appliquée au carrefour, les indications des feux : vert, jaune et rouge doivent se succéder à l'intérieur d'un cycle défini comme étant la durée (fixe ou variable) séparant deux passages successifs de l'ensemble des signaux par le même état [Cohen, 1990]. Le cycle est partagé en *phases*, temps pendant lequel plusieurs flux de véhicules sont admis.

Vert effectif : est la somme du temps de vert réel et du temps de jaune (qui est souvent de 3 ou 5 s selon la vitesse limitée sur les branches du carrefour).

Temps perdu : est la somme du temps perdu au début du vert et le temps perdu en fin de phase.

Vert utile : est défini par la différence entre le temps du vert effectif et celui du temps perdu.

Rouge utile : est obtenu en retranchant de la durée du cycle le temps du vert utile.

Rouge intégral : à la fin de chaque phase, l'ensemble des feux est maintenu au rouge pendant une certaine durée. [4]

III.4. Régulation des carrefours à 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 3.6). 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 3.6, 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 se stockent tous les véhicules pouvant pénétrer le carrefour pendant la durée du feu vert.

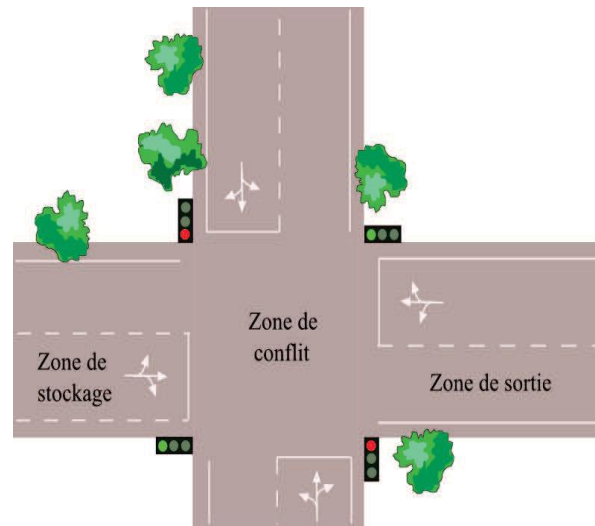


Figure 3.6 : Illustration d'un carrefour isolé.

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 mobiles 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.

III.4.1. Carrefour à plan de feux fixe :

Les plans de feux – cycles, durées de vert et décalages – constituent le fondement du système de régulation. Les moyens de calculer un plan de feu le mieux adapté à une situation de circulation donnée sont divers. Le plan de feu le plus simple consiste à répéter indéfiniment la même séquence de phases de durées fixes, toujours agencées dans le même ordre, de manière à constituer un cycle fixe.

Le plan de feux fixe est le plus simple, mais aussi une méthode très connue et acceptée par nos villes.

Les durées des phases et leurs séquences sont définies par la fonction des états historiques.

Dans (Webster 1958), les auteurs ont proposé une formule importante pour trouver la durée de cycle optimale C_0 en minimisant le retard subi par les véhicules :

$$C_0 = \frac{1.5T + 5}{1 - Y}$$

Où T désigne le temps total perdu par cycle et Y la charge du carrefour. Le temps total perdu par cycle T s'obtient en additionnant les temps de rouge intégral r_i et les temps perdus par phase t_p :

$$T = \sum t_p + \sum r_i$$

En règle générale, la valeur moyenne de t_p correspond à 5.5s et celle de r_i à 2s de sorte que $T=7,5n$, n désignant le nombre de phases. Par suite, on choisit une durée de cycle C la plus proche possible de C_0 en tenant compte des limites inférieures et supérieures déterminées lors de l'établissement des données.

Le système le plus célèbre avec plan de feux fixe est TRANSYT « *TRAffic Network Study Tool* ». Il évalue le réglage des feux en temps fixe d'un réseau urbain et fournit un plan de feux optimal (répartition optimale des durées de vert et décalages optimums) minimisant un indice P_i de performance du réseau :

$$P_i = T + kS$$

Dans lequel T désigne le temps de parcours total, S le nombre d'arrêts, k un facteur de pondération des arrêts. Plusieurs catégories de véhicules peuvent être prises en compte, chacun avec ses caractéristiques propres.

Malgré que la régulation des carrefours à feux avec le cycle fixé soit moins coûteuse, l'inconvénient de ce type de stratégie est clair : le fait que la qualité de gestion du trafic au carrefour (sécurité et efficacité) ne dépend que d'un plan de feux fixé. Comme l'état de la circulation peut changer (heures de pointe du matin, accident...), le cycle fixé peut être totalement inadapté à la circulation à ces périodes, de plus les embouteillages et les retards des véhicules seront aussi augmentés. Pour cette raison, les chercheurs essaient de trouver les stratégies les plus avancées, qui peuvent s'adapter automatiquement aux changements des circulations.

Dans ce contexte, une nouvelle méthode : la régulation adaptative (appelée aussi la régulation réactive) attire de plus en plus d'attention depuis les années 80 du siècle dernier. Cette

stratégie de contrôle peut modifier le temps de cycle et est basée sur la mesure en temps réel comme dans le cas des boucles électromagnétiques.

II.4.2. Régulation du trafic avec les systèmes adaptatifs :

Le principe de la régulation adaptative a d'abord été utilisé par (Miller 1963) quand il a proposé une stratégie qui est basée sur un modèle de trafic en ligne. Le modèle optimise le temps gagné et perdu en combinant différents critères. Ensuite, une série de méthodes adaptatives ont été développée. Un exemple bien connu de la première génération des systèmes adaptatifs est PLIDENT. Dans la fin des années 60, PLIDENT a été appliqué à Glasgow et a enfin échoué. En 1981,

(Hunt 1982) a analysé les insuffisances des stratégies de 1ère génération et a surmonté les problèmes par une stratégie plus avancée de la deuxième génération – SCOOT « *Split Cycle Offset Optimization Technique* ». Il minimise le retard par l'adaptation du temps de cycle. Au début des années 80, certains systèmes adaptatifs de 3ème génération ont été développés. Par exemple, OPAC « *Optimization Policies for Adaptive Control* » [Gartner 1982] et le PRODYN « *Programmation Dynamique* » [Henry, Farges et al. 1983]. Ces stratégies peuvent fonctionner acycliquement.

En général, par rapport à la régulation avec un cycle fixé, la régulation adaptative permet des changements de durée de phase basée sur la demande du trafic. Avec cette méthode, un temps vert minimum et maximum est prédéfini pour chaque voie. Pendant l'écoulement de circulation, le temps du vert d'une voie peut être prolongé par une unité d'extension si un nouveau véhicule est détecté pour cette phase. Cela donne aux feux de signalisation, l'opportunité de s'adapter à la demande de circulation.

Nous introduisons simplement quelques exemples de cette méthode :

- ❖ GERTRUDE : mis en place à Bordeaux en 1976, puis à Reims, Lisbonne, et à Paris en 1990.
- ❖ SCOOT : opérationnel dans plusieurs villes en Grande-Bretagne : Glasgow, Coventry, Londres, Southampton, Worcester... et introduit à Santiago au Chili et à Manama (Emirat de Bahrain).
- ❖ SCAT : expérimenté à Sydney, puis étendu à Melbourne, Canberra, Adélaïde, en Nouvelle-Zélande, à Kuala Lumpur en Malaisie,...
- ❖ PRODYN : à Toulouse.

➤ **Le système GERTRUDE**

GERTRUDE « *Gestion Electronique de Régulation en Temps Réel pour l'Urbanisme, les Déplacements et l'Environnement* » utilise un certain nombre de plans de feux pré-calculés, avec deux types d'adaptativité en temps réel superposés:

- ❖ Une adaptativité locale, permettant d'empêcher le blocage des carrefours en anticipant le passage au rouge d'un carrefour lorsque la file d'attente au carrefour aval dépasse une valeur critique.
- ❖ Une adaptativité centralisée qui déforme les ondes vertes des axes constituant le réseau.

Un module spécifique de traitement de la congestion est utilisé, permettant de concentrer les files d'attente aux endroits du réseau – dénommés SAS – où elles sont le moins gênantes.

➤ **Le système SCOOT :**

SCOOT « *Split, Cycle and Offset Optimisation Technique* » ou technique d'optimisation des durées de vert, du cycle et des décalages utilise un plan de feux déformé en temps réel par de petites altérations apportées à la durée du cycle, à la répartition des temps de vert sur chaque carrefour, et aux décalages entre les carrefours.

Un détecteur est placé à l'entrée de chacun des segments du réseau ; les mesures faites sur ces détecteurs permettent d'effectuer une simulation de l'ensemble de ce réseau, prédisant en particulier les longueurs de files d'attente aux carrefours, et en déduisant les altérations à apporter aux différents réglages des feux.

➤ **SCATS :**

L'architecture de SCATS « *Sydney Co-ordinated Adaptive Traffic System* » est composée d'un ordinateur central, connecté en réseau à plusieurs mini-ordinateurs de zone, eux-mêmes connectés à de nombreux micro-ordinateurs, assurant le rôle de contrôleurs locaux [Sims et Dobinson 1980]. Ces contrôleurs exploitent les données des détecteurs, prennent les décisions tactiques relatives à la gestion des feux et évaluent les défauts de fonctionnement. Ils permettent également une méthode logicielle de coordination sans câble, englobée comme système de secours. Le réseau est subdivisé en sous-systèmes, comprenant jusqu'à 10 intersections signalées, partageant une durée du cycle commune.

Le mode normal de coordination correspond à un réglage en temps réel sur des valeurs de base pré-spécifiées des paramètres des plans de feux : durées de cycles, répartition de vert et

décalages. Ces valeurs sont modifiées et adaptées au mieux en réponse aux fluctuations détectées de la demande.

➤ **PRODYN :**

Testé et réalisée à Toulouse, la méthode PRODYN « *Programmation Dynamique* » se caractérise pour l'essentiel par les aspects suivants :

- ✓ Il est fait abstraction de la notion de cycle.
- ✓ La commande correspond à la décision de passer d'une phase à une autre ; elle est remise en cause toutes les 5 secondes.
- ✓ Chaque chaînon du réseau est équipé de deux postes de mesure, l'un en entrée, l'autre au milieu.
- ✓ Ces capteurs effectuent la mesure du trafic.
- ✓ La détermination de l'état (nombre de véhicules en queue) est effectuée par estimation.
- ✓ Il y a application d'une séquence de commandes.
- ✓ Un modèle permet de prévoir l'évolution de l'état sur un horizon.
- ✓ Il y a application de différentes séquences de commandes et choix de la meilleure. C'est l'optimisation résultant de l'utilisation de la programmation dynamique et des méthodes hiérarchisées.
- ✓ La meilleure séquence trouvée est appliquée sur 5 prochaines secondes.
- ✓ On reboucle : en effet, toutes les 5s, l'information nouvelle issue des capteurs est utilisée.

Dans le cas d'un réseau, la coordination s'obtient soit grâce à un échange convenable d'informations entre carrefours adjacents (PRODYN décentralisé), soit par une coordination mathématique (PRODYN hiérarchisé).

Dans le premier cas, le carrefour en amont ayant prédit la séquence de ses sorties, les communique au carrefour en aval qui optimise comme lorsqu'il est isolé.

Dans le second cas, un coordinateur fait optimiser chaque carrefour suivant ses ordres, recueille le résultat de cette optimisation et après quelques itérations, assure le meilleur compromis pour la commande du réseau.

Evidemment, la régulation adaptative peut améliorer la qualité de la circulation par le changement de cycle. Toutefois, bien que nos villes bénéficient de l'évolution des outils modernes de régulation du trafic, les problèmes de congestion, de sécurité et de nuisance demeurent. Une raison importante est que les approches microscopiques et macroscopiques au sens classique ont en effet été développées pour exploiter des capteurs tels que les boucles

électromagnétiques, qui ont une capacité d'information limitée. Par exemple, le débit est estimé à partir des mesures passées et ne reflète pas l'état du trafic (i.e. fluide ou congestionné). En plus, l'estimation du débit des détecteurs plus récents tels que les caméras vidéos, le GPS ou les ondes radio offrent des possibilités supplémentaires que ces modèles ne permettent pas d'exploiter. Ces raisons nous encouragent à chercher des approches plus précises, et qui peuvent refléter bien l'état du trafic. [2]

III.5. Modélisation du flux des voitures par les Réseaux de Petri :

III.5.1. Hypothèses :

Soit un tronçon constitué de deux voies E-O (1) et N-S (2), avec un seul carrefour à feux. La durée du feu vert est τ_1 , celle du feu rouge est τ_2 . Donc un cycle de commutation peut s'écrire : $C = \tau_1 + \tau_2$. $m_1(t)$ et $m_2(t)$ sont respectivement les valeurs instantanées des nombres de véhicules dans les voies 1 et 2. C_{max1} et C_{max2} (supposées égales) sont les capacités maximales respectives de la voie 1 et 2. On accepte que pendant un intervalle de temps donné, les débits d'entrée des véhicules dans les voies 1 et 2 sont respectivement de_1 et de_2 sont constants (système de premier ordre). Les débits de sortie sont respectivement ds_1 et ds_2 sont constants .

III.5.2 Modélisation :

Lorsque le feu rouge de la voie 1 (feu vert dans la voie 2) est allumé nous avons :

$$m_1(t) = de_1 * t \quad \text{et} \quad m_2(t) = -ds_2 * t + C_{max}$$

Lorsque le feu rouge de la voie d2 (feu vert dans la voie d1) est allumé nous aurons :

$$m_1(t) = -ds_1 * t + C_{max} \quad \text{et} \quad m_2(t) = de_2 * t$$

On propose un modèle d'un carrefour isolé: un modèle RdP hybride D-élémentaire est un modèle bien adapté à la modélisation des systèmes de cette classe des systèmes. Les parties discrète et continue ainsi que l'interaction entre elles sont distinctement représentées. Un RdP hybride D-élémentaire est la combinaison d'un RdP T-temporel modélisant la partie discrète et d'un RdP continu à vitesse constante modélisant la dynamique continue.

Le RdP hybride fournit un modèle élégant aisément compréhensible par l'utilisateur et concis dans son graphisme.

✓ Description d'un carrefour isolé

L'intersection étudiée comporte deux voies (L_1, L_2) avec deux feux de signalisation (TL_1, TL_2) implantés à l'extrémité des voies (figure 3.7). Le trafic s'écoule dans deux directions principales : Est-Ouest ($E-O$) et Nord-Sud ($N-S$). Par souci de simplicité, la prise en compte des mouvements de tournes à gauche et à droite est exclue de notre étude.

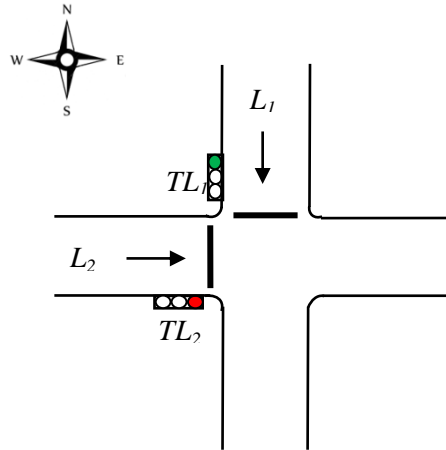


Figure.3.7: Carrefour isolé d'un réseau de trafic urbain.

La congestion au niveau de l'intersection se produit lorsque la demande de débit d'entrée dépasse la capacité des voies. Pour éviter la congestion nous proposons un contrôleur linéaire avec une structure similaire aux systèmes à compartimentés.

Dans cette étude, il est évident que le nombre de véhicule dans les deux voies de circulations L_1 et L_2 ne doit jamais dépasser la capacité maximale de chaque voie, ceci constitue la spécification. Dans le but de contrôler les capacités des voies pour satisfaire la spécification, nous devons agir sur les instants de commutation des feux de signalisations (TL_1, TL_2). Calculer les intervalles de franchissement $[\alpha_6 \beta_6]$ et $[\alpha_8 \beta_8]$ des transitions T_6 et T_8 de telle sorte que le marquage de la C-place P_1 et P_2 ne dépasse jamais les capacités de chaque voie (L_1 et L_2).

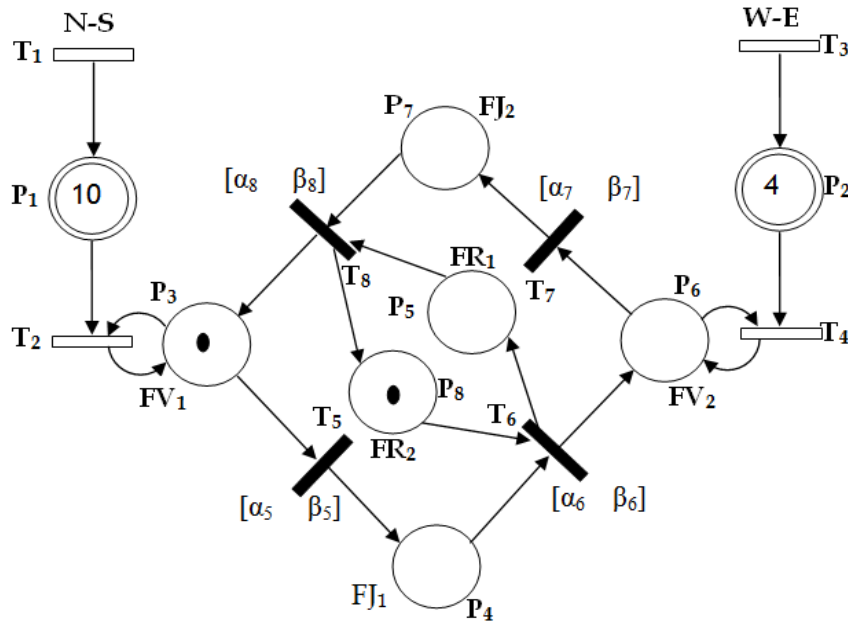


Figure.3.8 : RdP D-élémentaire modélisant les deux voies du carrefour.

Nous modéliserons le carrefour par un RdP hybride D-élémentaire construit de la façon suivante :

- ✓ Pour la voie « N-S », un sous-modèle discret représente la commutation des feux entre les trois états ; Vert (P_3) jaune (P_4) et rouge (P_5), par un RdP T-temporel. Les transitions discrètes T_5 et T_6 correspondent aux commutations des feux. Pour contrôler le flux de véhicules dans une voie « N-S », nous devons contrôler la commutation du feu rouge au feu vert donc la transition T_6 .
- ✓ Symétriquement pour la voie « O-E », un sous-modèle discret représente la commutation des feux entre les trois états ; Vert (P_6) jaune (P_7) et rouge (P_8), par un RdP T-temporel. Les transitions discrètes T_7 et T_8 correspondent aux commutations des feux. Pour contrôler le flux de véhicules dans la voie « O-E », nous devons contrôler la commutation qui commute du feu rouge au feu vert donc la transition T_{10} .
- ✓ Dans la voie « N-S », Un sous-modèle continu représente le flux de véhicules par un RdP continu à vitesse constante car les débits d'entrée et de sortie du flux sont considérés constants sur un intervalle de temps donné. La place continue P_1 modélise le flux de voitures dans une voie. La transition continue T_1 est franchie à une vitesse égale au débit d'entrée des voitures dans la voie du carrefour tandis que la transition T_2 est franchie à une vitesse égale à la différence entre le débit d'entrée et le débit de sortie de la voie du

carrefour. Le débit de sortie dépend de la vitesse moyenne de sortie des véhicules et peut être considéré constant sur un intervalle de temps donné et pour un type de chaussée donné.

- ✓ Symétriquement pour la voie « O-E », Un sous-modèle continu représente le flux de véhicules par un RdP continu à vitesse constante. La place continue P_2 modélise le flux de voitures dans une voie. La transition continue T_3 est franchie à une vitesse égale au débit d'entrée des voitures dans la voie du carrefour tandis que la transition T_4 est franchie à une vitesse égale à la différence entre le débit d'entrée et le débit de sortie de la voie du carrefour.

τ_1 et τ_2 sont respectivement les durées des feux rouges et verts. Dans ce paragraphe, nous présentons le modèle RdPCV permettant de modéliser l'écoulement du trafic sur les voies du carrefour. Le marquage x_1 (x_2) de la place P_{11} (P_{12}) représente le nombre de véhicules présents sur la voie $d1$ ($d2$). Le nombre de places vides sur la voie $d1$ ($d2$), est représenté par le marquage (d_1max-x_1) de la place P_{21} , respectivement (d_2max-x_2) de la place P_{22} . L'accès à la voie $d1$ ($d2$) est modélisé par la transition T_{21} (T_{22}) dont la fréquence de franchissement est $\dot{d}1 = 1/\tau$ est ($\dot{d}2 = 1/\tau'$) (τ et τ' sont les temps respectifs d'arrivée d'un véhicule sur les voie $d1$ et $d2$). La sortie d'une voie est modélisée par la transition T_{11} (T_{12}) dont la fréquence de franchissement est $\dot{d}3$ (respectivement $\dot{d}4$). Le marquage des place x_1 des places du RdPC1 évolue selon l'équation d'évolution du marquage d'un RdP continu (R. David et al, 2004) soit :

$$M(t+dt) = M(t) + W v(t) dt$$

On peut alors écrire

$$dM/dt = W.v(t)$$

où

$$dM = W.v(t) . dt$$

avec W la matrice d'incidence du RdP et $v(t)$ le vecteur des vitesses de franchissement des transitions du RdPC de la voie1. L'écriture matricielle nous donne :

$$\begin{pmatrix} \dot{m}1 \\ \dot{m}2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \dot{d}1 \\ \dot{d}3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{d}1 - \dot{d}3 \\ -\dot{d}1 + \dot{d}3 \end{pmatrix}$$

On obtient $\dot{m}1 = \dot{d}1 - \dot{d}3$ et $\dot{m}2 = -\dot{d}1 + \dot{d}3$.

Les débits sont supposés constants, à l'instant initial $t=0$, dans $d1$ il y a 0 véhicules et donc d_{max} places vides. Par intégration on obtient les expressions des marquages instantanés des places P11 et P21

$$M(P11) = (\dot{d}1 - \dot{d}3) t = x1$$

$$M(P12) = (-\dot{d}1 + \dot{d}3) t + d1_{max} = d1_{max} - x1.$$

Le même raisonnement peut s'appliquer à la voie $d2$.

III.6. Algorithme de commande des feux tricolores par l'état de remplissage des voies

Symboles utilisés :

C_{max} : capacité maximale de la voie

$C_{max1} = C_{max2} = C_{max}$

D_{max} = durée du vert maximale

$Mi1$: nombre de véhicules dans la voie 1 .

$Mi2$: nombre de véhicules dans la voie 2

$D_{feux v}$ = durée courante (timer) du feu vert.

$D_{feux r}$ = durée courante (timer) du feu rouge.

à chaque instant t , on a :

$D_{feux r} = C - D_{feux v}$

Horizon : largeur de l'axe des x qui représente le temps de simulation .

C = cycle total des feux

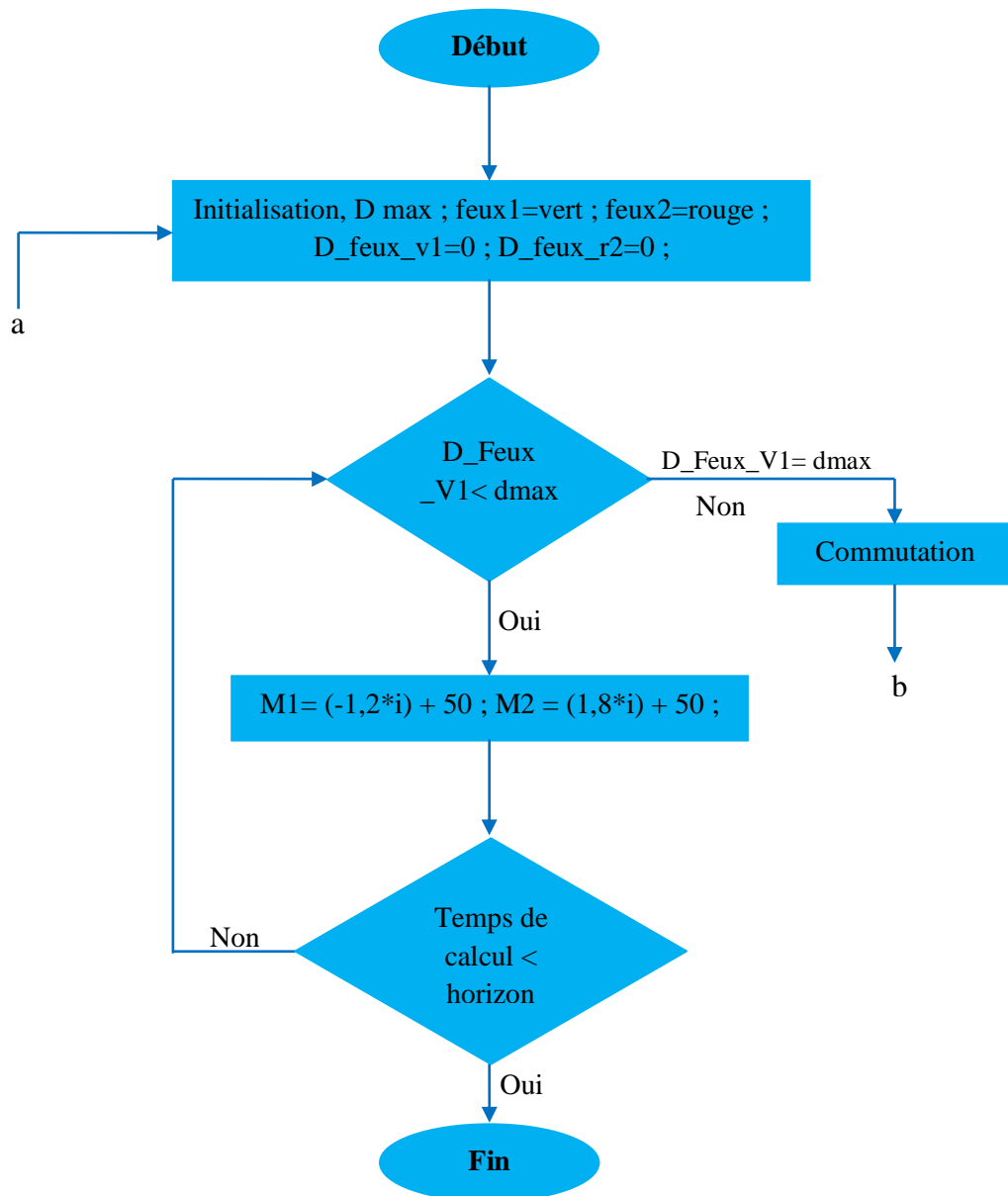
$De1$: débit d'entrée dans 1

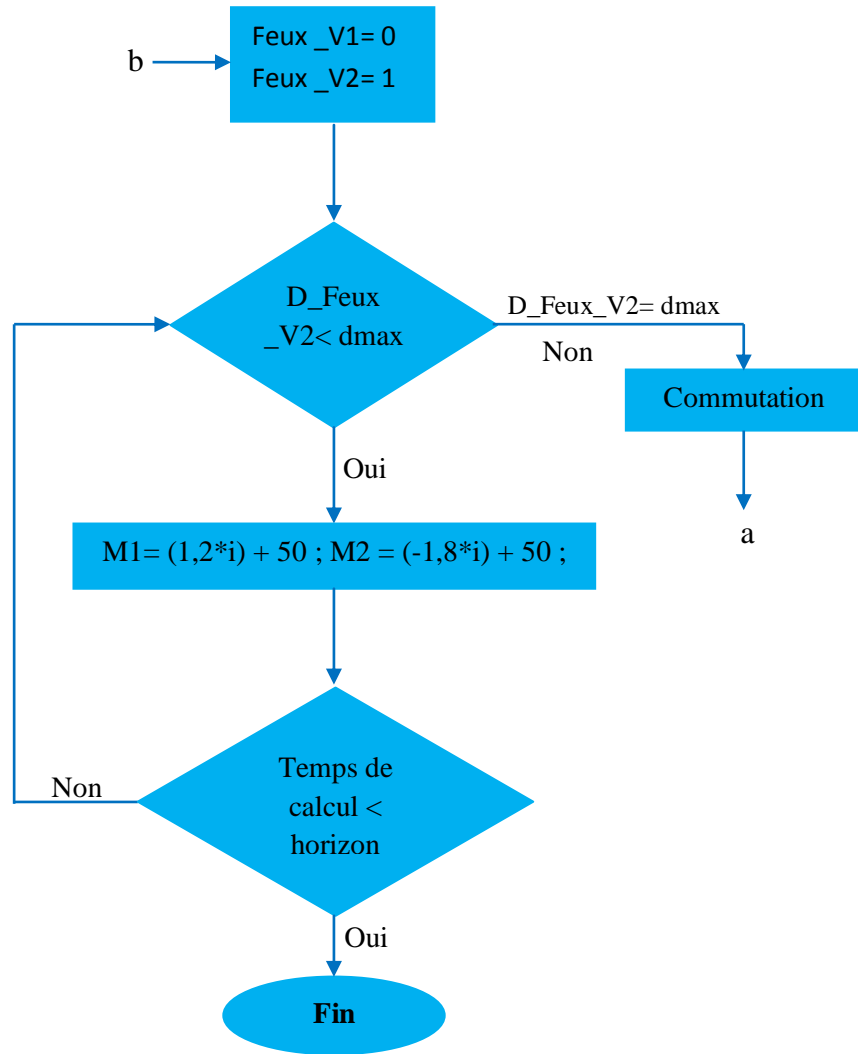
$De2$: débit d'entrée dans 2

$Ds1$: débit de sortie de 1

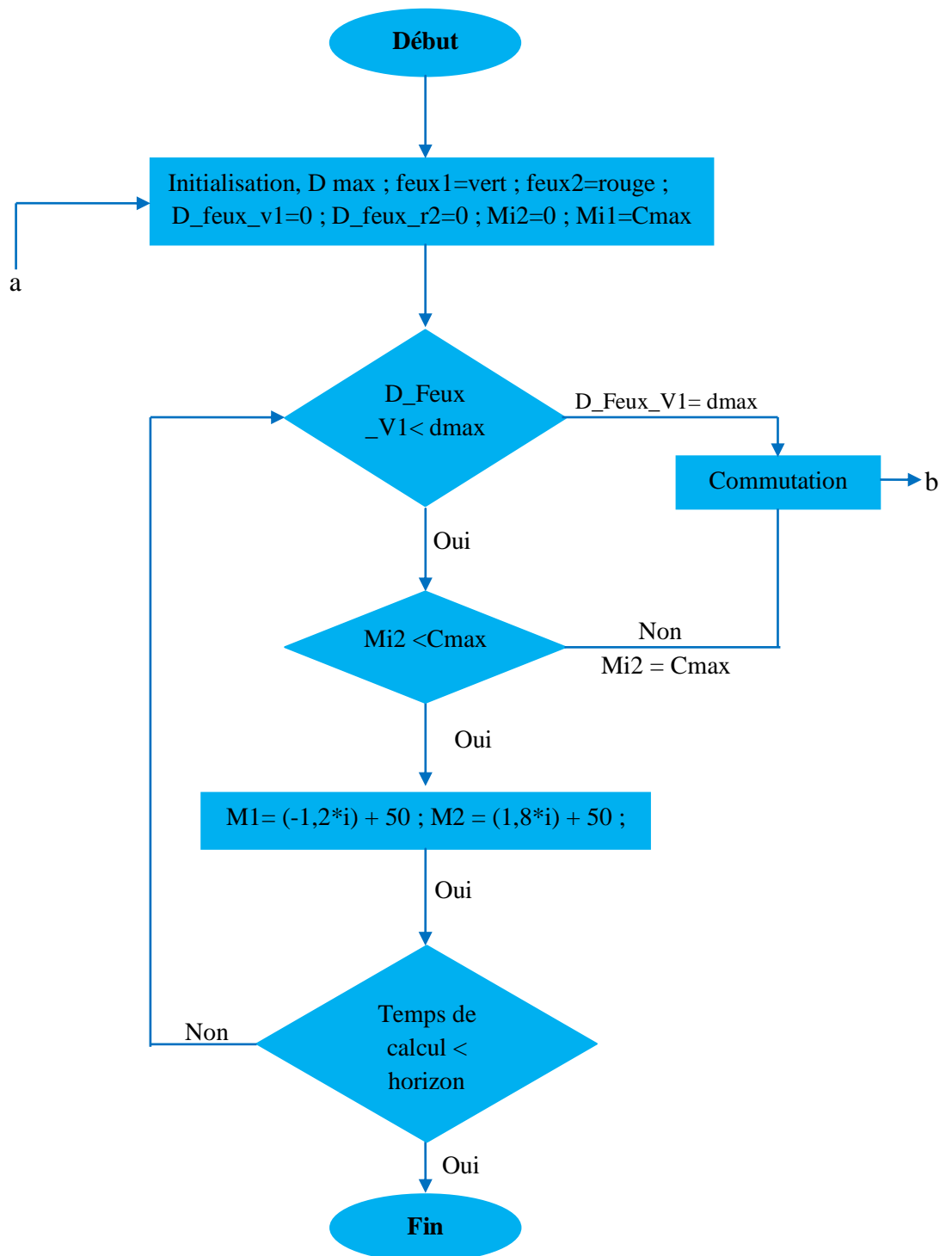
$Ds2$: débit de sortie de 2

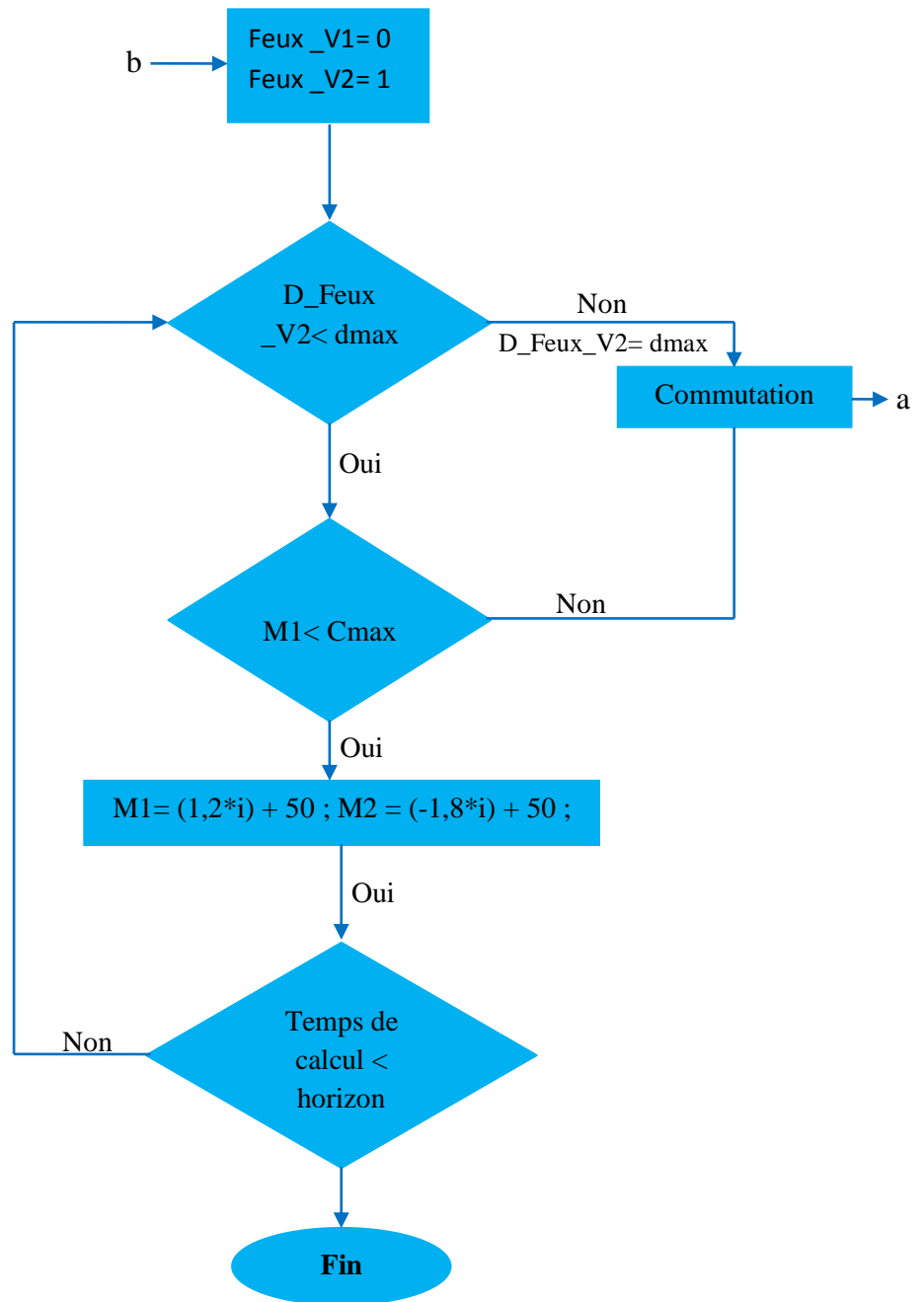
III.6.1. Algorithme de commande avec commutation à cycle fixe :



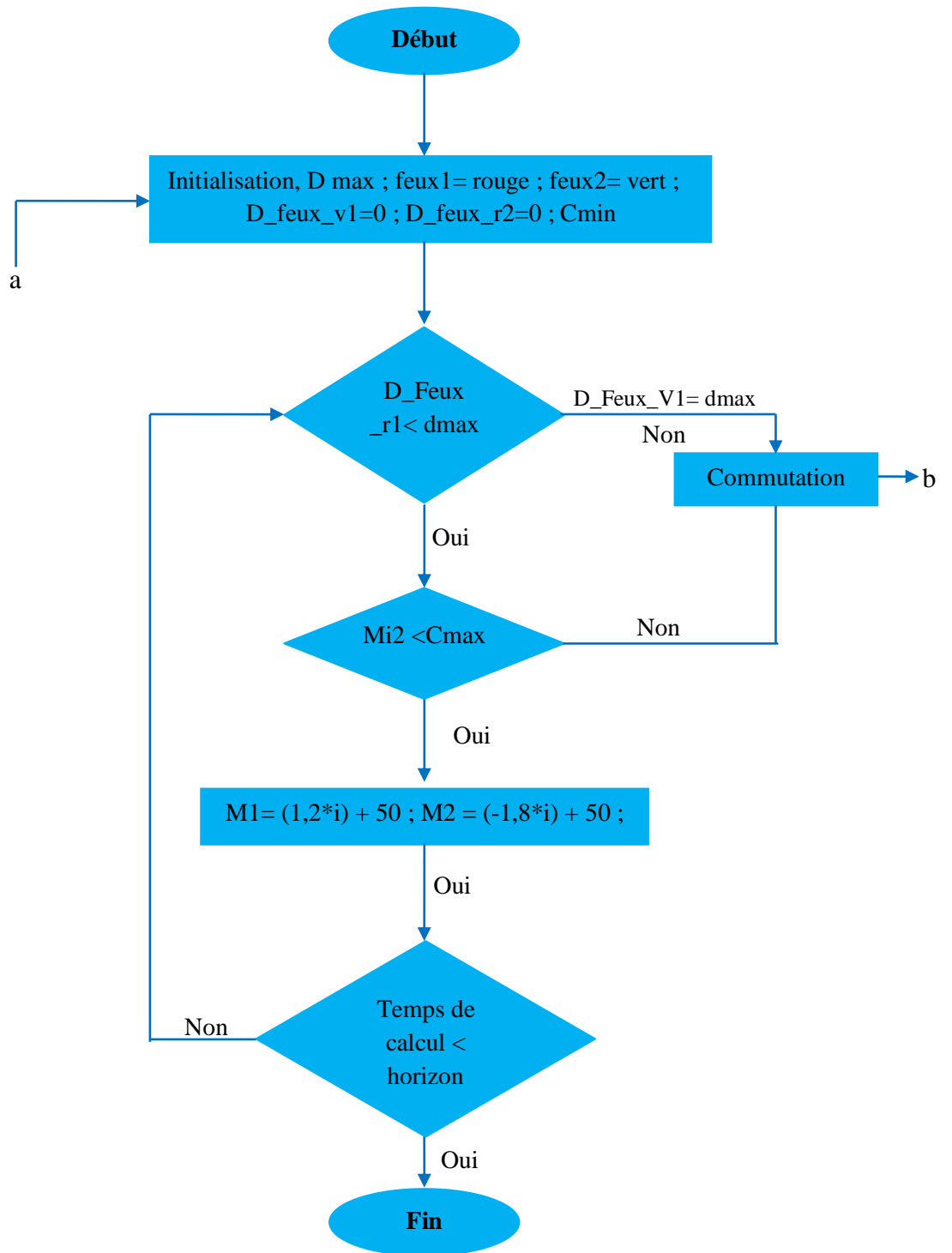


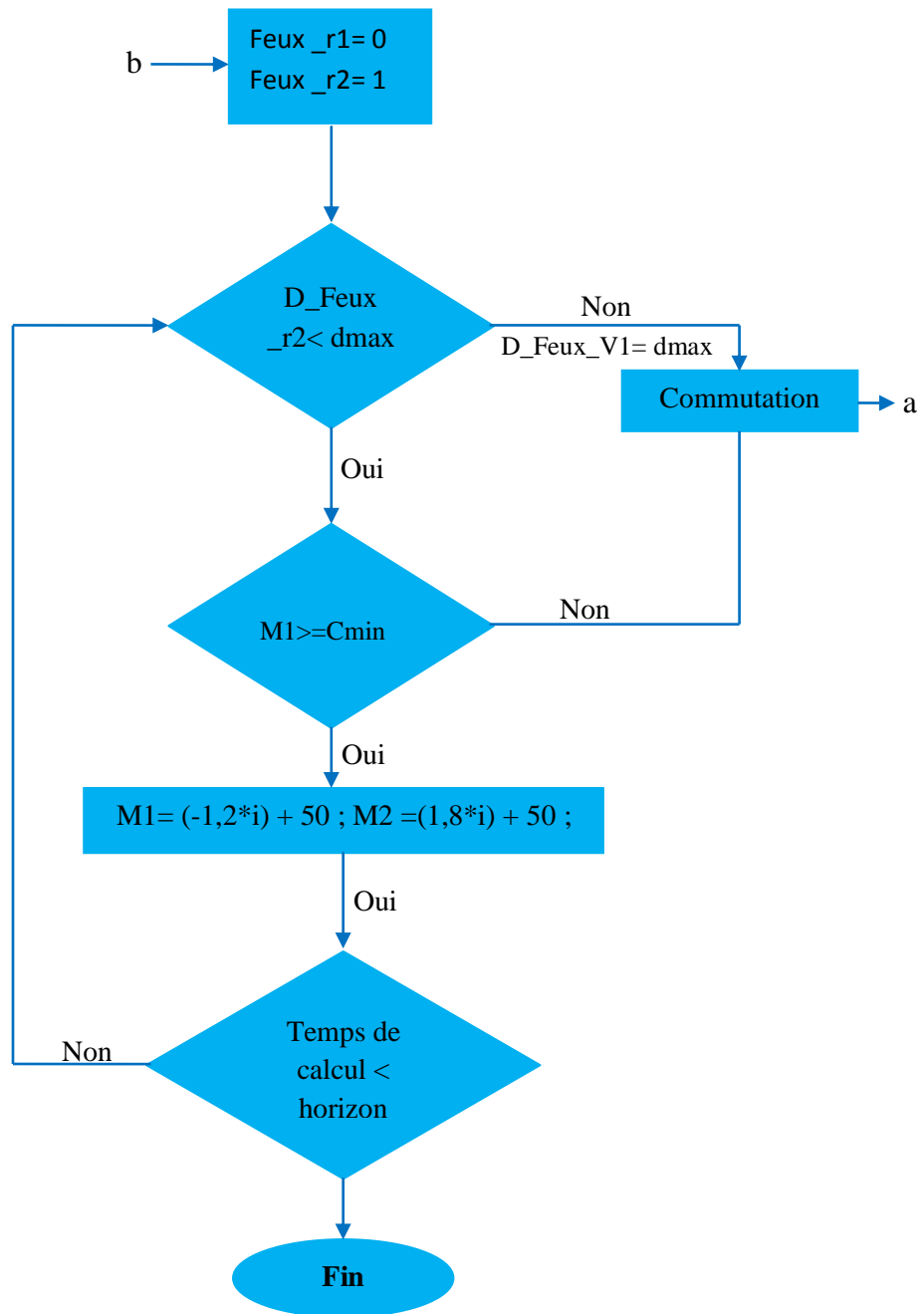
III.6.2. Commande a seuil max :



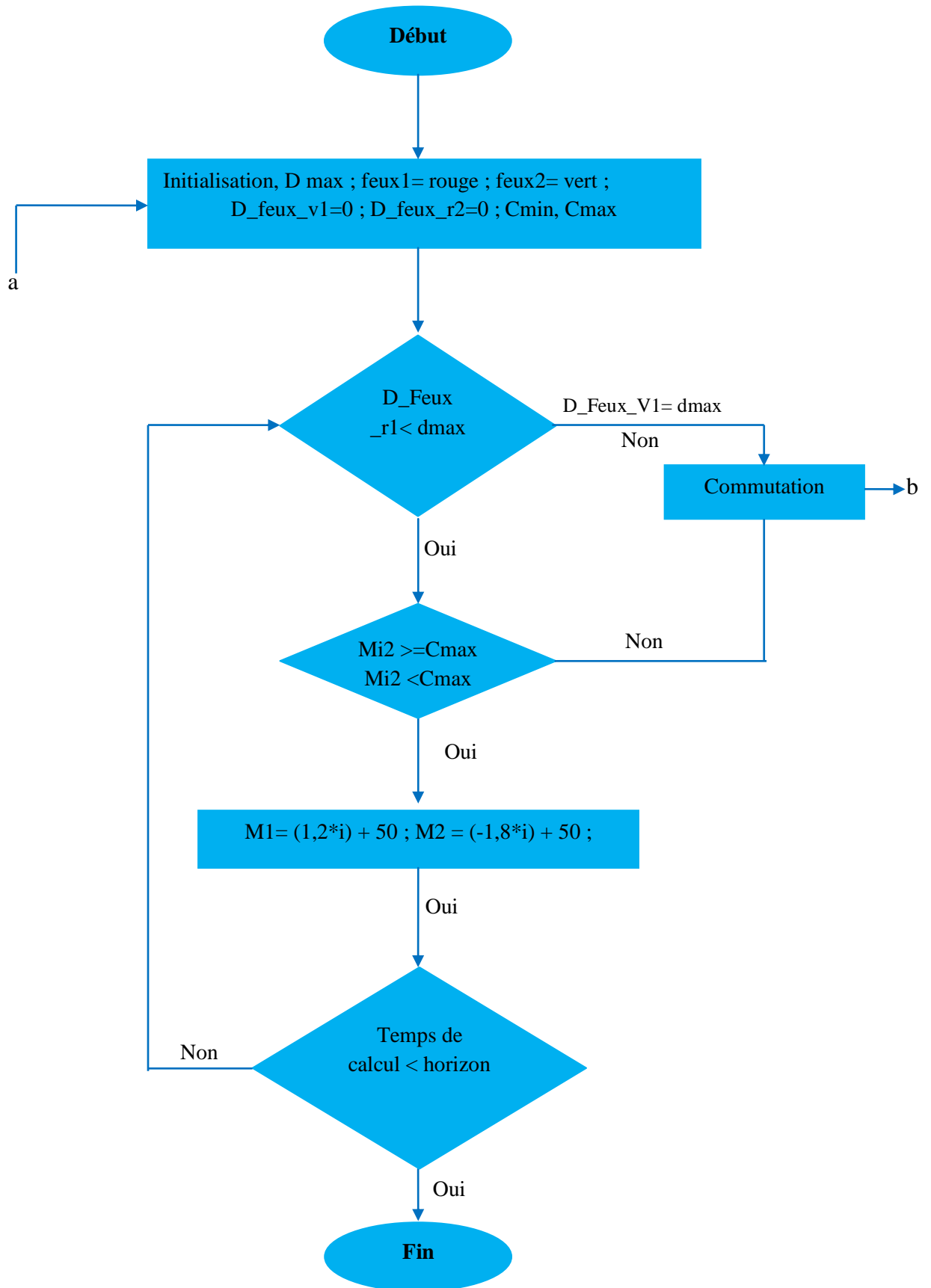


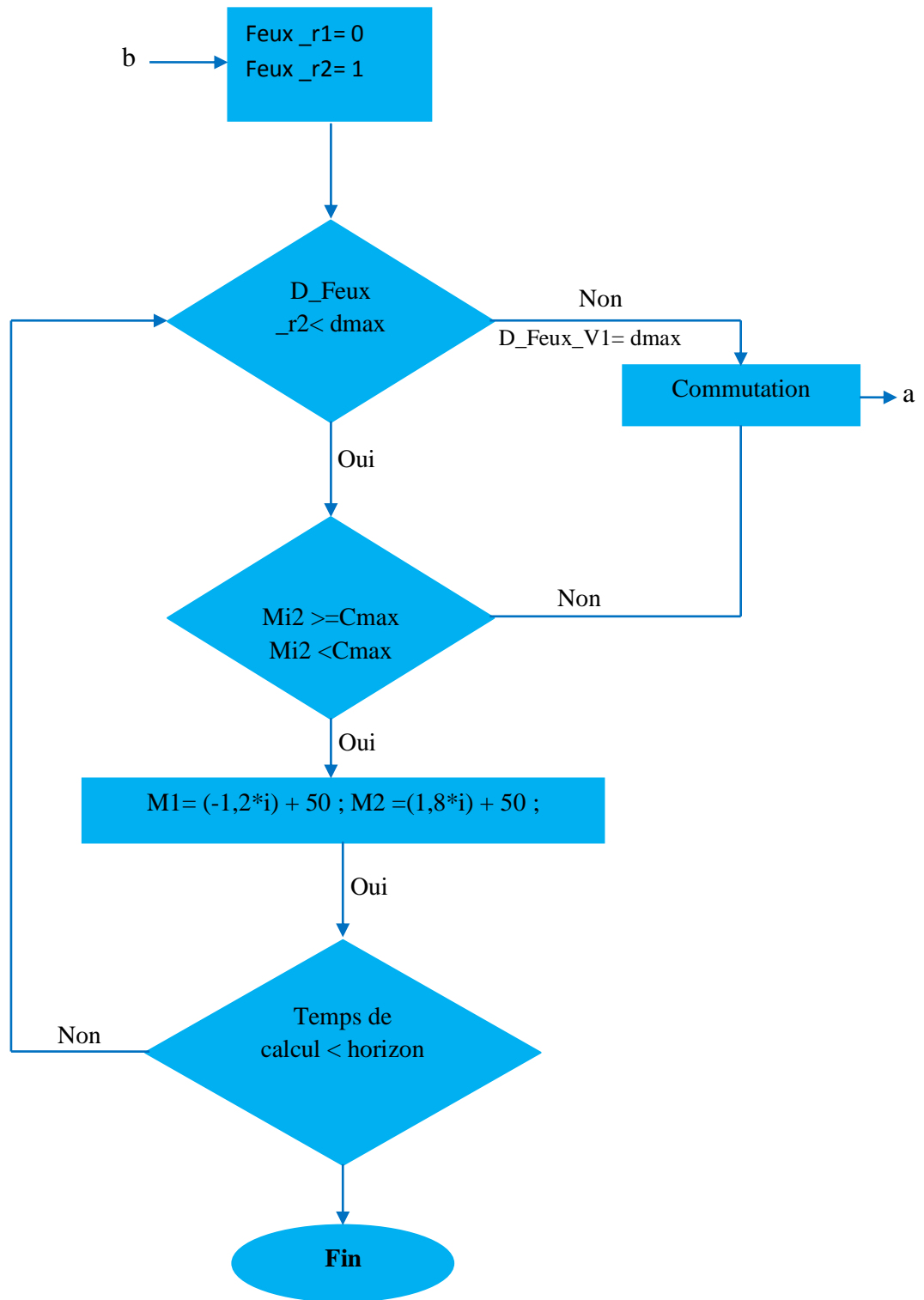
III.6.3. Commande a seuil min :





III.6.4. Commande a seuil mixte :





III.7. Résultats des Algorithmes de commande :

Pour la commande des feux de circulation, nous avons mis au point 4 méthodes pour gérer les phases de commutation des feux tricolores.

III.7.1 : Méthode de commande par cycle fixe :

➤ Heures normales, circulation fluide :

Débit d'entrée : 0.9 véh /UT

Débit de sortie : 0.6 véh/UT

Nombres de véhicules franchissant la voie N-S est caractérisée par la variable M1 qui est donnée par la relation suivante :

$$M1 = -0.6 * t + d10$$

Où d10 est le nombre de véhicules sur la voie à l'instant t=0, il correspond à la capacité maximale de la voie.

Le nombre de véhicules entrant dans la voie N-S est caractérisé par la variable M2 qui est donnée par la relation suivante :

$$M2 = 0.9 * t + d20$$

Où d20 est le nombre minimal sur la voie à l'instant t=0, il correspond à la capacité minimale de la voie.

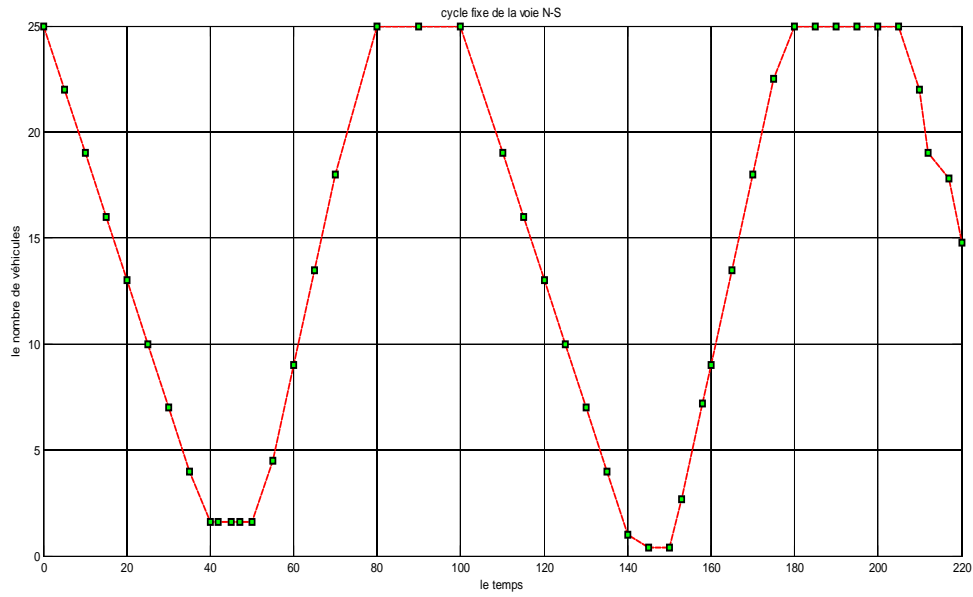


Figure 3.9.a : Commande par cycle fixe de la voie N-S (cycle fixe- Heures normales)

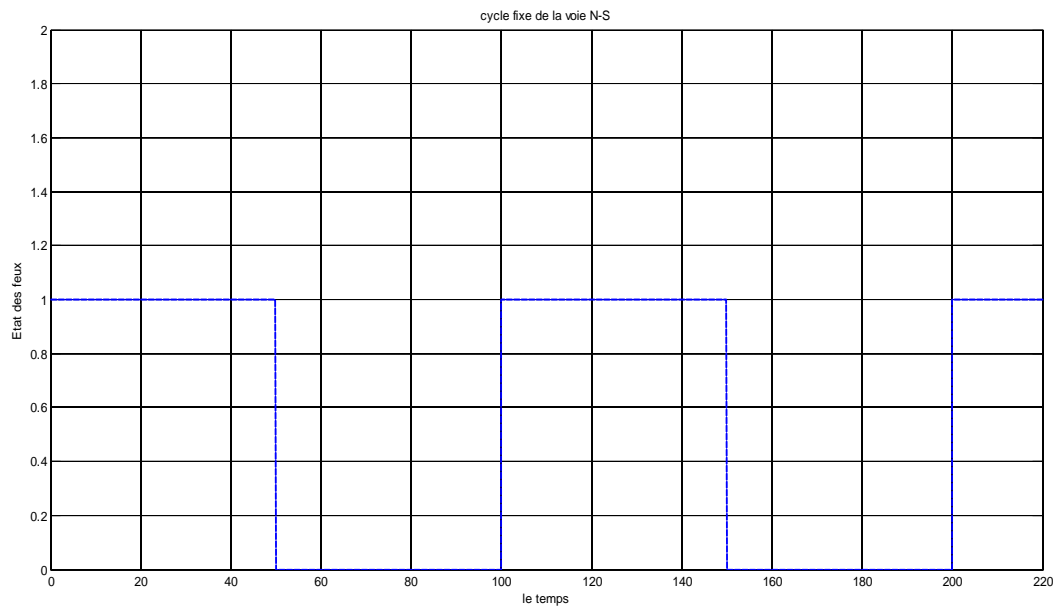


Figure 3.9.b : Commutation des feux a cycle fixe de la voie N-S (cycle fixe- Heures normales)

➤ Heures de pointes, circulation difficile :

Débit d'entrée : 1 véh /UT

Débit de sortie : 0.5 véh/UT

$$M1 = -0.5 * t + d10$$

$$M2 = 1 * t + 25$$

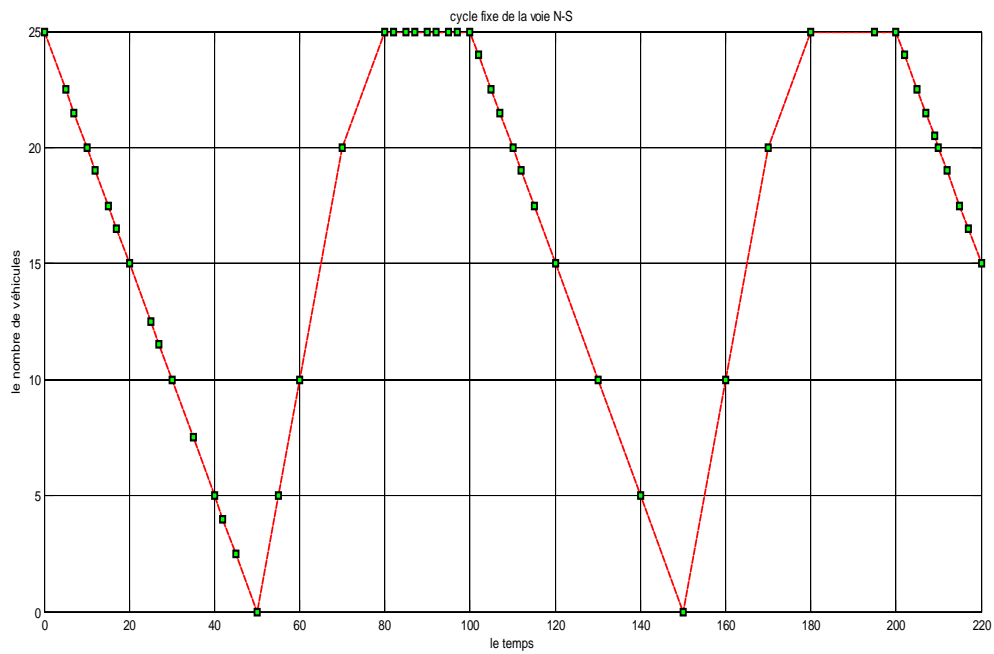


Figure 3.10.a : Commande par cycle fixe de la voie N-S (cycle fixe- Heures de pointes)

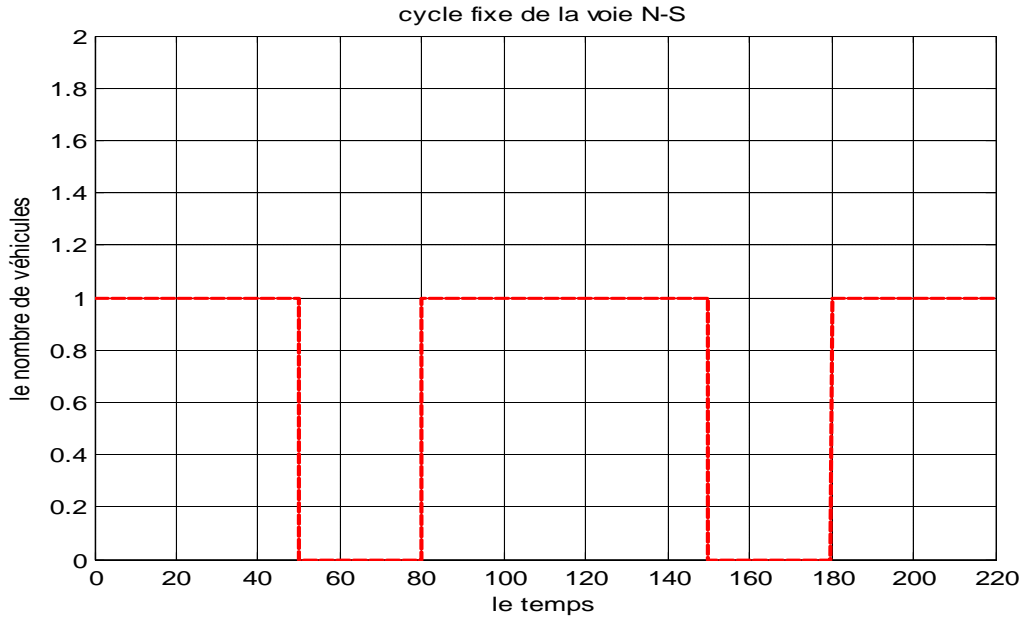


Figure 3.10.b : Commutation des feux a cycle fixe de la voie N-S (cycle fixe- Heures de pointes)

Interprétation1 :

Pendant les heures de pointes, le trafic se caractérise par un flux important d’entrée des véhicules dans les voies du carrefour, et un flux de sortie très faible. Ceci conduit à une congestion plus au moins importante au niveau de l’intersection.

Pour simuler l’état de remplissage des voies, nous avons considéré un débit d’entrée plus grand que le débit normal ($d_e=1\text{véh/UT}$), et pour le débit de sortie nous avons choisit un débit plus faible que celui d’une circulation normale ($d_s=0.5\text{véh/UT}$).

Nous constatons que la voie N-S (et par analogie la voie E-O) souffre d’une congestion ou saturation de la voie à sa capacité maximale pendant l’intervalle [80, 100] donc d’une durée d’environ 20unités de temps.

III.7.2 : Méthode de commande par seuil maximal :

➤ Heures normales, circulation fluide :

Dans ce cas la commutation des feux est conditionnée par le remplissage de la voie par le nombre maximale des véhicules et qui égale à 25 véh/UT.

La commutation se fait dans deux cas :

- Si la durée maximale du feu rouge est écoulee et le nombre maximale de véhicules n'est pas encore atteint, la commutation vers le feu vert se fait automatiquement.
- Sinon, si le nombre maximal de véhicules est atteint la commutation se fait même si la durée du rouge maximale n'est pas écoulee.

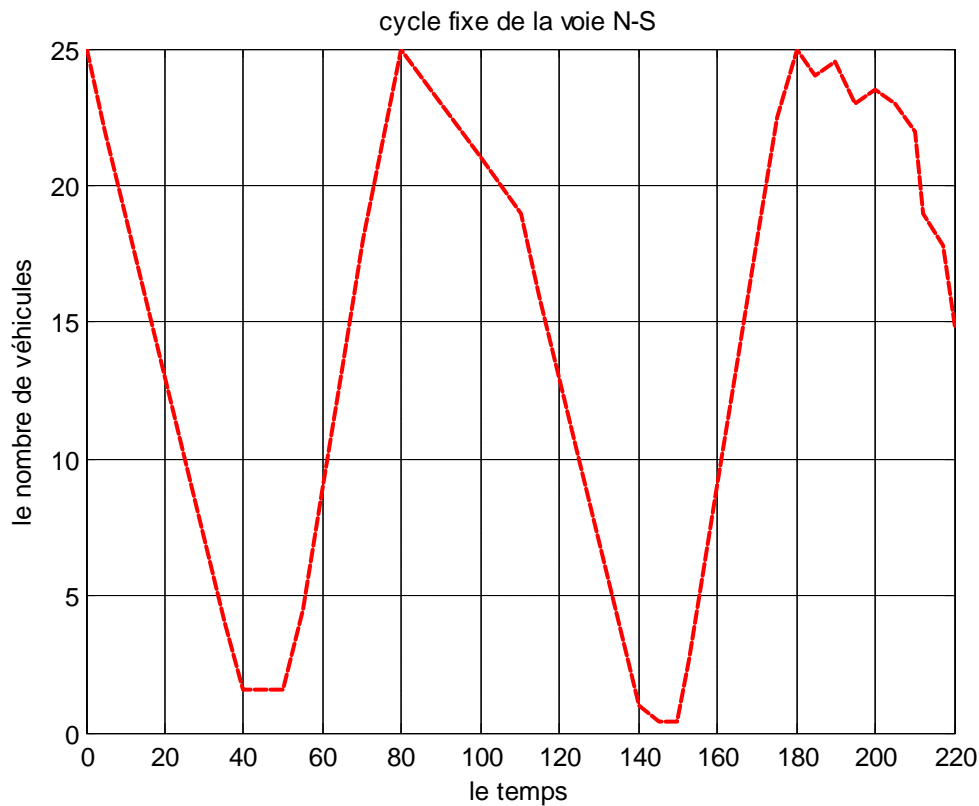


Figure 3.11.a : Commande à seuil maximal de la voie N-S (seuil maximal- Heures normales)

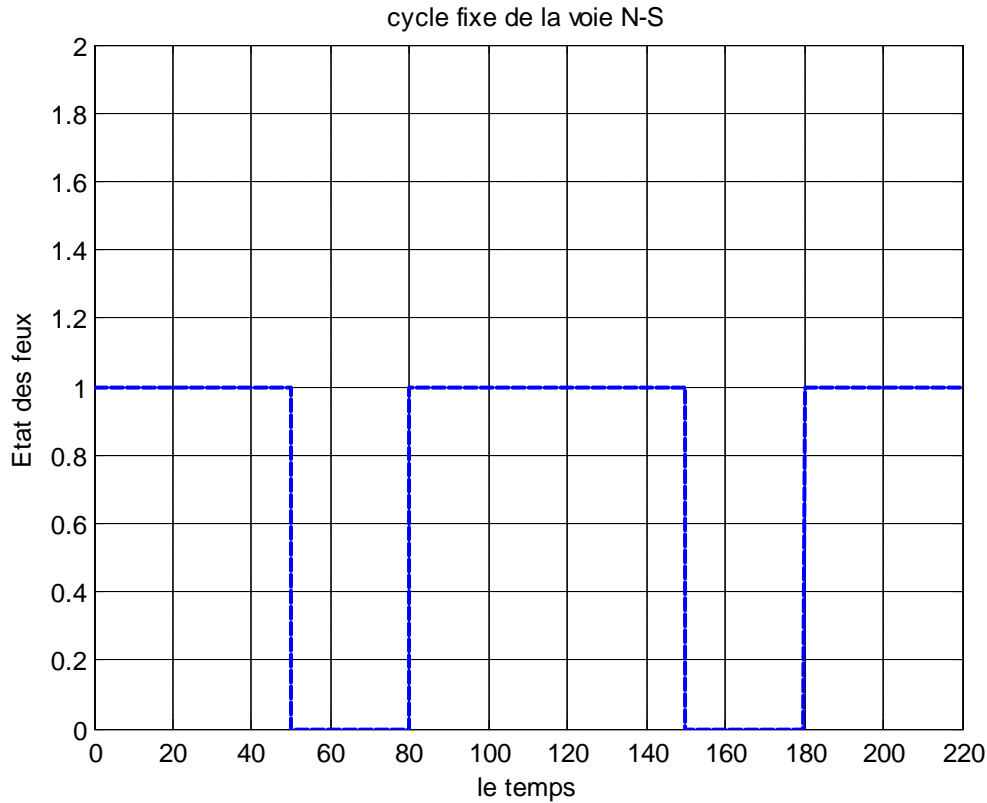


Figure 3.11.b : Commutation des feux a seuil maximal de la voie N-S (seuil maximal- Heures normales)

Interprétation 2:

Pendant les heures normales, le trafic est caractérisé par un flux d'entrée et un flux de sortie presque égaux dans les voies de carrefour, Ceci conduit à une légère congestion au niveau de l'intersection.

Pour simuler l'état de remplissage des voies, nous avons pris un seuil maximal qui est égal à 25 véh/UT pour lequel la commutation se déclenche s'il sera atteint.

Nous constatons qu'il ya un blocage au niveau du seuil minimal (le vert a duré longtemps) ; et que dans la voie N-S la durée du feu vert [50-70] est plus longue que celle du feu rouge qui égale à 30 U.T, cette gestion permet de libérer la voie qui est empruntée par un nombre important de véhicules.

➤ Heures de pointe, circulation difficile :

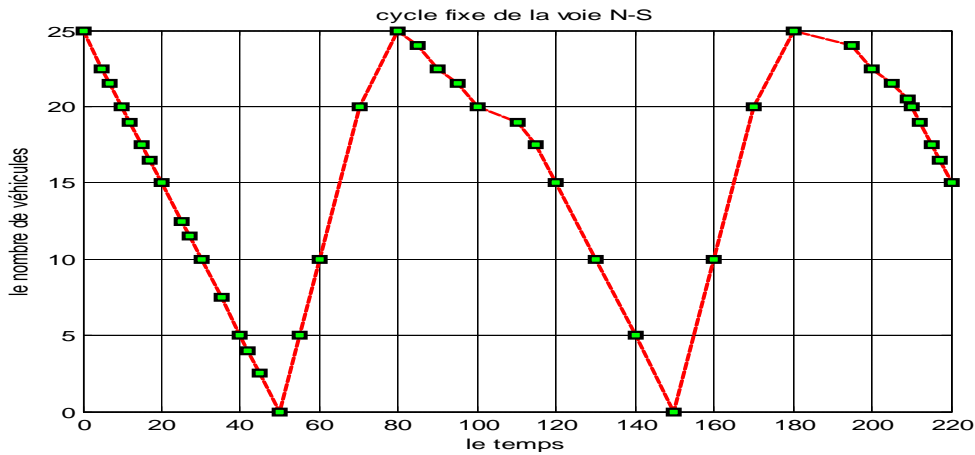


Figure 3.12.a : Commande à seuil maximal de la voie N-S (seuil maximal- Heures de pointe)

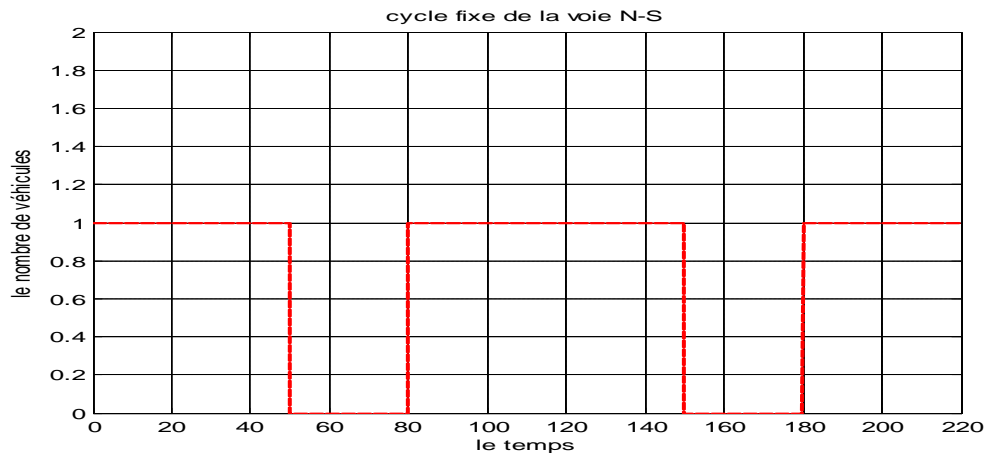


Figure 3.12.b : Commutation des feux à seuil maximal de la voie N-S (seuil maximal- Heures de pointe)

III.7.3 : Méthode de commande par seuil minimal :

➤ Heures normales, circulation fluide :

Lorsque la voie devient presque vide (la voie opposée est presque saturée), alors on commute vers le feu rouge, pour rendre la circulation plus fluide.

Dans ce cas la commutation des feux est conditionnée par l'existence d'un nombre minimal de véhicules sur la voie considérée, et qui égale à 4 véh/UT. C'est-à-dire durant le feu vert la commutation vers le rouge se fait :

- Si la durée du vert maximale est écoulée et le nombre de véhiculé minimal n'est pas encore atteint.
- Si le nombre minimal de véhicules est atteint et la durée du vert maximale n'est pas écoulée.

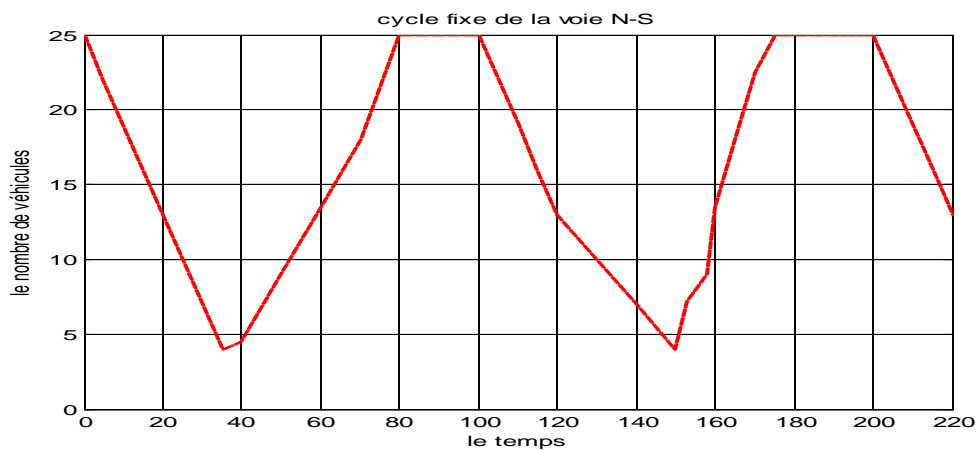


Figure 3.13.a : Commande à seuil minimal de la voie N-S (seuil minimal- Heures normales)

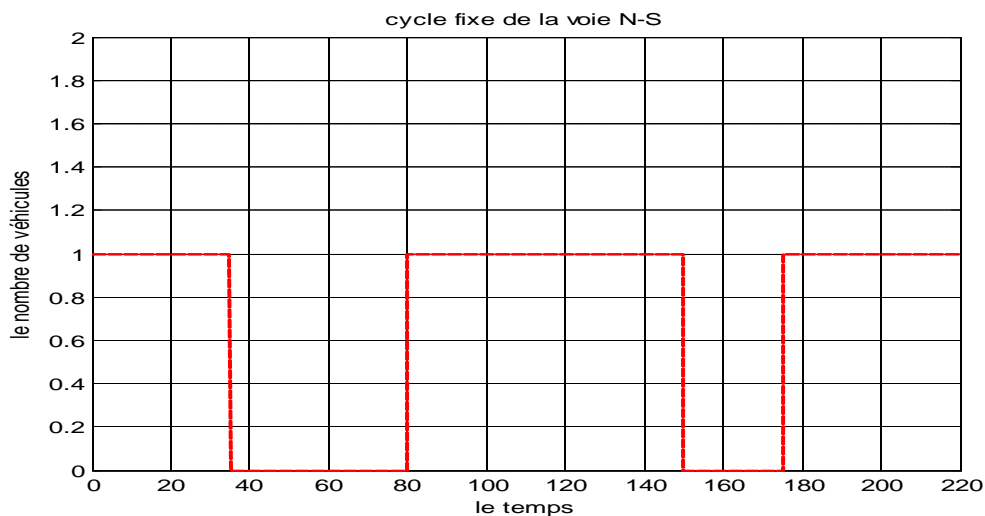


Figure 3.13.b : Commutation des feux à seuil minimal de la voie N-S (seuil minimal- Heures normales)

Interprétation3 :

Pour simuler l'état de remplissage des voies, nous avons pris un seuil minimal qui égale à 4véh/U.T, pour lequel la commutation se déclenche s'il sera atteint.

Nous constatons qu'il ya un blocage sur les intervalles [80-100] et [175-200] au niveau du seuil maximal et cela veut dire que le feu rouge a mis trop de temps pour se déclencher.

➤ **Heures de pointe, circulation difficile :**

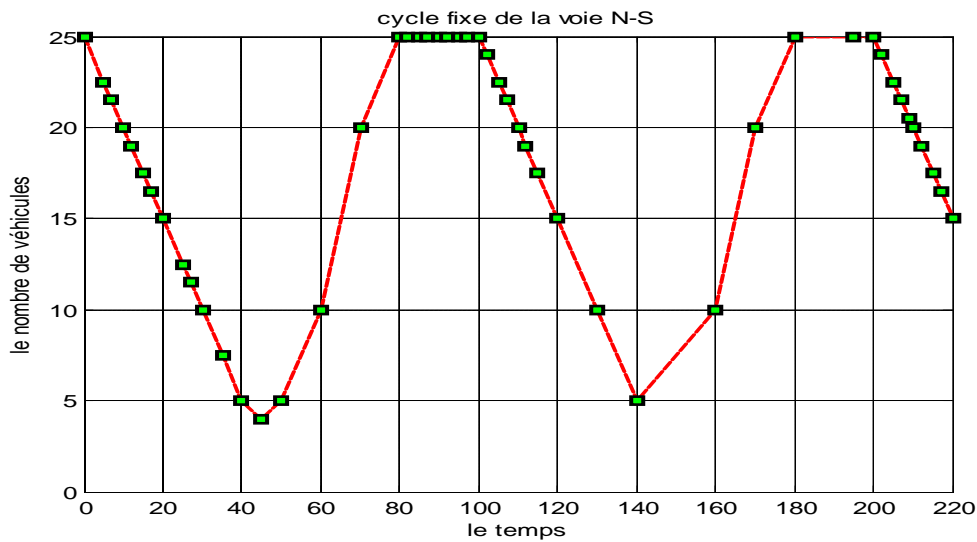


Figure 3.14.a : Commande à seuil minimal de la voie N-S (seuil minimal- Heures de pointe)

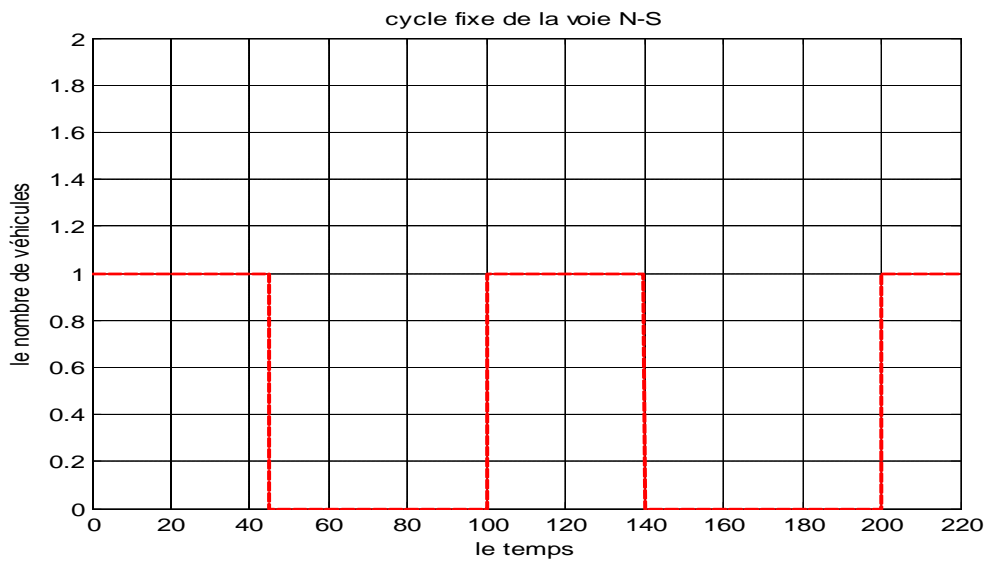


Figure 3.14.b : Commutation des feux à seuil minimal de la voie N-S (seuil minimal- Heures de pointe)

III.7.4 : Méthode de commande par cycle mixte :

➤ Heures normales, circulation fluide :

Dans ce cas on commande les cycles des feux en respectant les deux conditions retenues dans les deux cas précédant (seuil maximal, seuil minimal)

C'est-à-dire la commutation se fait si :

- la durée maximale du feu rouge est écoulée et le nombre maximale de véhicules n'est pas encore atteint, la commutation vers le feu vert se fait automatiquement.
- le nombre maximal de véhicules est atteint la commutation se fait même si la durée du rouge maximale n'est pas écoulée.
- La durée maximale du vert est écoulée et le nombre de véhicules minimal n'est pas atteint, la commutation vers le feu rouge se fait automatiquement.
- Le nombre de véhicules minimal est atteint et la durée du vert maximal n'est pas écoulée

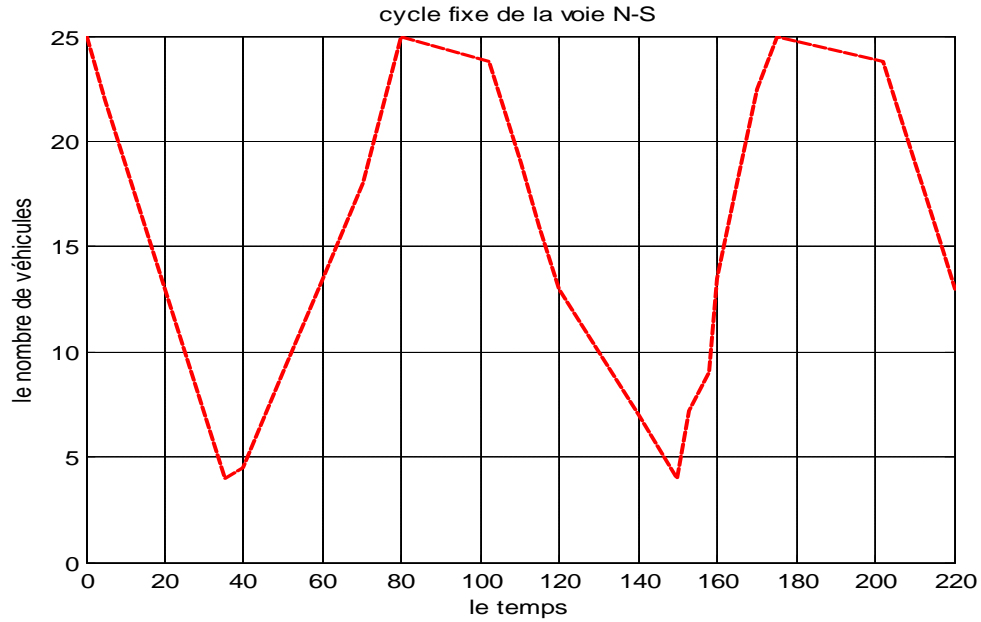


Figure 3.15.a : Commande à seuil mixte de la voie N-S (cycle mixte- Heures normales)

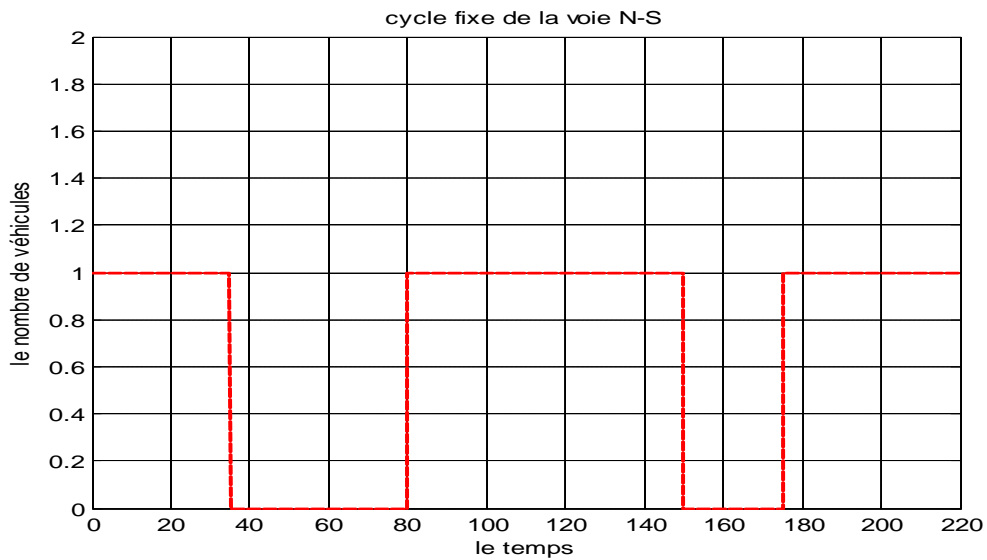


Figure 3.15.b : Commutation des feux à seuil mixte de la voie N-S (cycle mixte- Heures normales)

➤ Heures de pointe, circulation difficile :

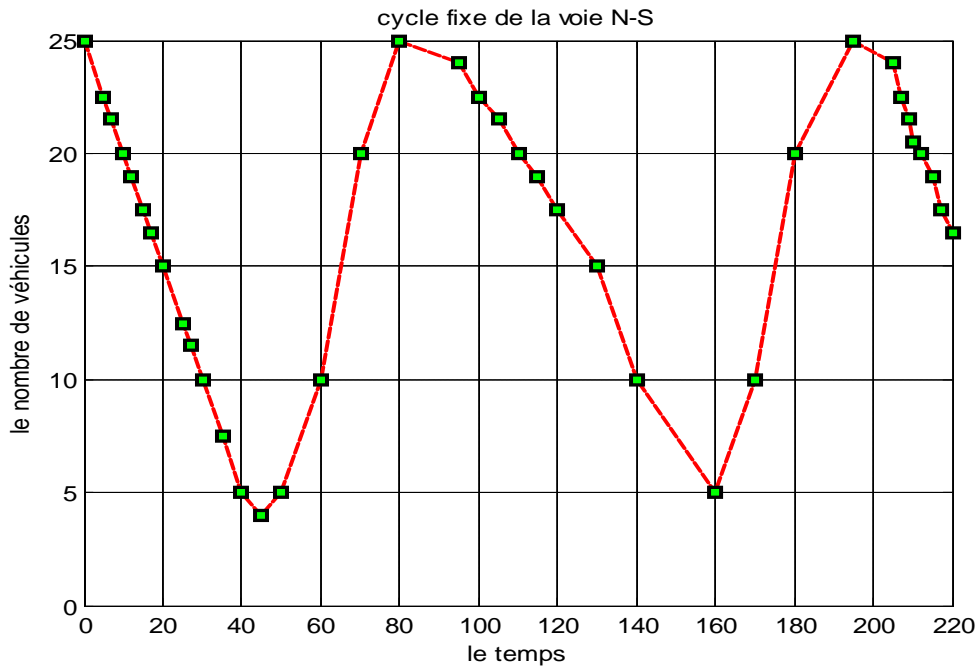


Figure 3.16.a : Commande à seuil mixte de la voie N-S (cycle mixte- Heures de pointe)

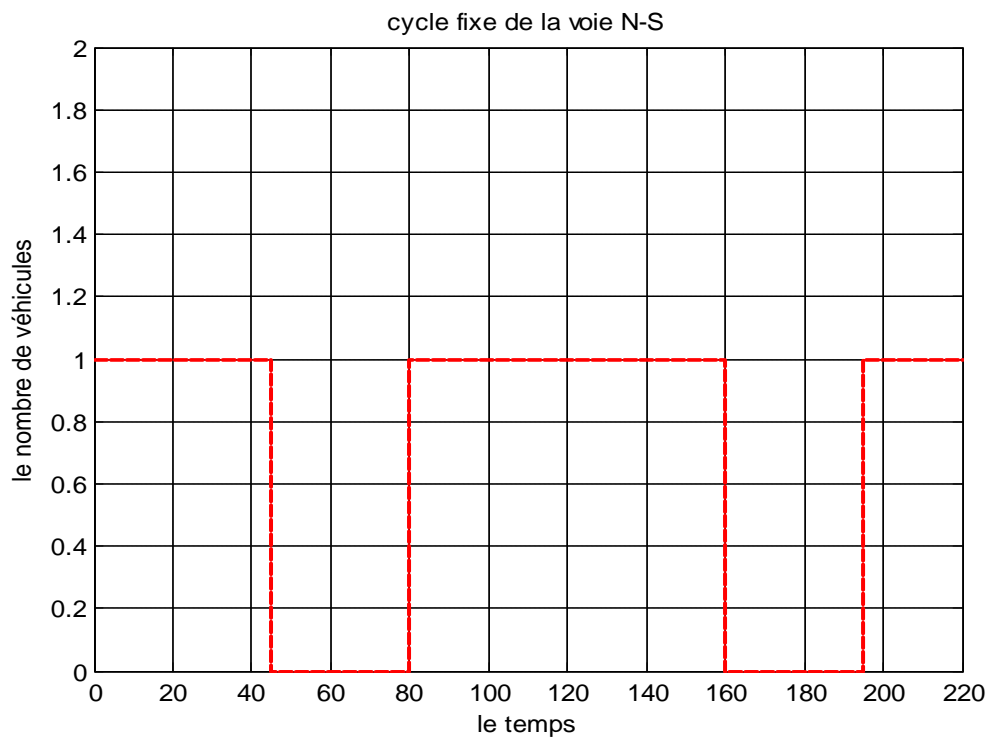


Figure 3.16.b : Commutation des feux à seuil mixte de la voie N-S (cycle mixte- Heures de pointe)

Interprétation 4:

Pendant les heures de pointes, le trafic se caractérise par un flux important d'entrée des véhicules dans les voies du carrefour, et un flux de sortie très faible. Ceci conduit à une congestion plus au moins importante au niveau de l'intersection. Avec l'absence de blocage au niveau des seuils maximal et minimal.

Pour simuler l'état de remplissage des voies, nous avons pris un seuil maximal qui est égale a 25 véh/UT et un seuil minimal qui égale à 4 véh/UT. La commutation déclenche dans les deux cas.

Nous constatons que dans les deux cas (heures de pointes ou normales), il n'y a pas de blocage et cela veut dire qu'il ya pas de congestion ou saturation au niveau de l'intersection.

Cas d'accident :

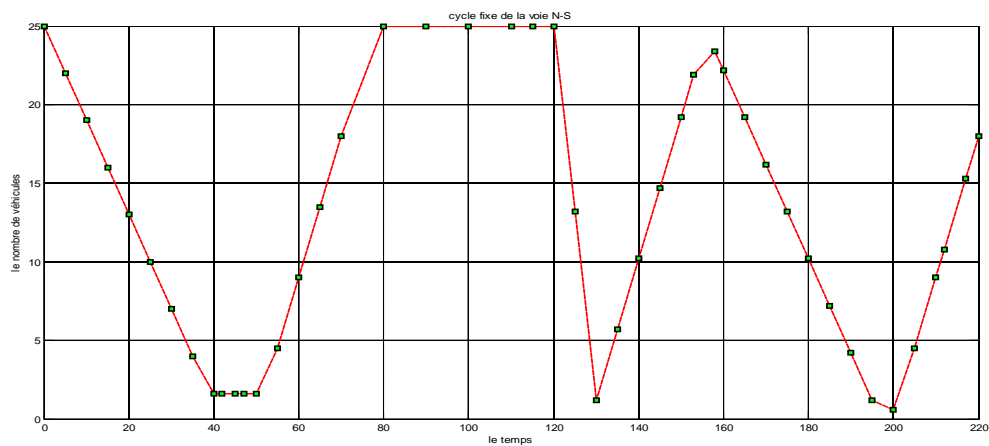


Figure 3.17.a : Simulation d'un accident à l' instant t=70 (Cas d'accident)

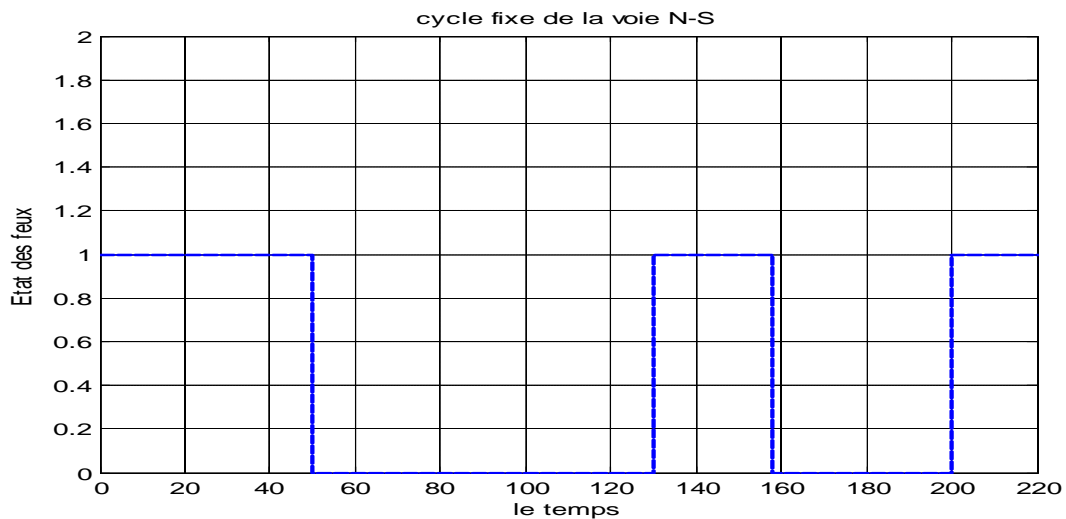


Figure 3.17.b : Etat du feu vert dans la voie N-S (Cas d'accident)

Interprétation5 :

Avant l'accident .le trafic est commandé par la méthode mixte ($c_{max}=25$; $c_{min}=4$) avec un débit d'entrée= 0.9 véh/UT et un débit de sortie= 0.6 véh/UT .à l'instant $t=70$ (feu rouge allumé),on simule un accident qui provoque le blocage de la voie N-S. jusqu'à l'instant $t=120$. La durée de feu rouge est rallongé ce qui conduit à la saturation de la voie. Donc on assiste à une situation ou les deux feux rouge (N-S et E-O) sont allumés.

Pour débloquer cette situation les véhicules de la voie accidentée sont réorientés vers une voie de dégagement avec un débit $=2.4$ véh/UT .A l'instant $t=130$ la voie est dégagé et la situation redevient normale.

III.8. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié 4 méthodes de commande afin de gérer le trafic dans une intersection a deux voies (N-S et E-O). Nous avons opté pour une commande événementielle à seuil qui permet de modifier le plan de commutation des feux conformément à l'état de remplissage des voies afin d'éviter les états de congestion et de blocage.

Nous avons aussi proposé une méthode de gestion de trafic en cas d'accident sur l'une des deux voies.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Dans notre projet, nous avons étudié la dynamique du trafic urbain gérée par les feux tricolore de carrefour, en vue de résoudre les problèmes liés à la congestion et afin d'améliorer la fluidité de la circulation et rendre le trafic plus facile.

La description du fonctionnement du carrefour par les différents modèles à base de Réseaux de Petri, nous a permis de synthétiser des lois de commandes événementielles que nous avons appliqué aux cycles de commutation des feux tricolores. Nous avons alors adapté quatre algorithmes de commande des feux tricolores :

1. Un algorithme de commande par cycle fixe qui est une méthode classique et qui consiste à commuter les feux chaque 50s. mais cette dernière a montré une insuffisance (congestion, blocage, longueur des files, ...) et notamment pendant les heures de circulation difficile.
2. Un algorithme de commande par rupture de seuil haut qui consiste à commuter les phases de feu lors du franchissement du seuil qui caractérise l'état de saturation de la voie où le feu est rouge. Il s'agit de privilégier la résorption de la file d'attente sur la voie dont la phase de feu est « vert ». Cependant comme l'ont montré les résultats, l'inconvénient de cette méthode est que dans la voie où le feu est rouge on assiste au phénomène de saturation rapide de la file d'attente.
3. L'algorithme de commande par rupture de seuil bas qui permet de commuter les phases de feu lors du franchissement du seuil qui caractérise l'état d'occupation minimale de la voie où le feu est vert. Il s'agit d'empêcher la formation d'une file d'attente sur la voie dont la phase de feu est « rouge »
4. L'algorithme de commande par rupture de seuils mixtes (bas et hauts) qui consiste à commuter les phases de feu sur occurrence de la rupture des seuils bas ou hauts sur les deux voies du carrefour. L'objectif de cet algorithme est double : il consiste à empêcher la formation d'une file d'attente dont la phase de feu est « rouge » et de résorber la file d'attente sur la voie dont la phase de feu est « vert ».

Au terme de ce mémoire, quelques perspectives méritent d'être explorées :

Au niveau de la commande, nous envisageons d'exploiter les techniques de la commande optimale qui consistent à chercher une commande minimisant un critère donné (longueurs des files d'attente, temps d'attente au carrefour, ...).

Au niveau régulation, nous n'avons pas pu aborder le problème d'un réseau de plusieurs carrefours.

Références Bibliographiques

BIBLIOGRAPHIE

[1] EL HMAM M.S. " *Contribution à la modélisation et à la simulation hybride du flux de trafic*". Thèse de Doctorat en Génie Informatique et Automatique, Université d'Artois, 11 décembre 2006.

[2] YAN F. "*Contribution à la modélisation et à la régulation du trafic aux intersections : Intégration des communications Véhicule-Infrastructure*". Thèse de Doctorat en Automatique, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 14 Mars 2012.

[3] BELARBI F. " *Les systèmes de communication entre les véhicules et l'infrastructure: leur contribution aux pratiques d'exploitation de la route. Le cas d'une application pour l'information des autoroutes (AIDA)*". Thèse de Doctorat en Automatique, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 29 septembre 2004.

[4] TOLBA C. "*Contribution à l'utilisation des réseaux de Petri pour la modélisation et la régulation du trafic urbain et interurbain*". Thèse de Doctorat en Automatique et Informatique, Université de technologie de BELFORT-MONTBELIARD, 2004.

[5] EL HADOUAJ S. "*Conception de comportements de résolution de conflits et de coordination: Application à une simulation multi-agent du trafic routier*". Thèse de Doctorat en Informatique, Université Pierre et Marie Curie, 2000.

[6] IORDANOVA V. "*Contribution à la modélisation et la commande du trafic routier : Approches par Bond Graph et commande par platitude*". Thèse de Doctorat en Génie informatique et automatique, université d'Artois, 2006.

[7] ELLOUMI N. "*Modélisation et Commande du Trafic sur un Corridor : Application de la méthode LP*". Thèse de doctorat 3ème cycle. Université Paris XI Orsay, France. 1996.

- [8] COHEN S. "*Ingénierie du Trafic Routier : Eléments de théorie du trafic et applications*". Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées (1990).
- [9] UZUNOVA M. " *Commande non-entière des systèmes de commande, Développement et application pour les modèles de flux de trafic routier* ". Thèse de Doctorat en Génie Informatique et Automatique, Université d'Artois, 4 décembre 2009.
- [10] MOKHTARI A. "*Diagnostic des systèmes hybrides : développement d'une méthode associant la détection par classification et la simulation dynamique*", Thèse Doctorat en Systèmes industriels, Université de Toulouse, 2007.
- [11] GHOMRI L. "*Synthèse de contrôleur de systèmes hybrides à flux continu par réseaux de Petri hybrides*". Thèse doctorat en Productique, Université ABOU-BEKR BELKAÏD – Tlemcen, 2012.
- [12] KHAOUNI S. "*Modélisation et Surveillance des Systèmes Dynamiques Hybrides par Automates Hybrides*", Magister en électrotechnique, université FERHAT ABBAS – SETIF 2010.
- [13] CEBRON B. "*Commande de systèmes dynamiques hybrides*", Thèse Doctorat en Automatique et Informatique Appliquée, Université D' ANGERS ISTIA, 2000.
- [14] RAMADGE P.J, WONHAM W.M. "*Supervisory Control of a class of Discrete-Event Processes*". SIAM J. Control and Optimization, vol. 25, no. 1, January 1987.
- [15] DAVID R., ALLA H. "*Petri nets for modeling of dynamic systems: a survey*" Automatica. 30 (2) (1994), pp. 175-202.
- [16] HAMDI F. "*Contribution à la Synthèse d'Observateurs Pour les Systèmes Hybrides*", Thèse de Doctorat en Electronique, Université de Batna, 2010.
- [17] Zaytoon J. "*Systèmes dynamiques hybrides*". Collection Hermès. Paris France. 2001.

- [18] HADJ-AMOR H J. "*Contribution au prototypage virtuel de systèmes mécatroniques basé sur une architecture distribuée HLA. Expérimentation sous les environnements Open Modelica-OpenMASK*", Thèse doctorat, Université du Sud Toulon Var, 04 Décembre 2008.
- [19] MITSIOUK A. "*Contribution à l'Optimisation des Systèmes Dynamiques : Application au Génie des Procédés*", Thèse doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, 12 Juillet 2007.
- [20] DAVID R, ALLA H. "*Du grafcet aux réseaux de Petri*" (2^e édition) HERMES, Paris, 1992.
- [21] KATTAN B. "*Synthèse structurelle d'un contrôleur basée sur le Grafcet*". These Doctorat UNIVERSITÉ Joseph Fourier – Grenoble I, 2004.
- [22] DAVID R, ALLA H. "*Petri nets for modeling of dynamic systems: a survey*", Automatica. 30 (2) (1994), pp. 175-202.
- [23] LE BAIL J, ALLA H, DAVID R. "*Asymptotic Continuous Petri Nets*", Journal of Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications, Vol.2, p.235-263.1993.
- [24] DAVID R, ALLA H. "*On Hybrid Petri Nets*", Journal of Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications, 11, pp. 9-40. 2001
- [25] GHOMRI L, ALLA H. "*Modeling and analysis using hybrid Petri nets, in nonlinear analysis: Hybrid Petri nets*". Nonlinear analysis: hybrid systems, 1 (2): pp.141-153. ISSN 1751-570X. 2007.