

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITÉ 8 MAI 1945-GUELMA
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Automatique et Informatique Industrielle
Spécialité : Commande et Diagnostic des Systèmes Industriels

Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de *Master Académique*

Optimisation des feux de signalisation par essais de particule

Présenté par:

- Hamzaoui Rabiha
- Achour Houria

Sous la Direction de :

- D^r Kechida Sihem
- D^r Bouriachi Fares



2016/2017

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITÉ 8 MAI 1945-GUELMA
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Automatique et Informatique Industrielle
Spécialité : Commande et Diagnostic des Systèmes Industriels

Mémoire de fin d'études
pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Optimisation des feux de signalisation par essaims de particule

Présenter par:

- **Hamzaoui Rabiha**
- **Achour Houria**

Sous la Direction de :

- **D^r Kechida Sihem**
- **D^r Bourriachi Fares**

Résumé :

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. Cependant la recherche d'un plan de coordination optimal reste une solution pour améliorer la circulation et pour réduire les phénomènes de congestion.

Le travail présenté dans la cadre de ce mémoire s'intéresse à l'étude de la gestion du trafic urbain de l'agglomération Guélmoise où nous nous concentrons sur la détermination d'un meilleur plan de feux de signalisation permettant d'assurer un débit de sortie maximal au niveau de deux intersections adjacentes. L'idée est d'appliquer la méthode d'optimisation par essais particuliers pour trouver les durées des feux. Les résultats de simulation issus des différents scénarios montrent leur efficacité par rapport à ceux obtenus par les algorithmes génétiques.

Mots clés : *Régulation du trafic urbain, Optimisation par essais de particules, gestion du trafic, congestion.*

Abstract

The traditional approach to preventing or reducing congestion in modern cities is based on road signs. The right-of-way is allocated to users by the use of standard colors (red-orange / yellow-green), Allows to resolve the conflicts between the different traffic flows at the crossroads. However, the search for an optimal coordination plan remains a solution to improve the circulation and to reduce congestion phenomena.

The work presented in this thesis focuses on the study of urban traffic management in the urban area of Guelmoise where we focus on determining a better signaling plan to ensure a flow of traffic. Maximum output at two adjacent intersections. The idea is to apply the particle swarm optimization method to find the duration of the fires. The simulation results from the various scenarios show their effectiveness compared to those obtained by genetic algorithms.

Key words: Urban traffic control, particle swarm optimization, traffic management congestion.

ملخص:

تعتمد الطريقة التقليدية المعتمدة للحد أو تقليل الازدحام في المدن الحديثة ، وتستند على إشارات المرور. حيث انه يتم اعطاء حق الطريق من المستخدمين باستخدام أضواءالالوان القياسية (أحمر- برتقالي / أصفر-أخضر)، مما يسمح بحل النزاعات بين مختلف تدفقات حركة المرور عند التقاطعات. مع ذلك، البحث عن خطة التنسيق الأمثل يبقى الحل لتحسين تدفق حركة المرور والحد من الازدحام.

يهتم العمل المقدم في إطار هذا البحث على دراسة إدارة حركة المرور في التقاطعات المجاورة للمنطقة "قالمة". حيث نركز على تحديد أفضل خطة لإشارات المرور لضمان تدفق الطاقة الانتاجية القصوى في اثنين من التقاطعات المجاورة. والفكرة هي أن تطبيق أسلوب الأمثل من قبل سرب الجسيمات للعثور على أضعاف الاضواء. و نتائج المحاكاة من سيناريوهات مختلفة تثبت فعاليتها مقارنة مع تلك التي تم الحصول عليها عن طريق الخوارزميات الجينية.

كلمات البحث: مراقبة حركة المرور في المناطق الحضرية، تحسين أسراب الجسيمات "سرب الطيور"، إدارة حركة

Remerciement

En préambule à ce mémoire nous remerciant **ALLAH** qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude .Nous souhaitant adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif du département Génie électrique, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Nous tenant à remercier sincèrement Madame , '**Kachida Sihem**' et Monsieur '**Bouriachi Fares**', qui, en tant que Directeurs de mémoire, se sont toujours montrés à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'ils ont bien voulu nous consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

On n'oublie pas **nos parents** pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous **nos proches et amis**, qui nous ont toujours encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Abréviation

Introduction générale.....01-02**Chapitre 1 : une revue du trafic urbain.....03-25**

1.1. Introduction.....	03
1.2. Définition.....	03
1.3. Les variables du trafic.....	04
1.3.1. Notion de trajectoire.....	04
1.3.2. Variables et caractéristiques d'un véhicule.....	06
1.3.3. Le débit.....	07
1.3.4. La concentration (ou densité).....	08
1.3.5. Le taux d'occupation.....	08
1.3.6. La vitesse moyenne temporelle.....	08
1.3.7. La vitesse moyenne spatiale ou vitesse de flot.....	09
1.4. Modélisation du trafic routier.....	09
1.4.1 Modèles microscopiques.....	09
1.4.1.1 Approches de représentation des modèles microscopiques.....	10
a/ Modèles véhicule-suiveur.....	10
b/ Modèle de particules.....	10
1.4.1.2 Variables microscopiques du trafic.....	10
a/ Espace inter-véhiculaire.....	10
b/ Temps inter-véhiculaire.....	11
c/ Vitesse du véhicule.....	11

d/ Accélération du véhicule.....	12
1.4.2 Modèles mésoscopiques.....	13
1.4.3 Modèles macroscopiques.....	13
1.4.3.1 Modèle du premier ordre.....	14
a/ Représentation continue.....	14
b/ Equation de conservation.....	14
c/ Diagramme fondamental.....	15
1.4.3.2 Variables macroscopiques du trafic.....	16
a/ Densité moyenne.....	16
b/Taux d'occupation.....	16
c/ Débit moyen.....	17
d/ Vitesse moyenne.....	17
1.5 Les différentes technologies.....	18
1.5.1 Technologies de capteurs.....	18
a/ Les capteurs intrusifs.....	19
i. Les capteurs à boucles inductives.....	19
ii. Les capteurs à Tubes pneumatiques.....	19
iii. Les capteurs à « Fibres optiques ».....	20
b/Capteurs non-intrusifs.....	21
i. Les capteurs hyperfréquences utilisant l'effet Doppler.....	21
ii. Capteurs Laser.....	21
iii. Capteurs à Infrarouge actifs et passifs.....	22
iv. Capteurs vidéo.....	22
c/ Capteurs embarqués.....	23

1.6. Conclusion.....	25
Chapitre 2 : Régulation du trafic urbain.....	27-46
2.1 Introduction.....	27
2.2 Les Equipements Urbains Dynamiques (EUD).....	27
2.2.1 Régulation du trafic.....	28
2.2.2 Aspect réglementaire et normatif.....	29
2.2.3 Outils de régulation.....	30
2.2.3.1 Les signaux de régulation.....	30
2.2.3.2 Les contrôleurs de carrefour.....	31
2.2.3.3 Micro-régulation.....	34
2.2.3.4 Macro-régulation.....	35
2.2.3.5 Synchronisation.....	36
2.2.3.6 Traitement des saturations.....	37
2.3 La régulation des Carrefour à feux.....	38
2.3.1 Les types de régulation d'un carrefour.....	38
2.3.1.1 Carrefour à plan de feux fixe.....	39
2.3.1.2 Régulation du trafic avec les systèmes adaptatifs.....	39
2.4 Les Systèmes de transport intelligent.....	40
2.4.1 Présentation.....	40
2.4.2 Étendue.....	41
2.4.3 Une revue du Système de transport intelligent.....	41
2.4.4 Technologies des transports.....	43
i. Communications sans fil.....	43

ii. Technologies de calcul.....	44
iii. Technologies de localisation.....	44
iv. Téléphonie mobile.....	45
v. Réseaux de capteurs sans fil.....	45
2.5 Conclusion.....	46
Chapitre 3 : optimisation par Pso.....	47-60
3.1 Introduction.....	47
3.2 Formulation d'un problème d'optimisation dans le trafic urbain.....	47
3.2.1 Description de deux intersections adjacentes	47
3.2.2 Formulation d'un problème d'optimisation.....	49
a/ Fonction objective.....	49
b/ Variables de décision.....	50
c/ Les contraintes.....	50
3.2.3 Algorithme de solution.....	51
3.3 L'algorithme d'Optimisation par Essaim Particulaire.....	51
3.3.1 Introduction.....	51
3.3.2 Applications.....	52
3.3.3 Méthode par essais particuliers.....	52
3.3.3.1 Principe général.....	52
3.3.3.2 Formalisation.....	53
3.3.3.3 Configuration de la méthode.....	55
a/ Nombre de particules.....	55
b/ Topologie du voisinage.....	56
c/ Coefficients de confiance.....	56

d/ Vitesse maximale et coefficient de constriction.....	57
e/Facteur d'inertie.....	57
f/Initialisation de l'essai.....	58
g/ Critères d'arrêt.....	58
3.3.4 Amélioration des algorithmes PSO.....	60
3.4 Conclusion.....	60
Chapitre 4: Simulation et résultat.....	61 - 68
4.1 Introduction.....	61
4.2 Choix de site.....	61
4.3 Tests numérique.....	61
4.3.1 Description de la zone d'études.....	61
4.3.2 Résultats de simulation et discussions.....	64
4.4 Conclusion.....	68
Conclusion générale.....	69
Bibliographique.....	70

Liste des figures

Figure 1.1 : image montrée la congestion dans la capitale.....	04
Figure 1.2 : Position d'un véhicule sur la route à quatre instants différents	05
Figure 1.3 : Illustration de la notation des variables caractéristiques d'un véhicule....	07
Figure 1.4 : Illustration de débit.....	08
Figure 1.5 : Illustration de concentration.....	08
Figure 1.6 :L'écart du temps inter-véhiculaire.....	11
Figure 1.7 : Section de la route.....	14
Figure 1.8 : Diagramme fondamental.....	15
Figure 2.1 : TCSP en région parisienne. Les bus circulent sur une voie réservée.....	28
Figure 2.2 : Schéma de principe d'un contrôleur.....	31
Figure 2.3 : Documentation GARBARINI sur les ondes vertes.....	36
Figure 2.4 : PC du SIRAC.....	37
Figure 2.5 . Illustration d'un carrefour isolé.....	38
Figure 3.1 :(a) Réseau artériel. (b) Deux intersections adjacentes.....	48
Figure 3.2 : Diagramme distance-temps de la coordination des feux.....	48
Figure 3.3 : Volée d'Anser en formation en V.....	52
Figure 3.4 : Déplacement d'une particule.....	53
Figure 3.5 : (a) anneau (avec $n = 2$), (b) rayon, (c) étoile.....	56
Figure 3.6 : Méthode proposée pour optimiser les paramètres du signal de trafic artériel.....	59
Figure 4.1 : Présentation de la zone d'étude.....	62
Figure 4.2 : Présentation schématique de la zone d'étude.....	62

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Notations et Unités des données de trafic.....	24
Tableau 1.2 : Mesures disponibles par les différents capteurs.....	25
Tableau 3.1 : Les phases de feux actives durant un cycle de temps.....	49
Tableau 4.1 : Les différents scénarios expérimentaux de volume du trafic.....	62
Tableau 4.2 : Plan des feux obtenu pour les trois scénarios.....	67
Tableau 4.3 : Comparaison des résultats numériques.....	68

Abréviations

AG : Algorithme génétique

BTS : Base de Temps Synchronisée

CERTU : le Centre d'Etude sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme

FCD : Floating Car Data(Donné Cellulaire Flottante)

GPS : Système de Positionnement Global

IISR : Interministérielle sur la Signalisation Routière

IP : Internet Protocol

JCS : Jaune Clignotant de Sécurité

OPAC : Optimisation Policées for Adaptive Control

PC : Poste Central

PMR : Personnes à Mobilité Réduite

PRODYN : Programmation Dynamique

PSO : l'optimisation par essaim particulaire

RTU : Régulation du Trafic Urbain

SCOOT : Split Cycle Offset Optimisation Technique

SEGUR : Système 'Evolutif de Gestion Urbain de Régulation

SLT : Signalisation Lumineuse Trafic

SRT : Système de Régulation du Trafic

STI : Système de Transport Intelligent

TCSP : Transports en Commun en Site Propre

Introduction générale

Depuis la seconde moitié du 20^{ème} siècle, le phénomène de la congestion routière est devenu prédominant en raison de l'augmentation rapide de nombre de véhicules et de la demande en transport. Surtout au cours de la dernière décennie, la congestion a attiré une grande attention en raison de la crise énergétique mondiale et les préoccupations environnementales. En Algérie, les voies urbaines des principales agglomérations connaissent, ces dernières années, une congestion importante et grandissante à cause d'une forte croissance (10% par an) du parc national d'automobile qui s'élève à environ 7 millions en 2016 dont 6 millions dans la ville de Guelma alors qu'en 2003 ce nombre n'a pas dépassé 4 millions [thèse de bouriachi]. Ce qui explique l'accroissement des demandes en circulation routière. Par conséquent, le transport routier engendre beaucoup de nuisances, des embouteillages, des accidents et des bouchons quotidiens...etc.

Pour réduire le phénomène de congestion dans les zones urbaines, des différentes stratégies sont adoptées telles que : la construction de nouvelles infrastructures, l'élargissement des routes très fréquentées, la mise en place des établissements publics de transport urbain et semi urbain et la mise en oeuvre des stratégies de transport (par exemple d'optimiser l'utilisation des infrastructures existantes). Mais, ces solutions sont encore loin pour faciliter une gestion optimale du trafic parce qu'ils sont incapables de répondre à la fluctuation du débit de la demande. Alors la meilleure solution pour la réduction du phénomène de la congestion urbaine sera de rechercher dans la signalisation des feux.

C'est dans cette optique que s'inscrit notre travail de Master, il s'intéresse à la recherche d'un nouveau plan de coordination des feux de signalisation garantissant une meilleure gestion du trafic en termes de débit de sortie maximal. L'idée est d'appliquer le concept d'optimisation pour déterminer les nouvelles durées des feux de signalisation pour deux intersections adjacentes. Le travail est réalisé en appliquant la méthode d'optimisation par essaims de particules (Particle Swarm Optimization, en anglais). Les résultats de simulation sont comparés avec ceux obtenus par les algorithmes génétiques (AG) dans le cadre de thèse de Bouraichi [thèse de bouriachi]. L'étude comparative permettra ainsi de déduire le meilleur plan de coordination des feux.

Le mémoire est organisé en quatre chapitres encadré par une introduction et conclusion générale.

Le premier chapitre est dédié à un aperçu général sur le trafic. Il présente un rappel de quelques concepts de base sur les variables de trafic et la classification des modèles.

Le second chapitre est consacré à la régulation du trafic. L'accent est mis sur les différents types de contrôle dans le domaine de trafic.

Dans le chapitre trois, nous exposons la méthode d'optimisation appliquée dans la cadre de ce travail, à savoir son principe, ses variables, notion de voisinage, ... etc

L'étude en simulation est exposée en dernier chapitre, effectuée pour deux intersections adjacentes signalisées au niveau de la ville de Guelma. Les meilleurs feux de signalisation sont déduits de la comparaison des résultats obtenus et ceux issus des algorithmes génétiques.



Chapitre 1
Aperçu générale sur le trafic

1.1. Introduction

La croissance permanente de la population dans les villes modernes a augmenté le nombre des véhicules et aussi la nécessité d'une circulation fluide des personnes et des marchandises dans les réseaux urbains. Ainsi, le problème de la congestion du trafic est devenu l'un des principaux problèmes à résoudre par les systèmes de régulation du trafic d'aujourd'hui. Particulièrement, au cours de la dernière décennie, la congestion du trafic a attiré une attention significative à cause de la crise énergétique mondiale et les préoccupations environnementales. Malgré qu'il existe de bons systèmes de gestion de la route et des infrastructures routières suffisantes pour le transport, nous faisons encore face à une congestion du trafic, en particulier, aux carrefours à feux.

La méthode conventionnelle qui permet d'éviter la congestion dans les villes modernes est la commande par feux de signalisation. En effet, les feux de signalisation permettent de résoudre les conflits inhérents aux intersections. Cependant, les modes de gestion des feux d'un carrefour isolé reposent parfois sur des modèles pensés d'une manière qui les rend inadéquats au traitement des différentes situations rencontrées au niveau local. Il en découle que la commande des feux est souvent approximative et prend en compte des valeurs moyennes.

1.2. Définition

- i. **Trafic routier:** Circulation de nombreux véhicules sur un itinéraire, un réseau [1].
- ii. **Circulation :** Mouvement d'un fluide qui circule.
- iii. **Le carrefour :** Le terme "carrefour" désigne le lieu de rencontre de deux ou plusieurs voies publiques qui se coupent à angle droit ou presque droit. Plus généralement il s'agit de la zone dans laquelle des véhicules se déplaçant sur des routes différentes qui se coupent à angle quelconque, peuvent se rencontrer [2].
- iv. **Le feu de circulation routière :** Un feu de circulation routière est un dispositif permettant la régulation du trafic routier entre les usagers de la route, les véhicules et les piétons. Les feux destinés aux véhicules à moteurs sont généralement de type tricolore, auxquels peuvent s'ajouter des flèches directionnelles. Ceux destinés aux piétons sont bicolores et se distinguent souvent par la reproduction d'une silhouette de piétons [2].

- v. **Le carrefour à feux :** Le carrefour à feux est une intersection dont le trafic est réglé par des feux de signalisation tricolore. L'utilisation de feux doit permettre d'assurer la sécurité des automobilistes et des piétons tout en permettant un débit maximal, donc une certaine fluidité de la circulation. Un carrefour à feux sert uniquement à gérer des conflits dans le temps et l'espace des courants de véhicules et de piétons [2].
- vi. **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 est divers. Le plan de feux 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.
- vii. **La file d'attente (queue) :** Phénomène observé lorsque les véhicules sont ralentis en raison d'un obstacle (feu rouge, péage, incident, tunnel...). Au niveau de carrefour, la file d'attente représente le nombre de véhicules restants à la fin du temps effectif [2].
- viii. **Bouchon :** Zone de la route où les véhicules sont gênés les un par les autres, chaque véhicule retardant le véhicule qui le suit. Un bouchon évolue généralement entre une queue de bouchon dont la position évolue et une tête de bouchon, dont la position est celle du point de contrainte [3].
- ix. **Fluidité :** Etat de l'écoulement du trafic lequel la plupart des véhicules roulent à leur vitesse désirée ou à une vitesse très faiblement inférée
- x. **La congestion :** La considération du diagramme fondamental donne une définition simple de la congestion : le trafic est dit congestionné s'il évolue dans la partie droite du diagramme, c'est-à-dire si la concentration est supérieure à la concentration critique (concentration correspondant au débit maximum) [2].



Figure 1.1 : image montrant la congestion dans la capitale.

- xi. **Diagramme fondamental** : est une relation phénoménologique qui relie le débit avec la densité.

1.3. Les variables du trafic

La théorie de l'écoulement du trafic implique la connaissance des fondamentales caractéristiques des flux de trafic et les méthodes d'analyse avant de s'intéresser aux outils de mesure, il faut préciser quelles sont les variables du trafic accessibles par la mesure. Nous commencerons par les variables individuelles car c'est à partir de celles-ci que sont construites les variables collectives [3].

1.3.1. Notion de trajectoire

La trajectoire est le variable de base de la théorie des flux de trafic qui nous permet de décrire la position du véhicule au cours du temps (t) sur le long de la chaussée, on peut s'intéresser à un véhicule choisi parmi les autres. Supposons que toutes les dix secondes, on puisse mesurer sa position avec une précision suffisante, on pourra alors schématiser l'évolution du véhicule sur la voie par la figure ci-dessous.

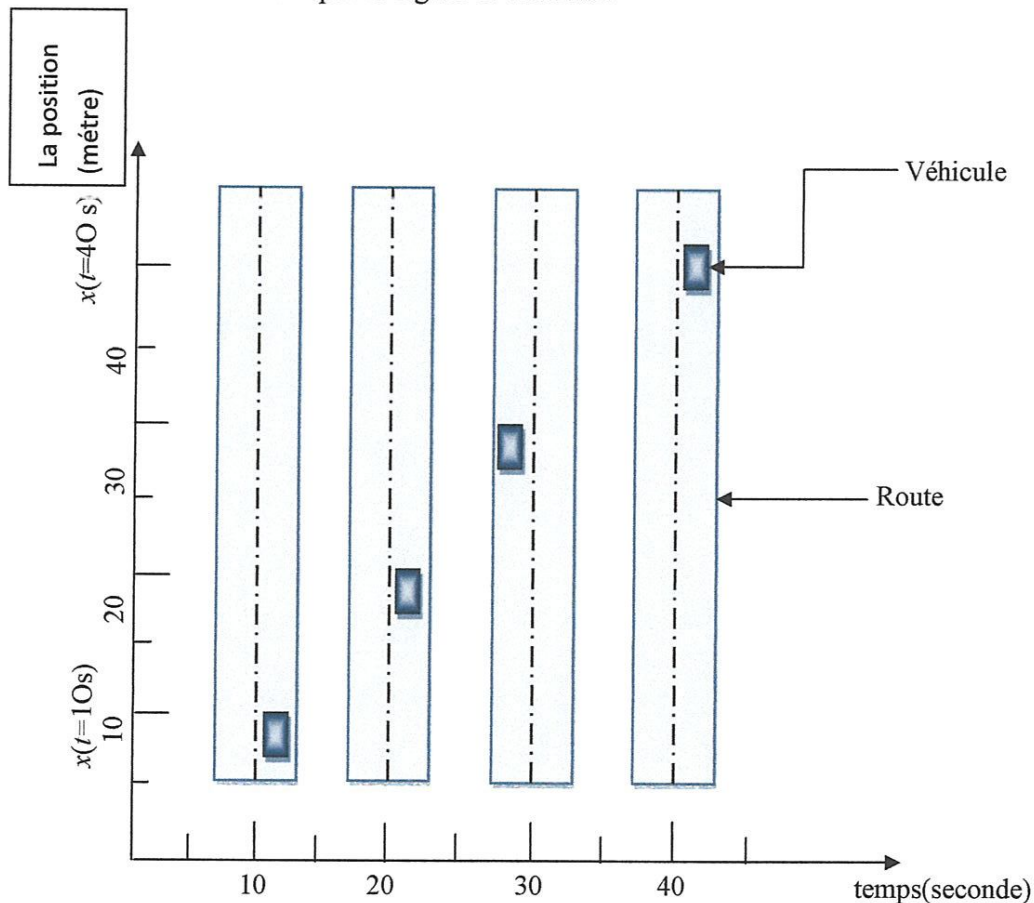


Figure 1.2: Position d'un véhicule sur la route à quatre instants différents

C'est clair que la position à l'instant $t = 10s$ est $x(10) = 10m$ et à l'instant $t = 40s$ est $x(40) = 40m$ avec un changement de voie à l'instant $t = 30s$ (changement peut repérer sur un autre y qui représente le déplacement d'une voie à l'autre).

La trajectoire d'un Véhicule est donc l'ensemble des points successifs de l'espace qu'il occupe accompagné des instants t de passage en ces points. Chaque point de la trajectoire peut donc être repéré dans un espace à trois dimensions (x, y, t), on néglige la hauteur.

1.3.2. Variables et caractéristiques d'un véhicule

En plus de la position à un instant de passage en un point, on peut mesurer la vitesse (soit à un instant, soit en un point) ainsi que l'accélération. Ces variables sont relatives à l'évolution du véhicule le long de la route. Voici la synthèse des définitions présentées ci-dessus.

✚ La position d'un véhicule mesurée à un instant est notée $x(t)$.

✚ La vitesse d'un véhicule est la dérivée de la position par rapport au temps :

$$\dot{x}(t) = v(t) = \frac{dx(t)}{dt} \quad (1.1)$$

✚ L'accélération est la dérivée de la vitesse d'un véhicule par rapport au temps et donc la dérivée seconde de la position par rapport au temps :

$$\ddot{x}(t) = a(t) = \frac{d^2x(t)}{dt^2} = \frac{dv(t)}{dt} \quad (1.2)$$

✚ La longueur du véhicule i notée L_i .

✚ L'inter-distance entre le véhicule i et son véhicule leader ($i - 1$) au temps t , notée :

$$S_i(t) = x_{i-1}(t) - x_i(t) \quad (1.3)$$

✚ La vitesse relative du véhicule i par rapport à son véhicule leader ($i - 1$) au temps t , notée :

$$\dot{S}_i(t) = \dot{x}_{i-1}(t) - \dot{x}_i(t) \quad (1.4)$$

Ces notations sont reprises sur l'illustration ci-dessous.

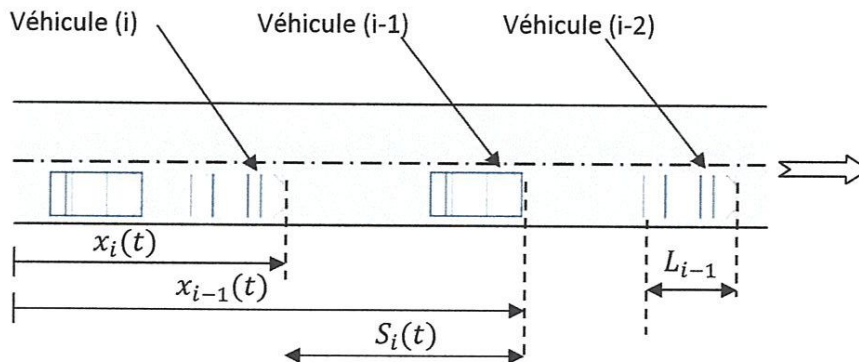


Figure 1.3 : Illustration de la notation des variables caractéristiques d'un véhicule.

D'autres caractéristiques sont associées au véhicule :

- Sa puissance moteur ,
- Sa masse.au conducteur de ce véhicule : la destination finale de son voyage, son type de conduite (plus ou moins agressive).

D'autres caractéristiques encore sont liées non pas à l'une ou l'autre des deux entités de ce couple mais au couple lui-même. On parle alors du couple véhicule-conducteur. La vitesse désirée (la vitesse à laquelle le conducteur, connaissant les caractéristiques de la machine, souhaite conduire en fonction de la nature de la route) est typiquement une caractéristique du couple véhicule-conducteur.

1.3.3. Le débit

Le débit, souvent noté $Q(x, t)$ correspondant au nombre des véhicules écoulés en un point x par unité de temps. Les unités de temps les plus répandues sont l'heure et la journée. Les débits journaliers moyens servant à caractériser la fréquentation d'une voie alors que les débits horaires sont plus utilisés pour décrire la dynamique des flux. Lorsqu'il s'agit par exemple de calculer les réglages de feux d'un carrefour, il faudra utiliser les débits de l'heure la plus chargée pour le dimensionnement. A l'inverse, sur une route départementale peu fréquentée, la notion de débit journalier est la seule à avoir un peu de sens. Pour un débit $Q(x, t)$ défini comme le nombre de véhicules N passant en un point x entre les instants t et $t + \Delta t$, on a [4] :

$$Q(x, t \rightarrow t + \Delta t) = \frac{N(x, t \rightarrow t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (1.5)$$

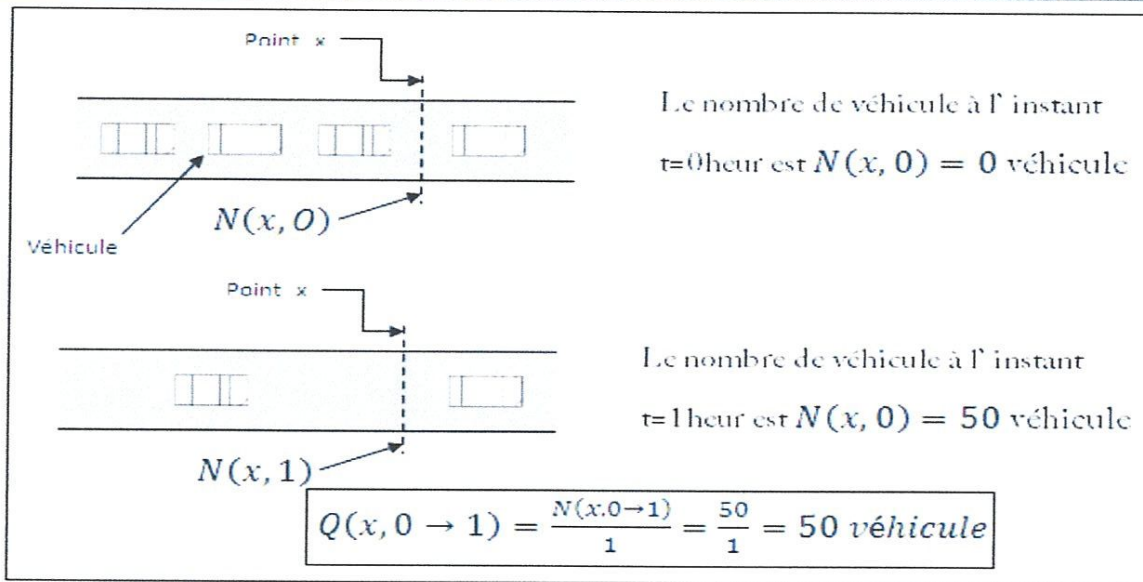


Figure 1.4 : Illustration de débit.

1.3.4. La concentration (ou densité)

La concentration (appelée également densité spatiale instantanée) notée K correspondant au nombre de véhicules par unité de longueur de chaussée se trouvant sur une section voisine du point x , à un instant donné.

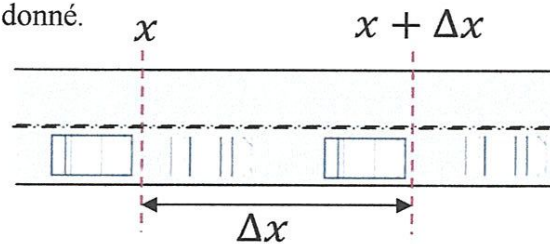


Figure 1.5 : Illustration de concentration.

Pour une concentration $K(x, t)$ définie comme le nombre de véhicules présents dans un segment compris entre x et $x + \Delta x$ à l'instant t , on a :

$$K(x, x + \Delta x, t) = \frac{N(x, x + \Delta x, t)}{\Delta x} \quad (1.6)$$

1.3.5. Le taux d'occupation

Le taux d'occupation est une variable largement utilisée dans le domaine de la gestion et de la régulation du trafic. Il désigne la proportion de la chaussée occupée par des véhicules. Il est proportionnel à la concentration. Le taux d'occupation est une grandeur sans dimension (pourcentage) [5].

1.3.6. La vitesse moyenne temporelle

En un point fixé de la route, la vitesse moyenne dans le temps $t \rightarrow t + \Delta t$, notée VT , est la moyenne arithmétique des vitesses des véhicules passant en un point donné pendant un intervalle de temps indéterminé [6]:

$$VT(x, t \rightarrow \Delta t) = \frac{\sum_i V_i(x)}{N(x, t \rightarrow t + \Delta t)} \quad (1.7)$$

1.3.7. La vitesse moyenne spatiale ou vitesse de flot

La vitesse moyenne spatiale, notée V , est la moyenne arithmétique des vitesses de l'ensemble des véhicules présents à un instant donné sur une portion de chaussée.

Pour une vitesse moyenne spatiale V définie comme la moyenne des vitesses des N véhicules se trouvant entre x et $x + \Delta x$ à l'instant t , on a [4]:

$$V(x, x + \Delta x, t) = \frac{\sum_i V_i(t)}{N(x, x + \Delta x, t)} \quad (1.8)$$

Cette vitesse de flot est donnée par le rapport entre le débit instantané et la concentration (Voir modèle macroscopique)

$$V(x, t) = \frac{Q(x, t)}{K(x, t)} \quad (1.9)$$

1.4. Modélisation du trafic routier

En utilisant la méthode déductive pour décrire le système de trafic via des équations mathématiques et le critère du degré de détail, nous pouvons différencier des entités distinctes du trafic et le niveau de description de ces entités dans les modèles d'écoulement. Cela permet d'aboutir aux modèles microscopique, mésoscopiques et macroscopique [7].

1.4.1 Modèles microscopiques

Un modèle microscopique décrit, à la fois, le comportement spatio-temporel des composants du système (véhicules et conducteurs) et leurs interactions à un niveau élevé de détails. En d'autres termes, les modèles microscopiques ont pour buts :

- Décrire le trafic d'une façon fine en décrivant le comportement individuel de chaque conducteur.
- Représenter les interactions entre les véhicules.
- Analyser le mouvement de l'ensemble des véhicules sur les infrastructures routières.

Bien que ces modèles fournissent des informations très riches sur le trafic, leur exploitation nécessite un temps de calcul très élevé.

1.4.1.1 Approches de représentation des modèles microscopiques

On distingue deux approches qui représentent les modèles microscopiques :

a/ Modèles véhicule-suiveur

Les modèles véhicule-suiveur ou modèles de poursuite, sont utilisés pour décrire le système par lequel un véhicule suit un autre. Ces modèles peuvent être classés en trois types: Les modèles de prévention [8], les modèles de type stimulus réponse[9] et les modèles psycho-spatiales [10].

b/ Modèle de particules

Les Modèles de particules ou modèles de type automates cellulaires constituent un développement plutôt récent dans la modélisation du trafic. Ils sont très utilisés dans la modélisation microscopique du trafic à cause de leur simplicité. Leur principe de base est de considérer l'ensemble des véhicules comme des particules qui interagissent entre elles.

Dans ces modèles, le temps et l'espace sont discrets, alors que dans les modèles de véhicule-suiveur ces paramètres sont continus même si le temps de simulation est échantillonné [11].

Le premier modèle de type automates cellulaires utilisé pour simuler le trafic a été proposé par NAGEL [11]. D'autres chercheurs, tel que MAERIVOET [12], ont essayé de l'améliorer par la suite.

Les modèles de particule ont été utilisés pour des applications d'optimisation des feux de circulation [13].

1.4.1.2 Variables microscopiques du trafic

a/ Espace inter-véhiculaire

L'espace véhiculaire est la distance qui sépare les deux fronts des véhicules consécutifs circulant sur la même voie. La distribution empirique de l'espace inter-véhiculaire peut être approximé par la fonction de densité de probabilité de la loi d'Erlang ou de la loi log normale [14].

b/ Temps inter-véhiculaire

Le temps inter-véhiculaire (en anglais, « the headway ») c'est le temps qui s'écoule entre les instants de passage de deux véhicules successifs. 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.

L'observation expérimentale permet l'obtention des distributions empiriques de ces écarts, ces distributions empiriques fournissent plusieurs indicateurs utiles tel que 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.

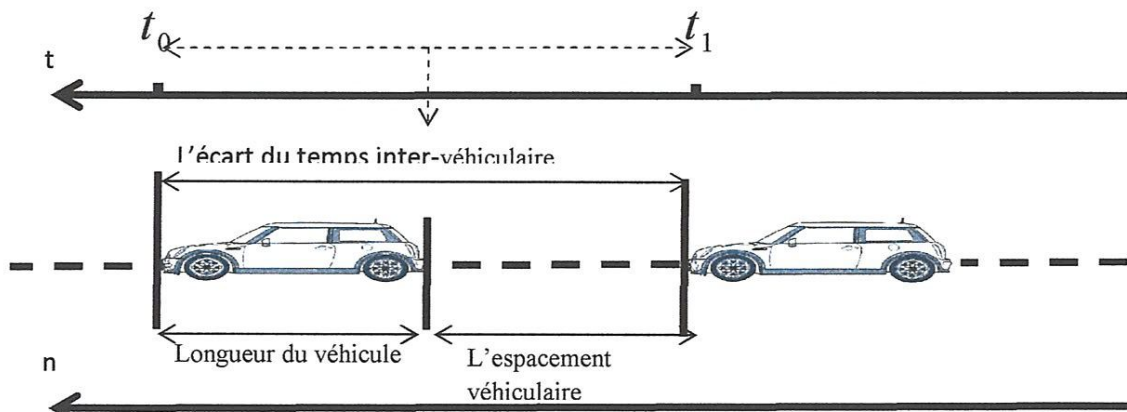


Figure 1.6 : L'écart du temps inter-véhiculaire

c/ Vitesse du véhicule

La vitesse moyenne d'un véhicule défini sur une période T est obtenue par la formule suivante :

$$v_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T v_i(t) dt \quad (1.10)$$

Où v_i est la vitesse instantanée d'un véhicule i .

Cette vitesse instantanée nécessite des observations dans l'espace et dans le temps et peut être obtenue par :

$$v_i = \frac{dx}{dt} = \lim_{(t_2-t_1) \rightarrow 0} \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (1.11)$$

Où $[x_1, x_2]$ et $[t_1, t_2]$ sont les intervalles de l'espace et du temps respectivement.

L'historique de la vitesse instantanée d'un véhicule enregistrée sur une trajectoire permet de calculer la vitesse moyenne [14]. Cette vitesse moyenne nous révèle la qualité du trafic sur un itinéraire et s'emploie fréquemment dans les calculs relatifs à la consommation d'énergie des véhicules ainsi que l'estimation des bruits sonores, de l'émission des gaz polluants et de la consommation du carburant [15].

d/ Accélération du véhicule

L'accélération moyenne sur un parcours de durée T, est définie par :

$$a_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T a_i(t) dt = \frac{v_i(T) - v_i(0)}{T} \quad (1.12)$$

Où $v_i(t)$ et $a_i(t)$ désignent, respectivement, la vitesse et l'accélération instantanées du véhicule à l'instant t.

L'accélération instantanée est obtenue à partir du profil de la vitesse par différentiation. Pour tenir compte des bruits liés aux mesures, les valeurs de l'accélération sont obtenues après un lissage des différences successives des vitesses dans un intervalle de temps donné [16]. L'accélération est considérée comme le premier indicateur de qualité de la

circulation sur une route particulière par l'entremise du bruit d'accélération σ_a [13] qui est défini par :

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [a_i(t) - a_{moy}(t)]^2 dt \quad (1.13)$$

Plusieurs facteurs influent le bruit d'accélération à savoir les propriétés de la route, les conditions du trafic et le comportement du conducteur ; la valeur du bruit d'accélération croît avec l'encombrement du trafic.

1.4.2 Modèles mésoscopiques

Les modèles mésoscopiques s'intéressent à des petits groupes de véhicules pour lesquels les activités et les interactions sont décrites à un faible niveau de détail. Par exemple, une manœuvre de changement de voie peut être représentée pour un véhicule comme un événement instantané, où la décision de faire un changement de voie est basée sur les densités relatives des bandes et les différences de vitesses.

Il existe plusieurs types de ce modèle tels ceux obtenus par analogie avec la théorie cinétique de gaz.

Les modèles microscopiques et mésoscopiques sont essentiellement utilisés pour la simulation et la planification. Par contre dans l'élaboration de la commande en temps réel, leur utilisation reste très limitée à cause de leur complexité ainsi que leurs caractères non analytiques.

1.4.3 Modèles macroscopiques

Les modèles macroscopiques décrivent le trafic d'une manière globale comme un flux de véhicule sans égard aux entités composantes.

Le système de trafic est représenté d'une façon compacte en utilisant des variables interdépendantes, comme le flux, la densité et la vitesse. Le comportement individuel de chaque véhicule est ignoré.

Le modèle macroscopique se base sur deux approches principales :

- La théorie de file d'attente [17] où le trafic est quantifié et on s'intéresse uniquement au processus de départ et d'arrivée des véhicules.

- La théorie de l'hydrodynamique ou le trafic routier est assimilé à un fluide compressible de particule tout on négligeant les dimensions des véhicules.

Les modèles macroscopiques représentent des outils importants pour la simulation, la prévision, l'estimation et la conception de stratégies de contrôle.

On distingue trois modèles les plus reconnus aujourd'hui pour la modélisation macroscopique, dans ces modèles l'évolution temporelle des grandeurs macroscopiques est représentée par des systèmes d'équations aux dérivées partielles non-linéaires appelées lois de conservation.

1.4.3.1 Modèle du premier ordre

Lighthill et Whitham [18] et Richards [24] ont proposé les premiers modèles macroscopiques qui exploitent les concepts de base de la théorie de l'hydrodynamique et qui se basent sur la représentation continue, l'équation de conservation et l'équation d'équilibre ou diagramme fondamental.

a/ Représentation continue

Considérer le trafic routier comme l'écoulement des fluides compressibles, nous mène à assimiler la dynamique du trafic comme étant un milieu continu. En conséquence, les variables macroscopiques (débit, densité et vitesse) sont supposées continues [18], [17], [20]. Ainsi n'importe quel tronçon de la route, aussi petit soit-il, doit contenir une quantité de véhicules [19].

b/ Equation de conservation

Le trafic correspond au principe de conservation de la masse qu'on peut définir de la manière suivante [14] : la variation du nombre de véhicules sur un tronçon routier $[x_1, x_2]$ est égale à la différence entre la masse entrant en x_1 et la masse sortante en x_2 durant l'intervalle de temps $[t_1, t_2]$ (figure 1.7).

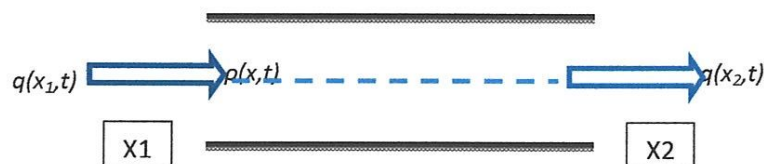


figure1.7 : Section de la route

Ce qui peut se traduire par l'équation :

$$\int_{x_1}^{x_2} [\rho(x, t_2) - \rho(x, t_1)] dx = \int_{t_1}^{t_2} [q(x_1, t) - q(x_2, t)] dt \quad (1.14)$$

Où $\rho(x, t_i)$ et $q(x_i, t)$ représentent, respectivement, la densité routière et le débit.

En supposant que la densité et le débit sont des fonctions différentiables, le principe de conservation s'énonce par l'équation de continuité suivante :

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} = 0 \quad (1.15)$$

c/ Diagramme fondamental

La relation entre le débit et la densité routière, peut être formulée par la relation algébrique suivante :

$$q = f(\rho(x, t)) \quad (1.16)$$

Cette relation nous donne le diagramme fondamental du trafic. Ce diagramme est élaboré à partir des données expérimentales [21] ou à partir des méthodes mathématiques exprimant la fonction débit-densité et il est utilisé dans la prédiction du comportement d'un tronçon routier ainsi que dans l'analyse, la conception et l'exploitation des infrastructures routières.

En général, le diagramme fondamental possède l'allure représentée dans la figure (1.8).

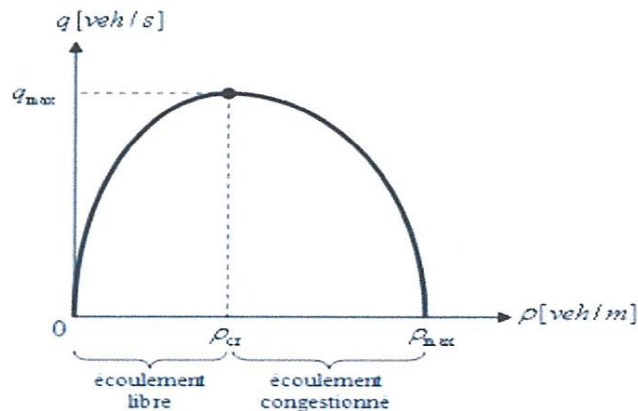


Figure 1.8 : Diagramme fondamental.

La partie gauche de la courbe correspond à l'état de circulation fluide. Cette situation est facile à interpréter : Les véhicules ne se gênent pas, le débit augmente avec la densité jusqu'à la valeur de densité critique ρ_{cr} . Le niveau de débit correspondant à cette concentration traduit la capacité de l'infrastructure, c'est-à-dire le débit maximal q_{max} susceptible d'être écoulé.

Au-delà de ce seuil critique, si la concentration continue d'augmenter, le débit se met à régresser. Les véhicules commencent à se gêner les uns les autres et le régime de circulation est dit saturé.

1.4.3.2 Variables macroscopiques du trafic

a/ Densité moyenne

La densité moyenne ou concentration $\bar{\rho}(x_1, x_2, t)$ décrit la répartition des véhicules dans l'espace. Elle est définie par le nombre de véhicules N qui se trouve à l'instant t dans un tronçon limité par les points x_1 et x_2 :

$$\bar{\rho}(x_1, x_2, t) = \frac{n(x_1, x_2, t)}{x_2 - x_1} \quad (1.17)$$

Où $n(x_1, x_2, t)$ est le nombre de véhicules présents sur le tronçon $[x_1, x_2]$ à l'instant t .

Dans un régime d'écoulement du trafic équilibré, la densité moyenne est inversement proportionnelle à l'espacement inter-véhiculaire moyen [14].

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

b/Taux d'occupation

Le taux d'occupation est défini par la fraction du temps durant lequel le capteur détecte le véhicule, elle est donnée par :

$$o(x, t) = \rho(x, t) / \alpha \quad (1.18)$$

Où ; $o(x, t)$ représente le taux d'occupation et $\alpha = k_0 \cdot \mu / \lambda$, k_0 est une constante, μ est le nombre de voies et λ est la longueur moyenne des véhicules.

D'autres chercheurs sont proposés une autre définition du taux d'occupation [22] :

$$o(x, t) = \rho(x, t) \cdot (\lambda + l_c) \quad (1.19)$$

Où l_c est la longueur du capteur

c/ Débit moyen

Le débit du trafic ou l'intensité du trafic correspond à la répartition des véhicules dans le temps, le débit moyen $\bar{q}(t_1, t_2, x)$ entre les instants t_1 et t_2 au point x de la route est donné par :

$$\bar{q}(t_1, t_2, x) = \frac{n(t_1, t_2, x)}{t_2 - t_1} \quad (1.20)$$

Où $n(t_1, t_2, x)$ est le nombre de véhicules passant par le point x entre les instants t_1 et t_2 .

Expérimentalement, le débit peut être déterminé par de simples comptages sur la route. Suivant la même hypothèse que pour la densité, le débit moyen au point x à l'instant t est défini par :

$$q_{moy}(x, t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{q}\left(t - \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}, x\right) \quad (1.21)$$

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 $q_{moy}(x, t)$ et $\bar{q}\left(t - \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}, x\right)$ 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 des a moyenne):

$$q_{moy} = \frac{1}{h_{moy}} \quad (1.22)$$

d/ Vitesse moyenne

La vitesse moyenne du flux de véhicule à l'équilibre à l'instant t et au point x est définie par le rapport entre la densité et le débit :

$$v_{\text{moy}}(x, t) = \frac{q(x, t)}{\rho(x, t)} \quad (1.23)$$

La vitesse moyenne du flux correspond à la vitesse moyenne des véhicules dans l'espace. Elle est obtenue par la moyenne de la vitesse des véhicules passant sur un capteur dans un intervalle de temps [23].

1.5. Les différentes technologies

1.5.1. Technologies de capteurs

Les technologies de pointe dans le domaine des capteurs ont permis de développer les systèmes de transport intelligent sur la base de données fiables, fréquentes et en grande quantité. Suivant les capteurs, des mesures peuvent être effectuées sur les caractéristiques des véhicules (longueur, silhouette, poids...), sur la circulation des véhicules (débit, taux d'occupation, vitesse...) ou sur des événements (incidents, files d'attente, franchissement de feux rouges...). Certaines informations sont très utiles dans une optique d'amélioration de la sécurité routière.

Les systèmes de détection pour les STI peuvent être des systèmes basés sur l'infrastructure, des systèmes basés sur les véhicules ou les deux - à l'exemple des technologies du véhicule intelligent. Les capteurs d'infrastructure sont des dispositifs qui sont installés ou intégrés dans les routes, ou à proximité (immeubles, poteaux ou panneaux, par exemple). Ces technologies de détection peuvent être installées lors des travaux préventifs d'entretien des routes ou par un système mécanique d'injection de capteurs intégrés dans la route elle-même. Les capteurs de véhicules, eux, sont soit des dispositifs installés sur ou dans la route, soit des dispositifs disposés dans les véhicules [40].

On va présenter les principales technologies de recueil de données de trafic. On recense trois catégories des capteurs :

- les capteurs intrusifs : lorsqu'ils sont posés en chaussée.

- les capteurs intrusifs : lorsqu'ils ne nécessitent pas un travail sur la chaussée.
- les capteurs embarqués : capteurs à l'intérieur du véhicule (à noter qu'il s'agit là de capteurs spécifiques et non d'équipements dont la donnée pourrait être utilisée pour du recueil de données trafic, comme les téléphones mobiles) [25].

a) Les capteurs intrusifs

i. Les capteurs à boucles inductives

▪ Principe de fonctionnement

Ce capteur intrusif est composé d'une ou de plusieurs boucles inductives dont la forme la plus répandue en Europe est le rectangle ainsi que d'une queue de boucle. Chaque boucle est constituée de plusieurs spires (3 pour le standard SIREDO) de fil de cuivre multibrins étamé d'une section de l'ordre de 1 à 2 mm² (1,34mm² pour le standard SIREDO). Le fil utilisé présente un revêtement PVC hautement isolant. Suivant la forme de la boucle, ses dimensions, le nombre de spires, sa profondeur d'enfouissement et la section du fil utilisé, les résultats des détections seront différents. La queue de boucle est la portion de la paire de fils située entre l'extrémité de la boucle et l'unité de détection. Cette paire de fils est torsadée et blindée à raison de 10 spires aux mètres pour éviter les champs magnétiques perturbant. La boucle est placée en chaussée à 7cm (standard SIREDO) en dessous de l'enrobé ou du rez de la dalle béton. Un signal électrique sinusoïdal de quelques dizaines de mV est appliqué aux bornes de la boucle électromagnétique à une fréquence entre 50 et 150kHz. Cette tension induit un champ magnétique rayonnant autour la boucle et au-dessus de la chaussée (circuit résonnant).

▪ Mesures disponibles

Débits, vitesses, longueur, silhouettes, temps de présence, taux d'occupation, temps et Distance inter-véhiculaire.

ii. Les capteurs à Tubes pneumatiques

▪ Principe de fonctionnement

Les capteurs à tubes pneumatiques sont utilisés exclusivement dans le cadre de recueils de données de trafic temporaires. Ces capteurs se présentent, pour les plus courants, sous la forme de tubes pneumatiques en caoutchouc noir. Le principe de fonctionnement est simple, les tuyaux transmettent des variations de pression d'air, provoquées par le passage des essieux des véhicules, vers des vannes ou détecteurs pneumatiques qui transforment ces variations de

pression en signaux électriques. Ceux-ci sont orientés vers le circuit d'entrée du compteur électropneumatique qui va les filtrer, les dater et les comptabiliser.

- **Mesures disponibles**

Débits, vitesses et distinction VL/PL (deux classes).

iii. Les capteurs à « Fibres optiques »

- **Principe de fonctionnement**

Les capteurs à fibre optique sont définis selon la norme NF C 93-800 (1991) : « Un capteur à fibre optique est un dispositif comprenant une ou plusieurs fibre(s), permettant de recueillir des informations représentatives de grandeurs mesurées sans autre apport d'énergie que celui des phénomènes observés et/ou des ondes lumineuses circulant dans la (ou les) fibre(s) ».

Deux qualifications s'emploient :

- intrinsèque : lorsque la fibre est le transducteur ;
- extrinsèque : lorsque l'élément transducteur n'est pas sur la fibre optique.

Une gaine mécanique est rajoutée à la fibre afin de la protéger. Cela permet de créer le mesurande par contrainte à chaque passage de véhicule.

Afin de récupérer l'information, soit on a une transmission (i.e. la fibre traverse la route et le détecteur est à l'autre bout de la fibre) soit par réflexion (une source émet un signal lumineux dans la fibre optique de transmission. Ce signal traverse le capteur à fibre optique qui réfléchit ou rétrodiffuse ce signal) avec une source et un détecteur côte à côte. Parmi ces avantages : temps de réponse rapide, poids faible par rapport au cuivre notamment, large plage de mesures possibles, mesure pouvant être sans contact et sur une longue distance, absence d'alimentation au point de mesure, faible perte de signal. Par contre ces inconvénients : pertes engendrées par la courbure de la fibre, fragilité et coût des connecteurs, mesures par contact.

- **Mesures disponibles**

Débits, vitesses, longueurs et formes de véhicules, temps de présence, taux d'occupation, temps et distance inter – véhiculaire, distance capteur/véhicule.

b) Capteurs non-intrusifs

i. Les capteurs hyperfréquences utilisant l'effet Doppler

▪ Principe de fonctionnement

Système non-intrusif installé en accotement de chaussée, sur mât, ou portique . Un train d'ondes électromagnétiques pulsées est émis à une fréquence de l'ordre de 10 à 25GHz par une antenne radar en direction d'un véhicule. Au contact du véhicule, l'onde est réfléchi et renvoyée modifiée vers le capteur

L'onde renvoyée par le véhicule permet de calculer la vitesse à partir du décalage de fréquence entre le signal émis et reçu. La forme et l'amplitude du signal reçu sont directement liés à la forme du véhicule et à sa surface de réflexion. La valeur de la SER (Surface Équivalente Radar exprimée en m²) analysée permet de distinguer la silhouette des véhicules (VL/PL). Le capteur peut aussi estimer la longueur du véhicule . Pour analyser le trafic sur plusieurs voies simultanément, il est nécessaire de choisir un matériel disposant de plusieurs « canaux » radars (à raison d'un canal utile par voie).

La distance de détection d'un véhicule est variable selon le matériel ; des distances comprises entre 50m et 150m sont généralement proposées par les constructeurs.

▪ Mesures disponibles

Débit, vitesse, débit classifiés (VL/PL) la classification est faite à partir de la longueur ou du SER.

ii. Capteurs Laser

▪ Principe de fonctionnement

Un Laser est un appareil émettant un rayonnement lumineux puissant non visible, amplifié par une « émission stimulée » à l'aide de deux miroirs partiellement et totalement réfléchissant. Une des particularités du Laser est sa pureté spectrale et la possibilité d'obtenir une émission autour d'une seule longueur d'onde. Les Lasers sont classés en six familles pour de nombreux domaines d'application, mais les capteurs Laser appliqués à la détection de véhicules peuvent être classés en trois classes : les Lasers à balayage, les Lasers monopoint à faisceau conique ponctuel et les Lasers à faisceau asymétrique. Ces capteurs permettent de réaliser de la détection de véhicules, de la mesure de distance capteur/véhicules, de la mesure de vitesse et de l'analyse de longueurs et de formes de véhicules.

Tous les compteurs / analyseurs de trafic Laser sont non intrusifs, ils peuvent selon l'utilisation être installés en accotement : sur le sol, sur mâts ou en surplomb de voies de circulation : sur potences, portiques ou ouvrages d'art. Il convient par mesure de sécurité de choisir des produits « sans danger oculaire » à base de Laser de Classe 1/1M.

- **Mesures disponibles**

Débits, vitesses, longueurs et formes de véhicules, temps de présence, taux d'occupation, temps et distance inter-véhiculaire, distance capteur/véhicule.

iii. Capteurs à Infrarouge actifs et passifs

- **Principe de fonctionnement**

L'infrarouge est un rayonnement électromagnétique situé dans une région spectrale invisible à l'œil humain. Dans son application liée au recueil de données de trafic routier, ces capteurs sont à distinguer en deux grandes familles : les capteurs IR passifs dont le principe de fonctionnement est la réception selon une longueur d'onde choisie comprise dans la bande de longueur d'onde IR thermique ($3\mu\text{m} < \lambda < 15\mu\text{m}$) et les capteurs de type IR actifs basés sur le principe de l'émission et de la réception d'un faisceau modulé et dont la longueur d'onde est comprise dans la bande dite IR proche ($0,8\mu\text{m} < \lambda < 3\mu\text{m}$).

- **Mesures disponibles**

Capteur IR passif : débits, vitesses.

Capteur IR actif : débits, vitesses, longueurs, temps de présence, taux d'occupation, temps et distance inter-véhiculaire, distance capteur/véhicule.

- **Limites de fonctionnement**

Les capteurs de type IR passif offrent une faible précision des mesures de vitesse et de débit. Pour les capteurs de type IR actif, le faisceau étroit du rayon lumineux émis ne permet pas de détecter tous les véhicules notamment les deux roues motorisés. Lorsque le mode de détection utilisé est en mode de proximité certains véhicules très sombres ne sont pas détectés. Le faisceau est également sensible à la pluie et particulièrement aux projections d'eau s'il est placé en bord de voie.

iv. Capteurs vidéo

La mesure du flux de trafic à base de **caméras** vidéo est une des autres formes existantes de détection du trafic. Comme les **systèmes de détection** vidéo ne nécessitent pas d'installer des composants directement à la surface ou dans la chaussée, ce type de système est

dit "non intrusif". La maintenance se trouve simplifiée du fait de l'absence de contact répété entre les roues et le capteur. Les données vidéo, noir et blanc ou couleur, sont transmises à des **processeurs** qui analysent les changements de caractéristiques de l'image vidéo lorsqu'un véhicule passe grâce à des algorithmes de détection du mouvement. Les caméras sont installées sur des poteaux ou sur des structures adjacentes aux rues, mais toujours fixes.

La plupart des systèmes de détection vidéo nécessitent une configuration initiale pour « **apprendre** » au processeur l'image de fond de référence. Cela implique habituellement de préciser des mesures connues comme la distance entre les lignes séparant les voies ou la hauteur de la caméra au-dessus de la route, mesures normalisées dans le pays. Selon la marque et le modèle, un seul processeur de détection vidéo peut détecter le trafic en simultané pour quatre à huit caméras, en fonction de la complexité des algorithmes mis en œuvre. Les données types en sortie du système de détection vidéo sont, pour chaque voie de circulation, la vitesse et le taux d'occupation de la voie. D'autres systèmes fournissent des données additionnelles tels les intervalles entre véhicules, la progression du trafic, les véhicules arrêtés et peuvent déclencher des alarmes lorsqu'un véhicule roulant à contresens est détecté par exemple.

c) Capteurs embarqués

▪ Principe de fonctionnement

Ces capteurs mesurent des grandeurs ou des paramètres à bord des véhicules. Ce sont ces capteurs qui instrumentent les « véhicules traceurs ». Ils permettent de fournir des données de position ou de trajectoire et des données de vitesse. Ces données sont issues : soit de capteurs installés spécifiquement à l'intérieur ou à l'extérieur, soit de données du constructeur automobile qui transitent par le micro réseau du véhicule (Bus CAN). Les mesures peuvent être stockées dans un fichier informatique pour une analyse a posteriori ou bien envoyées en temps réel via un support de communication sans fils (GPRS ou 3G). Ces moyens peuvent être mis en œuvre pour évaluer finement des temps de parcours, estimer des profils de vitesse sur un itinéraire, ou encore renseigner les OD d'une flotte de véhicules...

▪ Mesures disponibles

Les capteurs de position et/ou trajectoire : GPS, centrales inertielles, optiques et vidéo, télémétriques, odomètres. Les capteurs de vitesse : optiques (Correxit), GPS, Bus CAN du véhicule.

▪ Limites de fonctionnement

Les capteurs embarqués doivent être robustes, ils doivent fonctionner malgré les vibrations, les sollicitations dynamiques du véhicule et un environnement avec des brusques variabilités (luminosité, météo, canyon urbain...). La fréquence d'échantillonnage des capteurs est l'élément limitant pour la fourniture de données de qualité, le minimum se situant autour des 25 Hz. En dessous de cette valeur, comme en particulier les GPS à 1 Hz, les capteurs donnent des résultats peu précis dès que les variations de vitesse ou de trajectoire sont importantes.

▪ Mesures disponibles

Ces capteurs sont généralement des éléments transducteurs, sensible 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. Les tableaux ci-dessus récapitulent respectivement les unités et les différentes mesures effectuées par les divers capteurs.

Grandeur	Désignation	Unité
Q	Débit	Véh/h
V	Vitesse	Km/h
L	Longueur	m
DIV	Distance-inter véhiculaire	m
TO	Taux d'occupation	%
Vmoy	Vitesse moyenne	Km/h

Tableau 1.1 Notations et Unités des données de trafic.

Les capteurs	Mesures disponibles													
	Q	V	L	Silhouettes	T de présence	TO	Tet DIV	Distance cap/véh	GPS	Centrales intertielles	Optique	Odomètres	Bus CAN	Débit (vl/pl)
Boucles inductives	x	x	x	x	X	x	x							
Pneumatique	x	x												
Fibre optique	x	x	x	x	X	x	x	x						
Hyperfréquence Utilisant l'effet doppler	x	x	X											x
Laser	x	x	x	x	X	x	x	x						
IR passif	x	x												
IR actifs	x	x	x		X	x	x	x						
Capteur de vitesse									x		x		x	
Capteur de position									x	X	x	x		

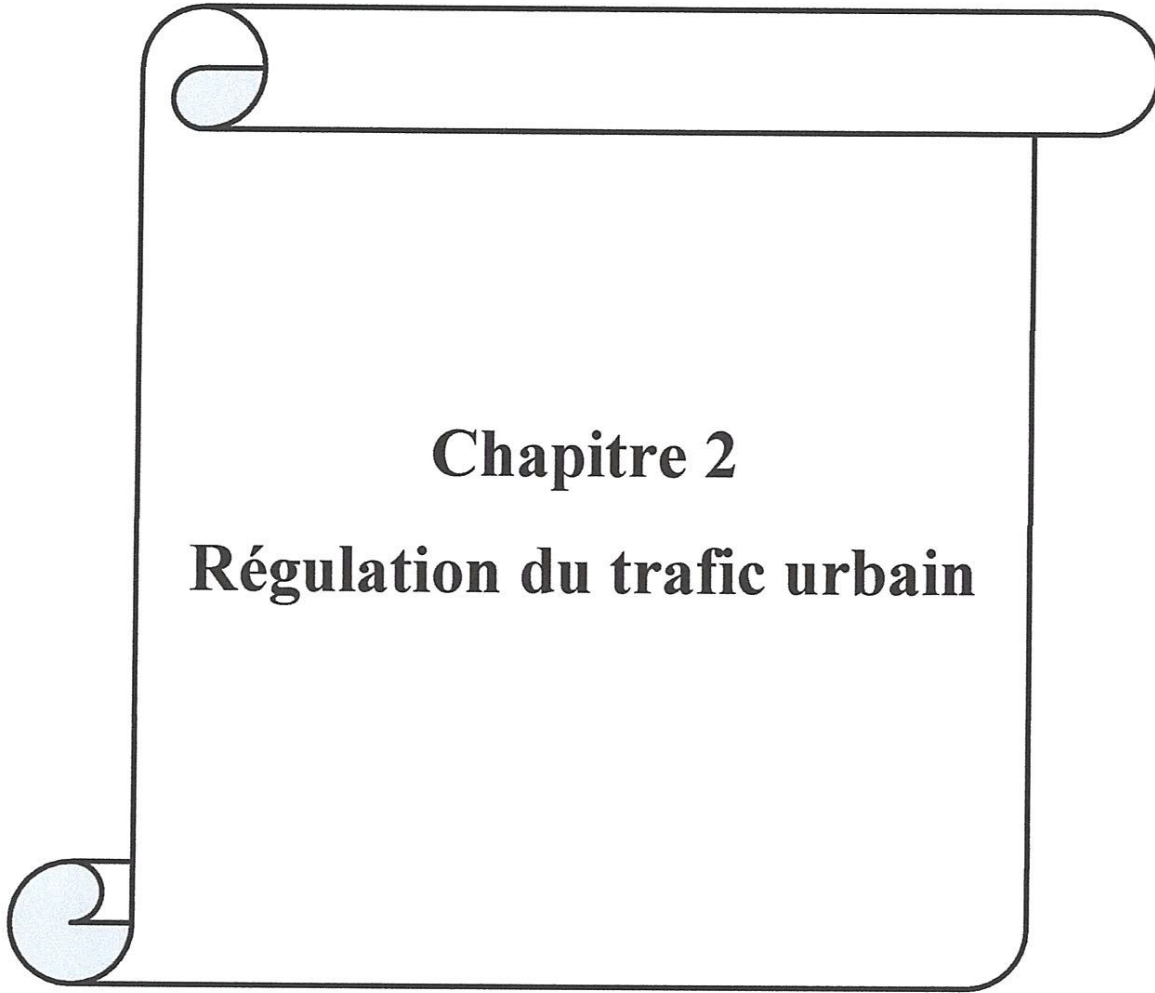
Tableau 1.2 Mesures disponibles par les différents capteurs.

1.6. Conclusion

L'un des objectifs de base de l'étude de trafic est de comprendre la congestion du trafic et de chercher des moyens de la prévenir. L'objectif est de fournir un mouvement efficace de trafic tout en minimisant les problèmes de congestion.

La recherche du modèle de trafic est largement divisée en deux types de modèles, macroscopique et microscopique. Modèles macroscopiques étudient la circulation d'un ensemble ou perspective moyenne, tandis que les modèles microscopiques étudier les déplacements des particuliers véhicules. Actuellement autre modèles ne s'intéressent pas aux véhicules pris individuellement mais plutôt à des groupes de véhicules (ils décrivent le trafic à un niveau intermédiaire entre les modèles microscopiques et les modèles macroscopiques).

Il n'existe pas de théorie unifiée pour décrire l'écoulement du trafic. Difficulté réside dans la modélisation de tout type de phénomènes quand l'élément humain est présent. Les humains modifient leur style de conduite constante, ce qui peut empêcher une modèle quelconque de jamais décrivant les modèles de trafic complexes avec exactitude. Cela étant dit, ces modèles peuvent simuler général le comportement du trafic avec un certain degré de précision.



Chapitre 2
Régulation du trafic urbain

2.1 Introduction

La régulation du trafic permet de gérer les flux de circulation, d'améliorer la sécurité, de faciliter les déplacements des usagers. Elle se matérialise à travers des équipements de signalisation lumineuse dynamique (feux, dispositifs sonores...), des systèmes de mesure et de détection (boucles, radars, vidéo...), des panneaux à messages variables, des dispositifs de connexion et de coordination, des stations de comptage, des capteurs routiers...

La section **régulation du trafic** est composée de sociétés représentant des métiers impliqués dans la problématique de « l'intelligence de la route ».

Dans les équipements de la route, les produits et solutions liés à la régulation de trafic occupent une place à part. En effet, ces équipements ont une teneur technologique importante, ce qui induit des évolutions permanentes qu'il appartient à chaque acteur de suivre pour répondre et surtout anticiper les besoins de ses clients donneurs d'ordre de la route de la ville. Il ne suffit plus que les équipements soient dynamiques, ils doivent être communicants. Aujourd'hui entre eux, demain avec les véhicules et les usagers.

Les membres de la section **régulation du trafic** sont réunis autour des enjeux suivants : garantir la sécurité des usagers dans le respect des normes et règles en vigueur ; apporter le maximum d'information utile pour le gestionnaire de route ou de voirie afin de le guider dans sa communication, ses décisions et ses aménagements.

La section **régulation du trafic** met en place des mesures visant à travailler plus efficacement sur l'amélioration et la clarification des spécifications techniques des équipements. Ces membres contribuent à apporter toujours plus de service et de conseil grâce à l'écoute des besoins et à une veille technologique permanente. Enfin, la section **régulation du trafic** a pour objectif d'être force de proposition pour définir les besoins du futur.

2.2 Les Equipements Urbains Dynamiques (EUD)

EUD est un terme utilisé par Cité OS pour désigner un ensemble de prestations regroupant la conception, la réalisation, la maintenance et la gestion globale d'installations visant à mieux gérer et mieux sécuriser l'espace urbain. Cette activité regroupe notamment : La régulation du trafic urbain, le contrôle d'accès de voirie, la vidéo protection urbaine, les

bornes d'alimentation électrique. mener l'entreprise à mieux cerner et appréhender les attentes des L'amélioration de la fluidité du trafic et des temps de déplacement

- L'organisation des différents modes de déplacements urbains
- Le renforcement de la sécurité des usagers La lutte contre la pollution
- La gestion des flux et des événements : affluence touristiques, intempéries, festivités...

L'appellation RTU englobe tout le processus de régulation de trafic, des études à la réalisation, en passant entre autres par la Signalisation Lumineuse Tricolore (SLT) c'est-à-dire par l'intermédiaire de carrefours à feux synchronisés ou non, centralisés ou non (à l'aide d'un PC), mais aussi en utilisant des panneaux à messages variables, etc....

C'est une offre à forte croissance prévisionnelle pour les années à venir surtout avec l'explosion des Transports en Commun en Site Propre (TCSP voir figure 2.1) (notamment le tram), les préoccupations écologiques et les politiques d'accessibilité pour les Personnes à Mobilité Réduite (PMR).



Figure 2.1 : TCSP en région parisienne. Les bus circulent sur une voie réservée.

2.2.1 Régulation du trafic

La régulation du trafic routier est un outil essentiel permettant de mettre en œuvre une politique d'organisation des déplacements en milieu urbain et périurbain

L'espace urbain est de plus en plus considéré comme un espace à partager entre les usagers de différents modes de transport : la voiture individuelle, les transports en commun, les piétons et aussi les deux roues, voire les rollers et autres trottinettes,... Faire cohabiter en sécurité ces différents modes de déplacement nécessite :

- un aménagement de l'espace public : des rues, des espaces piétons, des voies réservées,...
- des dispositifs capables d'organiser les différents flux : feux tricolores, bornes escamotables, affichage dynamique, systèmes assurant la priorité aux transports en commun....

2.2.2 Aspect réglementaire et normatif

L'espace urbain et la route en général sont très réglementés : signalisation, prise en compte des PMR, Code de la Route,... Les carrefours à feux et les équipements y étant relatifs n'y échappent pas. Le document principal à ce sujet est l'Instruction Interministérielle du 15 juillet 1974.

▪ Réglementation des feux de signalisation en Algérie

En Algérie, les différentes lois ont pour objet de fixer les règles relatives à l'organisation, la sécurité et la police de la circulation routière. A ce titre, elles visent, notamment, à [60] :

- ❖ réduire l'état d'insécurité routière ;
- ❖ définir les règles d'usage de la voie publique et les modalités de régulation et de fluidité de la circulation routière ;
- ❖ réunir les conditions d'un développement équilibré des transports de qualité dans le cadre de l'intérêt général ;
- ❖ définir un cadre institutionnel chargé de sa mise en œuvre ;
- ❖ instituer des mesures coercitives en matière de non-respect des règles de la circulation routière.

Les différents signaux de réglementation, se subdivisent en:

- Signaux de Priorité
- Signaux d'Interdiction ou de Restriction

- Signaux d'obligation.
- signaux donnant des indications utiles aux usagers de la route.

2.2.3 Outils de régulation

La fluidification du trafic est obtenue par l'affectation à chaque branche d'un carrefour d'une durée de vert judicieuse pour minimiser les files d'attente. Evidemment, la notion de durée de vert judicieuse est variable suivant l'axe et même suivant l'heure de la journée, d'où la nécessité de mettre en place une programmation des feux, différente pour chaque carrefour et qui dépend, soit de l'heure de la journée et du type de jour, soit du volume de trafic effectif.

2.2.3.1 Les signaux de régulation

En matière de régulation des carrefours à feux, la réglementation impose l'utilisation de feux tricolores de type R11 (Vu l'ordonnance n° 71-15 du 5 avril 1971 complétée par l'ordonnance 74-46 du 3 avril 1974 portant code de la route), Le vert donne la priorité à l'usager : il prend le pas sur la signalisation fixe éventuellement présente sur le carrefour (signal « céder le passage » par exemple).

Un signal tricolore est normalement implanté à droite du couloir de circulation qu'il contrôle (signal principal). Il peut-être rappelé au dessus de la chaussée ou à gauche (signaux de rappel). Les feux de taille réduite situés sur le mat à hauteur de voiture sont des signaux répétiteurs : ils sont également considérés comme des signaux de rappel.

Le signal principal est pourvu d'un traitement sécuritaire différent des signaux de rappel ; à minima, le rouge est contrôlé et si la lampe est grillée, l'ensemble du carrefour passe en alarme avec basculement de tous les feux au jaune clignotant de sécurité (JCS). Les feux de rappel sont également contrôlés afin de vérifier qu'il n'y a pas d'allumage bloqué pour éviter que deux lignes de feux antagonistes soient au vert en même temps (vert en croix).

La durée des feux tricolores est réglable : elle est fonction de la stratégie de régulation souhaitée par un exploitant, cependant la réglementation impose quelques valeurs butées :

- La durée du Jaune fixe est de 3 ou 5 secondes (3 secondes en agglomération) ;
- La durée minimale du vert et du rouge est de 6 secondes ;
- La durée maximale du rouge est de 120 secondes (sauf cas exceptionnels).

2.2.3.2 Les contrôleurs de carrefour

Les contrôleurs de carrefour sont des équipements anciens qui ont fait l'objet d'une normalisation en France en Juin 1990 (Normes AFNOR NF P99 100, P 99 105, P 99 110) [29] [30]. Ces normes ont essentiellement pour objet de définir les spécifications minimales d'un contrôleur en matière de sécurité, "visant à empêcher de présenter aux usagers sur les signaux d'intersection des messages erronés susceptibles de les mettre en danger".

➤ Caractéristiques fonctionnelles

Un contrôleur de carrefour est un équipement dont la finalité est avant tout sécuritaire : il est destiné à gérer les conflits entre usagers aux intersections, passages piétons, et aux sections de voies où la circulation est autorisée alternativement dans un sens ou dans l'autre.

Un contrôleur est un automate programmable qui active cycliquement les lampes des feux de signalisation en fonction de critères programmés, de contraintes de sécurité et d'événements externes ou internes.

Le schéma suivant (Figure 2.2) présente les principes de fonctionnement d'un contrôleur de carrefour. Il est décrit sous la forme d'une "boîte noire", entité fonctionnelle qui reçoit des informations en entrée et produit des informations en sortie sous l'influence d'informations de contrôle.

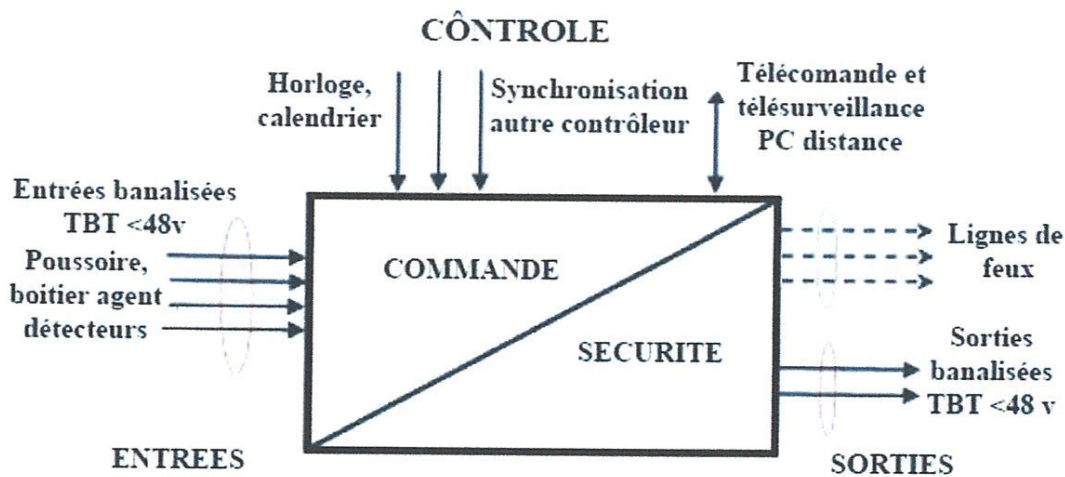


Figure 2.2: Schéma de principe d'un contrôleur

L'ensemble des signaux électriques concernant un signal tricolore est appelé ligne de feu. Une ligne de feu concerne l'alimentation en 220 Volts d'un feu tricolore à savoir :

- une lampe rouge principale, (RP)
- une lampe rouge secondaire, (RS)
- une lampe jaune fixe, (J)
- une lampe verte ou Jaune Clignotant. (V ou J)

Une ligne de feu peut allumer plusieurs feux de même type donnant la même information (feux de rappel).

La distinction entre rouge principal et rouge secondaire concerne le traitement de sécurité : un rouge principal est surveillé en courant alors qu'un rouge secondaire qui concerne les signaux de rappel ou les répéteurs peut n'être surveillé qu'en tension comme les autres lampes (jaune et verte). La surveillance en courant permet de vérifier si la lampe reste allumée alors qu'elle devrait être éteinte (feu bloqué), si la lampe est grillée et permet de détecter tout dysfonctionnement du système lumineux alors que le contrôle en tension ne permet de vérifier que l'état de la lampe.

Les entrées et sorties banalisées sont des entrées-sorties en très basse tension (de 12 à 48 V), programmables qui permettent de recevoir des événements externes (boutons poussoir, capteurs de présence, autres contrôleurs pour la coordination...) et d'envoyer des informations d'état directement à un Poste Central (PC) et à un autre contrôleur ou de piloter des dispositifs externes (Panneaux d'information,...). Tout changement d'état ou d'événement sur une entrée banalisée peut influencer directement le cycle des feux ou la phase en cours ou positionner une variable interne qui sera prise en compte ultérieurement (mécanisme de micro régulation).

Les dispositifs de contrôle du fonctionnement sont de quatre types :

- horloge,
- calendrier,
- synchronisation locale,
- télécommande à partir de P.C.

Une horloge interne permet de fixer une référence de synchronisation pour l'ensemble des lignes de feux, cette horloge peut-être rafraîchie par un dispositif externe (Carte, Top de synchronisation sur une entrée banalisée,...).

La synchronisation locale a pour but de coordonner plusieurs contrôleurs entre eux à partir d'un contrôleur maître distribuant un top de synchronisation par cycle (procédé UNITOP).

En mode BTS (base de temps synchronisée), l'horloge du contrôleur est recalée à 2 heures du matin, ce qui permet de synchroniser les plans de feux de plusieurs contrôleurs à partir d'une même base de temps absolue (plus besoin d'utiliser une liaison entre contrôleurs via des entrées-sorties banalisées pour donner le TOP de synchronisation (mais une carte reste nécessaire sur chaque contrôleur pour pallier aux dérives d'horloges locales).

Le calendrier est un dispositif interne qui gère la date réelle (Jour-mois-année-heure-minute) et qui permet d'assurer la commutation des plan de feux et l'horodatage des événements et alarmes.

La télécommande en provenance d'un PC permet de télécharger les plans de feux et les paramètres de fonctionnement, de changer le cycle en cours et de diffuser les alarmes.

Un contrôleur est destiné à gérer indépendamment un ou plusieurs carrefours composés de plusieurs lignes de feux. Une bibliothèque de plan de feux décrit chaque plan, adapté aux différentes conditions de circulation (heure de pointe, heure creuse...), programmé par carrefour.

➤ Les contrôles de sécurité

La prise en compte de nouveaux plans de feux est soumise à un contrôle de sécurité dont les règles sont programmées dans le contrôleur, indépendamment des plans de feux. Il s'agit de :

- La matrice des antagonismes,
- La matrice des rouges de dégagement.

La matrice des antagonismes déclare les lignes de feux qui ne doivent pas avoir de temps de vert simultanés, c'est à dire contrôlant des flux de circulation incompatibles.

La matrice des rouges de dégagement précise pour chaque ligne de feux, le temps de rouge à observer obligatoirement avant de commuter au vert une autre ligne de feu.

En fonctionnement, le contrôleur vérifie l'absence d'antagonisme et le respect des rouges de dégagement ; il vérifie de plus, la durée minimale des phases de vert

A ces dispositifs viennent s'ajouter les mécanismes intrinsèques de sécurité, décrits par la norme NF 99 P 100, permettant la détection des pannes et des doubles allumages de lampes, la détection des problèmes fonctionnels et matériels, la détection des erreurs de télécommande et de programmation.

➤ **Caractéristiques techniques**

Tous les contrôleurs du marché sont constitués de deux étages distincts :

- un étage de commande équipé d'un microprocesseur gérant la logique de fonctionnement,
- un étage de puissance assurant l'alimentation des lampes des lignes de feux, le contrôle de conformité des couleurs et le Jaune Clignotant de Sécurité.

Ces équipements sont modulaires :

- des cartes spécialisées permettent la prise en charge de lignes de feux supplémentaires,
- des cartes spécialisées augmentent le nombre d'entrées et de sorties basse tension banalisées.

Tous les contrôleurs disposent de liaisons séries utilisables, pour, d'une part, la communication avec un PC distant et, d'autre part, le raccordement d'un terminal de maintenance. A noter que les contrôleurs de nouvelle génération intègrent désormais un port RJ45 pour une communication haut débit via une liaison Ethernet sous IP ainsi que plusieurs ports USB.

2.2.3.3 Micro-régulation

On parle de micro-régulation quand il s'agit d'adapter le fonctionnement d'un carrefour unique à une situation de trafic particulière mesurée par l'intermédiaire d'un ou plusieurs capteurs.

Par exemple lorsqu'on détecte la présence de véhicules en attente sur une branche secondaire d'un carrefour, on leur affecte un temps de vert pour leur permettre de circuler ; sinon les feux restent - 20 - rouges sur cette branche et le vert est affecté aux autres branches.

On parle d'escamotage de phase dans ce cas. On peut, dans le même esprit, raccourcir un vert si plus aucun véhicule n'est présent sur la file d'attente : on parle alors de coupure anticipée de vert ou inversement de dilatation.

2.2.3.4 Macro-régulation

Lorsque plusieurs carrefours sont voisins dans un quartier ou consécutifs sur un boulevard, il peut s'avérer utile de les gérer globalement. On parle alors de Macro-régulation qui vise à appliquer à chaque carrefour de la zone la programmation la mieux adaptée dans l'instant, en relation avec le programme des carrefours voisins. Des capteurs de trafic mesurent les variations de circulation en certains points des rues de la zone et permettent à l'ensemble des carrefours de la zone de basculer, chacun, sur la programmation prédéfinie pour cette situation. On s'adapte ainsi, par exemple, aux variations de trafic régulières liées aux mouvements domicile-travail durant les heures de pointe mais également à des situations exceptionnelles : sortie d'usines, de salles de spectacles...

Un mécanisme usuel de macro-régulation est l'onde verte (Figure 2.3).

La synchronisation de plusieurs carrefours à feux d'un axe permettant de propager le vert de l'amont vers l'aval sur plusieurs feux de l'axe. Ce mécanisme vise à minimiser le nombre d'arrêts aux feux, il favorise une vitesse régulière sur l'axe. On peut également mettre en place une « onde rouge » qui vise réduire le nombre de véhicules à l'arrêt sur une section de boulevard (permet un vidage de la section par l'aval).

Le centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU) qui publie de nombreux guides et logiciels concernant la conception d'infrastructures routières et urbaines propose par ailleurs un logiciel d'aide à la conception d'ondes vertes.

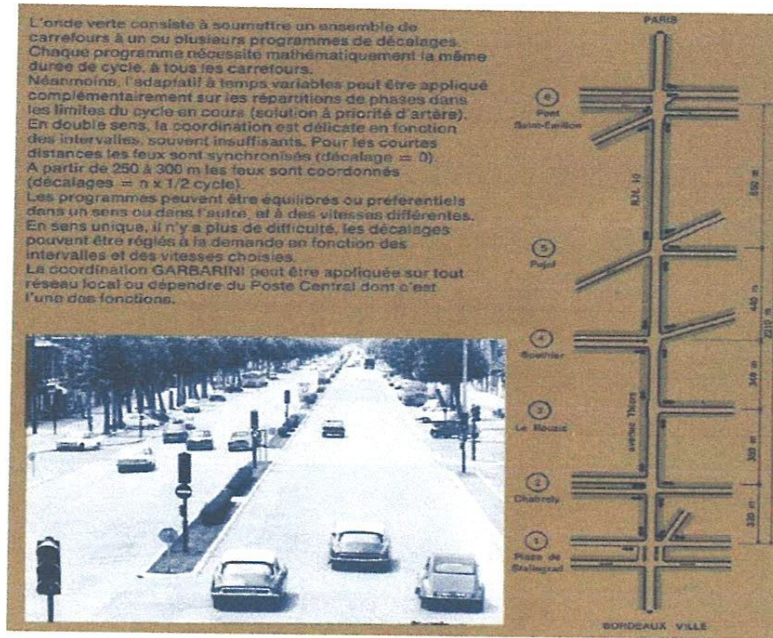


Figure 2.3: Documentation GARBARINI sur les ondes vertes.

2.2.3.5 Synchronisation

La macro-régulation nécessite que les contrôleurs de feux de chaque carrefour soient Synchronisés physiquement :

- _ soit par l'intermédiaire d'une liaison entre contrôleurs (dite liaison fil à fil),
- _ soit par l'intermédiaire d'une base de temps synchronisée (tous les contrôleurs doivent être équipés d'un mécanisme de recalage d'horloge (carte, GPS,...),
- _ soit par l'intermédiaire d'un système informatique centralisé qui pilote l'ensemble des Contrôleurs d'une ou plusieurs zones (SRT Système de régulation du trafic).

Dans le cas d'une synchronisation des contrôleurs entre eux par liaison fil à fil, il est nécessaire que les programmations des différents carrefours, élaborées au préalable, tiennent compte de la synchronisation en place : la programmation doit intégrer des variables d'état provenant d'autres contrôleurs.

Lorsqu'un système de régulation existe, c'est lui qui pilote la macro-régulation, c'est-à-dire le changement de programmation de tous les contrôleurs des carrefours raccorde au système.

Pendant le contrôleur de carrefour intègre l'ensemble des programmations susceptibles d'être activées par le système central. Le système central ne peut pas directement télécharger une nouvelle programmation non encore définie dans le contrôleur. Ce principe

nécessite donc toujours l'intervention d'un technicien sur le contrôleur de carrefour pour ajouter une nouvelle programmation.

2.2.3.6 Traitement des saturations

Le traitement des saturations a donné lieu à plusieurs types de solutions techniques plus ou moins sophistiquées nécessitant à minima la synchronisation de plusieurs contrôleurs équipés d'une programmation particulière (cas de PRODYN, développée par le CERT à Toulouse) et de nombreux points de mesure. La mise en place d'un PC de régulation de trafic centralise permet la mise en œuvre d'algorithmes de traitement plus ou moins complexes. Ainsi le système CLAIRE conçu par les chercheurs de l'INRETS et commercialisé par Thales est un système expert qui vise à mettre en place des stratégies de résorption de la congestion.

Globalement CLAIRE est un outil basé sur des techniques d'intelligence artificielle, qui apporte une réponse complémentaire aux automatismes en place (Contrôleur, SRT) pour le traitement de la congestion en évitant toute dérive inhérente au fonctionnement d'un système automatique. Il fournit par ailleurs à l'opérateur un excellent outil d'analyse et de diagnostic des causes des congestions.



Figure 2.4: PC du SIRAC

Dans la CUS, le SIRAC utilise comme poste central (Figure 2.4) le système CLAIRE couplé au système SEGUR (Système Evolutif de Gestion Urbaine de Régulation trafic commercialisé par Thales) qui centralise près de 800 contrôleurs.

2.3 La régulation des Carrefour à feux

Un carrefour à feux correspond à un croisement de routes pour lequel le choix s'est porté sur une gestion du trafic par une signalisation lumineuse tricolore dit aussi signalisation lumineuse de trafic (SLT). Le choix des signaux lumineux peut-être lié à des raisons diverses et variées telles que la sécurité, la fluidité, la lisibilité, la nécessité de gérer l'approche prioritaire d'un véhicule (tramway par exemple),.... etc.

La solution d'une gestion par feux est idéale pour la régulation des flux de circulation. Ainsi, il est possible de dissocier différents mouvements de déplacements et/ou différents modes de déplacements contrôlés par des signaux dédiés.

- la circulation automobile classique : voitures, poids l'ourds,...
- les transports en commun : bus, tramway, ...
- les modes doux : vélos, piétons, ...

Un carrefour à feux est constitué d'une partie matérielle (poteaux de signaux lumineux multicolores) et d'une partie fonctionnelle (programmation de l'enchaînement des couleurs) gérée par un automate que l'on appelle le contrôleur de feux.

Les carrefours à feux sont règlementairement cadrés notamment par l'Instruction Interministérielle sur la Signalisation Routière (IISR) qui instaure les pratiques à mettre en œuvre, décrites dans la 6ème partie dédiée aux "Feux de circulation permanents"

2.3.1 Les types de régulation d'un carrefour

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.



Figure 2.5. Illustration d'un carrefour isolé.

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. 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 [31].

2.3.1.1 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 feux 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.[32]

2.3.1.2 Régulation du trafic avec les systèmes adaptatifs

Le principe de la régulation adaptative a d’abord été utilisé par [Miller 1963] [33] 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 développées.

Un exemple bien connu de la première génération des systèmes adaptatifs est PLIDENT [Horlroyd et Hiller 1971] [34]. Dans la fin des années 60, PLIDENT a été appliqué à Glasgow et a enfin échoué. En 1981, [Hunt 1982][35] 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 Optimisation 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 « *Optimisation Policiées for Adaptive Control* » [Gartner 1982][36] et le PRODYN « *Programmation Dynamique* » [Henry, Fargues et al. 1983][37]. Ces stratégies peuvent fonctionner a cycliquement.

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.

2.4 Les Systèmes de transport intelligent

2.4.1 Présentation

Le trafic routier urbain s'est amplifié en l'espace de quelques années, augmentant ainsi les problèmes engendrés qui sont nombreux et qui coûtent quotidiennement temps, argent, santé et qualité environnementale: embouteillages, accidents, pollution ou encore infractions. Pour l'exemple, une étude menée par IBM en juin 2011 ([55]) montre un passage de 8% (2010) à 28% (2011) de New-Yorkais ayant indiqué que les transports auraient grandement nuit à leur travail ou études. De même, à Moscou, par exemple, les conducteurs sont soumis à des embouteillages quotidiens de deux heures et demie en moyenne. Un handicap important qu'il devienne de plus en plus nécessaire d'administrer. La gestion du trafic routier s'inscrit dans le domaine des STI, qui visent à proposer des outils et modèles afin de gérer les aléas de ce dernier, ceci par le biais ou non d'équipements réactifs dits

dynamiques. L'application de tels systèmes va avoir de multiples objectifs, parmi lesquels la fluidification du trafic, la détection d'incidents, la surveillance temps-réel du trafic, la diffusion d'informations ou de consignes variables aux automobilistes ou encore la réduction en conséquence de la pollution et des bruits [38].

2.4.2 Étendue

En ville, les STI s'étendent à de nombreuses applications. En premier lieu, ces derniers sont majoritairement conçus pour fluidifier et gérer le trafic routier, notamment au niveau des intersections où ces derniers peuvent directement agir sur les feux de circulation, également au niveau de la politique de stationnement, de l'information de l'utilisateur à tout niveau, et de l'utilisation de stratégies particulières afin de gérer les situations de danger. En second lieu, ces systèmes vont agir de manière plus ou moins directe sur des enjeux modernes tels que la pollution, en réduisant l'émission de gaz à effet de serre (conséquence d'une régulation cohérente du trafic). L'étendue des STI est immense, et se divise globalement en deux catégories dans la littérature : d'une part, ceux dont la contribution fait pleinement partie du domaine, et d'autre part, ceux qui y contribuent sans pour autant y faire référence : modèles purement théoriques, systèmes multi-agents, publications tantôt basées sur l'aspect matériel d'une technologie, tantôt sur les communications existantes [38] [39].

2.4.3 Une revue du Système de transport intelligent

Les systèmes de transport intelligents (STI) (en anglais *intelligent transportation Systems (ITS)*) sont les applications des nouvelles technologies de l'information et de la communication au domaine des transports. On les dit "Intelligents" parce que leur développement repose sur des fonctions généralement associées à l'intelligence : capacités sensorielles, mémoire, communication, traitement de l'information et comportement adaptatif. On trouve les STI dans plusieurs champs d'activité : dans l'optimisation de l'utilisation des infrastructures de transport, dans l'amélioration de la sécurité (notamment de la sécurité routière) et de la sûreté ainsi que dans le développement des services. Le recours aux STI s'intègre aussi dans un contexte de développement durable : ces nouveaux systèmes concourent à la maîtrise de la mobilité en favorisant entre autres le report de la voiture vers des modes plus respectueux de l'environnement.

Ils font l'objet d'une compétition économique serrée au niveau mondial.

Les STI interviennent dans un contexte mondial de congestion du trafic routier d'une part et de développement des nouvelles technologies de l'information d'autre part, en particulier dans les domaines de la simulation, du contrôle en temps-réel et des réseaux de télécommunication.

Le monde de la recherche a commencé à se mobiliser autour des années 1960 pour lutter contre les effets néfastes des congestions. En effet, la congestion globale des infrastructures de transport représente un coût socio-économique important en termes de pollution de l'air, de consommation de carburant et donc d'émissions de gaz à effet de serre (GES) ainsi que de temps perdu par les usagers dans les transports. Elle a été en constante augmentation dans le monde, résultat de l'accroissement de l'urbanisation, de la croissance démographique et surtout du nombre d'automobiles qui a permis le phénomène dit de rurbanisation, principalement dans les pays développés. On peut distinguer 4 grandes périodes dans le développement des STI :

- Années 1960-1970 : les prémices
- Années 1980-1995 : investissement dans l'information routière embarquée
- Années 1995-2000 : interopérabilité, billettique et autoroute automatisée
- Années 2000-2005 : mobilité durable, multi modalité et sécurité routière

Dans les pays en développement, les migrations des personnes des habitats ruraux vers les habitats urbains ont progressé assez différemment en comparaison de celles des pays développés. Bon nombre de zones se sont urbanisées sans augmentation significative du parc automobile et sans formation de banlieues. Dans des zones comme Santiago du Chili dotées d'une forte densité de population, recourent à un système multimodal de transport combinant la marche à pied, la bicyclette, la motos, l'autobus et le train. Seule une frange réduite de la population peut se permettre de posséder une voiture, mais ces automobiles augmentent fortement la congestion des systèmes de transport multimodaux. Elles produisent aussi une pollution de l'air considérable, créent un risque significatif pour la sécurité des personnes et exacerbent les sentiments d'inégalité dans la société. Les STI peuvent aider à une meilleure organisation de la multi modalité et de l'inter modalité.

D'autres parties du monde en voie de développement, comme la Chine, restent largement rurales mais s'urbanisent et s'industrialisent rapidement. Dans ces zones, les infrastructures routières sont développées en parallèle avec la motorisation de la population.

De grandes disparités de ressources impliquent que seule une partie de la population peut se motoriser et c'est pourquoi le système de transport multimodal très dense des plus pauvres s'entrecroise avec le système de transport fortement motorisé des plus riches. Dans ces zones, l'infrastructure urbaine se développe moins rapidement que la demande de mobilité, les systèmes STI apparaissent comme un recours pour maintenir un fonctionnement régulier des réseaux de transport urbain.

De récentes actions gouvernementales dans le domaine des STI — spécifiquement aux États-Unis — sont davantage motivées par le besoin ressenti de sécurité du territoire. Bon nombre de STI se focalisent sur la surveillance des routes. Les STI peuvent aussi jouer un rôle important dans une évacuation de masse rapide des centres d'affaires urbains en cas d'évènements causant un nombre important de victimes comme des catastrophes naturelles ou d'autres menaces. Ainsi, une grande partie des infrastructures et des planifications impliquées par les STI sont à mettre en parallèle avec les besoins en matière de sécurité du territoire.

2.4.4 Technologies des transports intelligents

Les technologies utilisées dans les systèmes de transport intelligents varient, allant de systèmes de gestion basiques comme les systèmes de gestion des carrefours à feux, les systèmes de gestion des conteneurs, les panneaux à messages variables, les radars automatiques ou la vidéosurveillance aux applications plus avancées qui intègrent des données en temps-réel avec retours d'informations de nombreuses sources, comme les informations météorologiques, les systèmes de dégivrage des ponts, les systèmes de navigation embarqués informant des temps de parcours en temps réel etc. De plus, les techniques prédictives sont développées pour permettre une modélisation avancée et une comparaison avec une base regroupant des données historiques de référence [43].

Quelques technologies typiquement implantées dans les STI sont décrites dans les sections qui suivent [44].

i. Communications sans fil

Diverses technologies de communication sans fil sont proposées pour les systèmes de transport intelligent :

- des communications à courte portée (moins de 350 mètres) comme le Wifi ,

- des communications à plus longue portée comme le WiMAX, le GSM ou la technologie 3G.

ii. Technologies de calcul

De récentes avancées dans l'électronique embarquée ont conduit à disposer dans les véhicules de processeurs informatiques plus performants. Un véhicule type du début des années 2000 aurait entre 20 et 100 modules individuels à base de microcontrôleurs ou de programmable interconnectés en réseau avec des systèmes d'exploitation en temps réel. La tendance actuelle est d'aller vers quelques modules à base de microprocesseurs un peu plus chers avec une gestion de mémoire hardware et des systèmes d'exploitation en temps-réel. Les nouvelles plates-formes informatiques embarquées permettent l'implantation d'applications logicielles plus sophistiquées, incluant du contrôle de processus informatique à base de modélisation, de l'intelligence artificielle et de l'informatique omniprésente. L'intelligence artificielle est probablement la plus importante de ces approches pour les systèmes de transport intelligents.

iii. Technologies de localisation

** Géo localisation par système de positionnement par satellites*

Le principe du positionnement par satellites est très proche du principe de triangulation. La distance entre l'utilisateur du terminal GNSS et un certain nombre de satellites de positions connues est mesurée pour permettre une localisation de l'utilisateur à une dizaine de mètres près. La vitesse de déplacement est aussi disponible.

Cette technologie est née avec le GPS américain. Depuis lors, les constellations satellitaires commandant des systèmes de GNSS se sont multipliées (GLONASS russe, Beidou chinois et prochainement Galileo européen). Dans un même temps les performances des systèmes s'améliorent significativement. Le recours à des technologies complémentaires (reconstitution du déplacement par des accéléromètres, notamment) permet de résoudre le problème de la perte temporaire du signal GNSS dans les tunnels ou les environnements encaissés (canyons urbains, etc.).

De très nombreux STI s'appuient donc sur cette technologie qui permet le traçage en temps réel et à bas coût des mobiles (à savoir : les personnes en déplacement, les marchandises et leurs conteneurs ou les véhicules). C'est l'un des déterminants essentiels de l'essor des STI.

iv. Téléphonie mobile

En admettant que les voitures contiennent au moins un ou plusieurs téléphones mobiles ou cellulaires (Ce qui est largement vérifié dans les pays développés où le taux d'équipement de la population en téléphones mobiles dépasse les 75 %), les téléphones transmettent leur position de façon régulière au réseau - même s'il n'y a pas de communication vocale établie. Ils peuvent alors être utilisés dans les voitures comme des sondes anonymes du trafic. Quand la voiture bouge, le signal du téléphone mobile bouge également. Il est alors possible de mesurer et d'analyser par triangulation les données fournies par le réseau cellulaire - de manière anonyme - puis de convertir ces données en une information précise sur la circulation automobile. Plus il y a de congestion, plus il y a de voitures, de téléphones et donc de sondes. En centre ville, la distance entre les antennes est plus courte (de l'ordre de 300m), la précision est ainsi augmentée. Il n'y a pas d'infrastructure spécifique construite le long des routes - seul le réseau de téléphonie mobile est mis en œuvre. Cette technologie FCD, *Floating Car Data* (données cellulaires flottantes) offre de grands avantages sur les méthodes classiques de mesure du trafic :

- des coûts moindres par rapport aux capteurs et aux caméras
- une meilleure couverture
- une plus grande facilité de mise en œuvre : pas de zones de chantier, moins de maintenance des installations
- une utilisation dans toutes les conditions météorologiques, même en cas de fortes pluies

Le gros inconvénient consiste en la précision de la localisation.

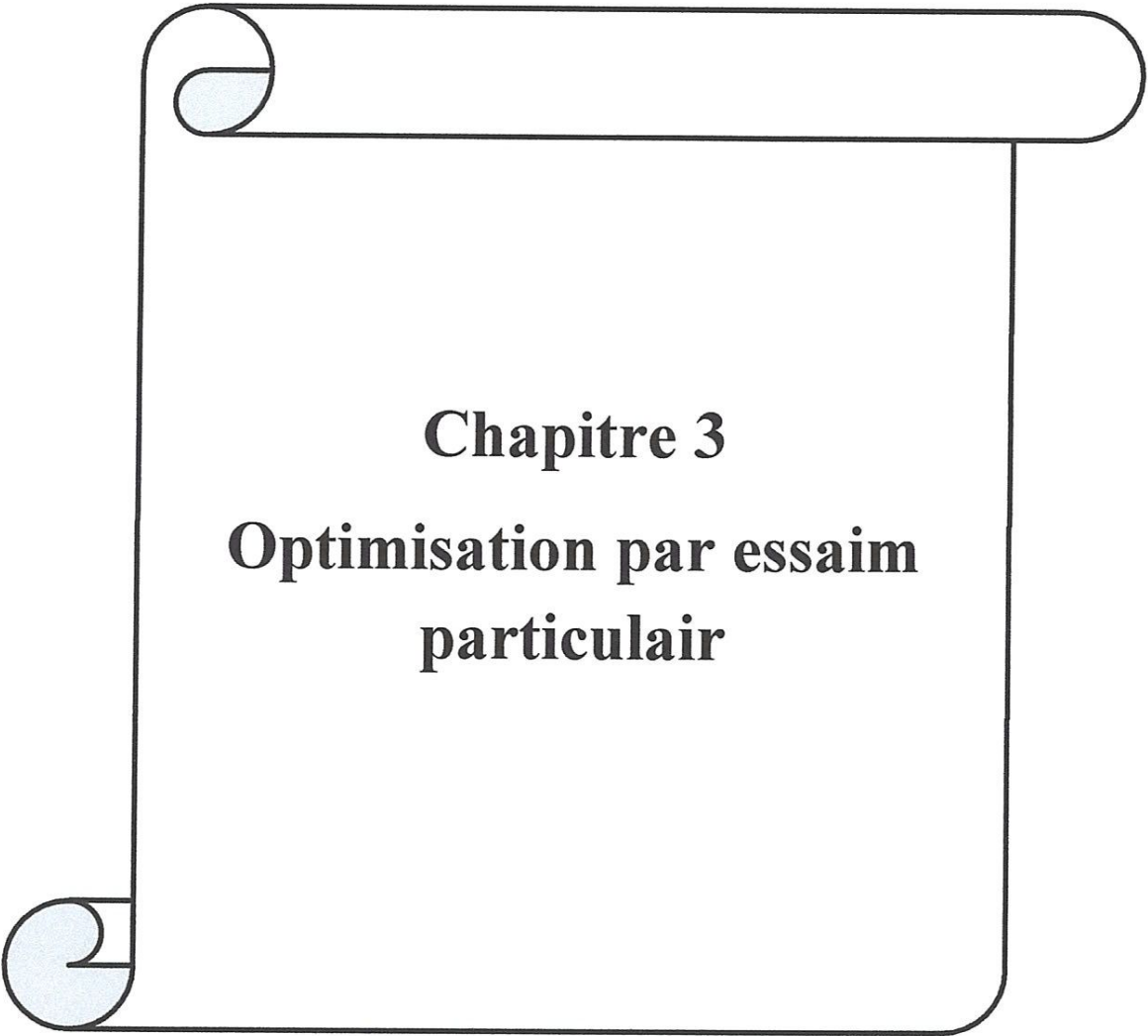
v. Réseaux de capteurs sans fil

Ces dernières années se sont grandement développés des réseaux de capteurs sans fil. Constitués de petits capteurs utilisant la technologie sans fil pour communiquer, ces réseaux semblent adaptés au cas de la gestion du trafic routier urbain¹. Outre leur réactivité et leur logique de conception naturellement distribuée, ces réseaux possèdent l'avantage d'être

facilement intégrables à l'infrastructure urbaine et à faible coût, en comparaison aux boucles électromagnétiques dont le prix et l'installation sont moins accessibles.

2.5 Conclusion

La régulation du trafic routier est devenue une branche d'étude à part entière après que le premier feu de signalisation ne soit fixé. Il est important que la sécurité et l'efficacité de la circulation soient assurées. Toutefois, depuis le début du 21^{ème} siècle, le phénomène de la congestion ne cesse d'accroître. D'une part, parce que le nombre de véhicules augmente fortement ; d'autre part, parce que les infrastructures de transports arrivent à leurs limites de capacité. La construction d'infrastructures supplémentaires peut être considérée comme l'une des solutions pour le problème, mais cette option est non faisable en raison de préoccupations politique et environnementales. Cela pousse les chercheurs à chercher d'autres stratégies afin d'améliorer la régulation du trafic routier.



Chapitre 3
**Optimisation par essaim
particulair**

3.1 Introduction

Les problèmes d'optimisation occupent actuellement une place importante dans la communauté des ingénieurs, des scientifiques et des décideurs. En effet, ce genre de problèmes intervient dans leurs domaines d'activité qui sont très divers, comme la conception de systèmes mécaniques, le traitement d'images, l'électronique ou la recherche opérationnelle.

Un problème d'optimisation est défini par un ensemble de variables, une fonction objectif et un ensemble de contraintes. L'espace de recherche est l'ensemble des solutions possibles du problème. Résoudre un problème d'optimisation consiste à trouver la ou les meilleures solutions (en minimisant et/ou maximisant la/les fonctions objectifs du problème posé), tout en satisfaisant un ensemble de contraintes définies par l'utilisateur. Certains problèmes d'optimisation sont qualifiés de difficiles, et leur résolution dans un temps raisonnable nécessite l'utilisation d'algorithmes sophistiqués, comme les méthodes approchées (les heuristiques et les métaheuristiques). Parmi les métaheuristiques destinées à résoudre ces problèmes, plus précisément les problèmes à variables continues, l'optimisation par essaim particulaire (OEP, ou PSO en anglais) est apparue en 1995,[45].

3.2 Formulation d'un problème d'optimisation dans le trafic urbain

3.2.1 Description de deux intersections adjacentes

Nous considérons l'exemple de deux intersections adjacentes de la figure 3.6 qui présente un élément de base d'un réseau artériel(RA). Chaque intersection est composée de $l_{i,j}$ ou $i \in \{1, \dots, N\}$ représente le nombre d'intersections et $j \in \{1, \dots, 4\}$ représente le nombre de tronçons. En général, la majorité des flux de trafic écoule le long de la rue principale, dans cette étude, nous considérons tous les mouvements de flux de trafic. Chaque tronçon $l_{i,j}$ est caractérisé par des flux instantanés d'entrée et de sortie respectivement définis par $f_{i,j}^{in}(t)$, $f_{i,j}^{out}(t)$ et des flux d'entrée et de sortie maximaux donné respectivement $FS_{i,j}^{in}$, $FS_{i,j}^{out}$ et une capacité maximale donnée par $C_{i,j}^{max}$. De plus $x_{i,j}$ désigne la file attente [veh]. Notons que ce réseau de trafic est équipé des capteurs vidéo mis à disposition à tout moment, la mesure des données relatives au trafic tels que : la longueur de la file d'attente, le débit l'entrée et de sortie . . . etc,[46].

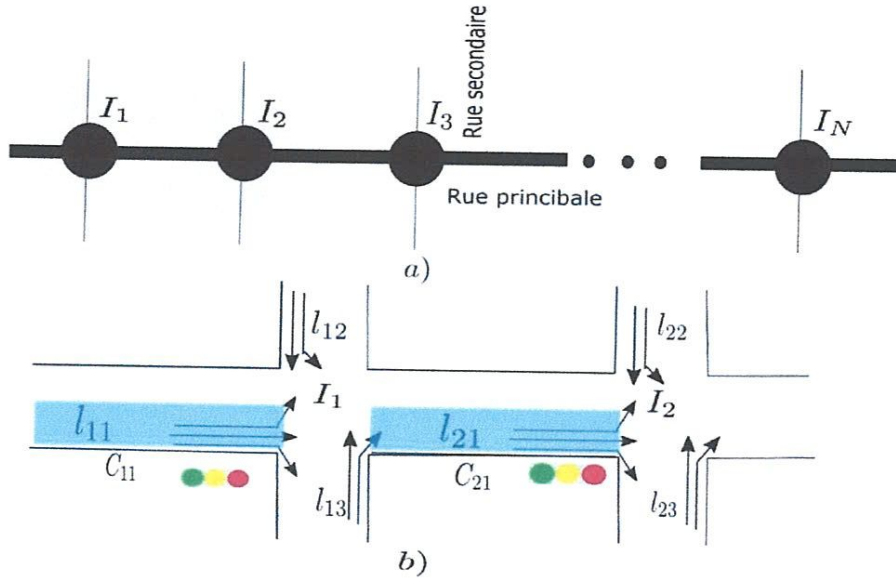


Figure 3.1 : (a) Réseau artériel. (b) Deux intersections adjacentes.

Le diagramme distance-temps de la coordination des feux des deux intersections est illustrée par la figure suivante :

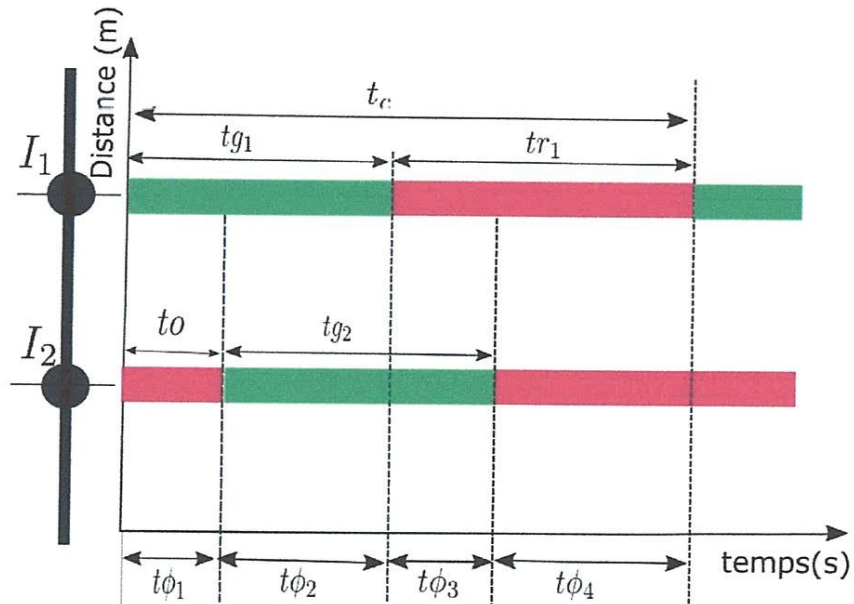


Figure 3.2 : Diagramme distance-temps de la coordination des feux.

Tel que :

- t_o : est .
- t_c : est le temps cycle.
- t_{g_i} : est le temps de vert.
- t_{r_i} : est le temps de rouge.

Les différents phase sont décrites en fonction des durées des feux (t_o , t_c , t_{g_i} , t_{r_i}).

Phase	Durées
1	$t\varphi_1 = t_o$
2	$t\varphi_2 = t_{g_1} - t_o$
3	$t\varphi_3 = t_{g_2} - (t_{g_1} - t_o)$
4	$t\varphi_4 = t_c - (t_{g_1} + t_o)$

Tableau 3.1 : Les phases de feux actives durant un cycle de temps.

3.2.2 Formulation d'un problème d'optimisation

Un problème d'optimisation est défini comme la recherche d'un optimum (minimum ou maximum) d'une ou plusieurs fonctions objective. Quand il s'agit d'une seule fonction à optimiser, nous parlons d'optimisation mono-objective, dans le cas de plusieurs fonctions objectives à optimiser, nous parlons d'optimisation multi-objective.

Dans notre cas, et afin de trouver une valeur fixe de plan de coordination des feux de signalisation, un problème d'optimisation multi-objectif est formulé ; deux fonctions objectives sont considérées : minimiser le degré de saturation (volume/capacité) et maximiser le débit de sortie des véhicules avec les contraintes sur les durées de feux.

a. Fonction objective

Dans un problème d'optimisation des feux de trafic, le choix des fonctions objectives est une tâche difficile [Hajbabaie, Ali., 2013], [47]. Dans notre cas, nous avons choisi une fonction

objective (OB_1) : qui représente le débit total des véhicules sortants (total throughput) est défini par :

$$OB_1 = \max \sum_{i=1}^2 n_i(t\varphi_\rho) \quad (3.1)$$

$n_i(t\varphi_\rho)$ [veh/s] est le nombre des véhicules sortant de chaque tronçon i régi par la relation suivante :

$$n_i(t\varphi_\rho) = f_i^{sa} \frac{tg_i}{tc} \quad (3.2)$$

ou f_i^{sa} [veh/s] est le débit de saturation.

b. Variables de décision

Les variables de décision sont les paramètres clés de feux de signalisation tels que : tc , tg_i , tr_i et to . Ce sont les paramètres qui caractérisent la fonction objective :

- $tc_{i\ min}$ et $tc_{i\ max}$ La durée minimale et maximale du cycle ;
- $tg_{i\ min}$ et $tg_{i\ max}$ La durée minimale et maximale de feu vert ;
- $tr_{i\ min}$ et $tr_{i\ max}$ La durée minimale et maximale de feu rouge ;
- $to_{i\ min}$ et $to_{i\ max}$ La durée minimale et maximale de décalage ;

c. Les contraintes

Les contraintes suivantes sont des restrictions communes pour les paramètres de commande des feux :

$$\begin{aligned} tc_{i\ min} &\leq tc_i \leq tc_{i\ max} \\ tg_{i\ min} &\leq tg_i \leq tg_{i\ max} \\ tr_{i\ min} &\leq tr_i \leq tr_{i\ max} \\ to_{i\ min} &\leq to_i \leq to_{i\ max} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Il convient de noter que chaque paramètre de décision est limité par des seuils minimal et maximal comme l'indique l'équation 3.3. Par conséquent toutes ces valeurs minimales et maximales de plan de coordination des feux de signalisation sont obtenues à partir de la thèse de Bouriachi.f,[46]. Pour fournir une gamme réaliste pour la solution optimale, le modèle d'optimisation proposé comprend également des contraintes non négatives pour les paramètres de commande.

En résumé, la formulation de problème d'optimisation, en respectant les contraintes imposées, peut être récapitulée ci-dessous :

$$\min f(t\varphi_i) = \max \sum_{i=1}^2 n_i(t\varphi_\rho) \quad (3.4)$$

3.2.3 Algorithme de solution

Le problème d'optimisation formulé se compose d'une formulation complexe, y compris les fonctions objectives non linéaires qui sont difficiles pour trouver une solution optimale globale grâce à des approches d'optimisation traditionnelles, pour cela on va appliquer l'algorithme de PSO (Optimisation par Essaim Particulaire), [46].

3.3 L'algorithme d'Optimisation par Essaim Particulaire

3.3.1 Introduction

L'optimisation est une branche des mathématiques qui permet de résoudre des problèmes en déterminant le *meilleur* élément d'un ensemble selon certains critères prédéfinis. De ce fait, l'optimisation est omniprésente dans tous les domaines et évolue sans cesse depuis Euclide, [48].

En 1995, Russel Eberhart, ingénieur en électricité et James Kennedy, socio-psychologue, s'inspirent du monde du vivant pour mettre en place une méta-heuristique : l'optimisation par essaim particulaire. Cette méthode se base sur la collaboration des individus entre eux : chaque particule se déplace et à chaque itération, la plus proche de l'optimum communique aux autres sa position pour qu'elles modifient leur trajectoire. Cette idée veut qu'un groupe d'individus peu intelligents puisse posséder une organisation globale complexe.

L'origine de cette méthode vient des observations faites lors des simulations informatiques de vols groupés d'oiseaux et de bancs de poissons de Reynold, [49], et Heppner et Grenander, [50]. Ces simulations ont mis en valeur la capacité des individus d'un groupe en mouvement à conserver une distance optimale entre eux et à suivre un mouvement global par rapport aux mouvements locaux de leur voisinage.

D'autre part, ces simulations ont également révélé l'importance du mimétisme dans la compétition qui oppose les individus à la recherche de la nourriture. En effet, les individus sont à la recherche de sources de nourriture qui sont dispersés de façon aléatoire dans un espace de recherche, et dès lors qu'un individu localise une source de nourriture, les autres individus vont alors chercher à le reproduire.

Ce comportement social basé sur l'analyse de l'environnement et du voisinage constitue alors une méthode de recherche d'optimum par l'observation des tendances des individus voisins. Chaque individu cherche à optimiser ses chances en suivant une tendance qu'il modère par ses propres vécus.



Figure 3.3 : Volée d'Anser en formation en V.

3.3.2 Applications

Les essaims de particules sont essentiellement utilisés afin de trouver l'optimum de fonctions non-linaires. Pour cette raison, cette méthode est utile pour optimiser l'entraînement des réseaux de neurones.

3.3.3 Méthode par essaims particulaires

3.3.3.1. Principe général

L'optimisation par essaim particulaire (OEP), ou Particle Swarm Optimization (PSO) en anglais, est un algorithme évolutionnaire qui utilise une population de solutions candidates Pour développer une solution optimale au problème. Cet algorithme a été proposé par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio-psychologue) en 1995 [Kenn 95] [51]. Il s'inspire à l'origine du monde vivant, plus précisément du comportement social des animaux évoluant en essaim, tels que les bancs de poissons et les vols groupés d'oiseaux. En effet, on peut observer chez ces animaux des dynamiques de déplacement relativement complexes, alors qu'individuellement chaque individu a une « intelligence » limitée, et ne dispose que d'une connaissance locale de sa situation dans l'essaim. L'information locale et la mémoire de chaque individu sont utilisées pour décider de son déplacement. Des règles simples, telles que « rester proche des autres individus », « aller dans une même direction » ou

« aller à la même vitesse », suffisent pour maintenir la cohésion de l'essaim, et permettent la mise en œuvre de comportements collectifs complexes et adaptatifs.

L'essaim de particules correspond à une population d'agents simples, appelés particules. Chaque particule est considérée comme une solution du problème, où elle possède une position (le vecteur solution) et une vitesse. De plus, chaque particule possède une mémoire lui permettant de se souvenir de sa meilleure performance (en position et en valeur) et de la meilleure performance atteinte par les particules « voisines » (informatrices) :chaque particule dispose en effet d'un groupe d'informatrices, historiquement appelé son voisinage.

Un essaim de particules, [45] qui sont des solutions potentielles au problème d'optimisation, « survole » l'espace de recherche, à la recherche de l'optimum global. Le déplacement d'une particule est influencé par les trois composantes suivantes :

- Une composante d'inertie : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement ;
- Une composante cognitive : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée ;
- Une composante sociale : la particule tend à se fier à l'expérience de ses congénères et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins

La stratégie de déplacement d'une particule est illustrée dans la figure .

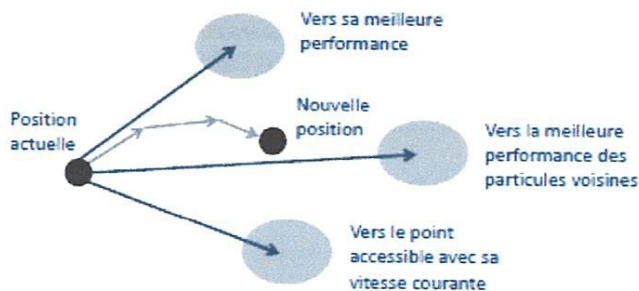


Figure3.4 :Déplacement d'une particule.

3.3.3.2 Formalisation

Dans un espace de recherche de dimension D , la particule i de l'essaim est modélisée par son vecteur position $\vec{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ et par son vecteur vitesse $\vec{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$. La qualité de sa position est déterminée par la valeur de la fonction objectif en ce point. Cette particule garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que

l'on note $\vec{P}best_i = (pbest_{i1}, pbest_{i2}, \dots, pbest_{iD})$. La meilleure position atteinte par les particules de l'essaim est notée $\vec{G}best = (gbest_1, gbest_2, \dots, gbest_D)$. Nous nous référons à la version globale de PSO, où toutes les particules de l'essaim sont considérées comme voisines de la particule i , d'où la notation $\vec{G}best$ (global best).

Remarque : Le terme de « vitesse » est ici abusif, car les vecteurs \vec{v}_i ne sont pas homogènes à une vitesse. Il serait plus approprié de parler de « direction de déplacement ». Cependant, pour respecter l'analogie avec le monde animal, les auteurs ont préféré utiliser le terme de « vitesse ».

Au départ de l'algorithme, les particules de l'essaim sont initialisées de manière aléatoire/régulière dans l'espace de recherche du problème. Ensuite, à chaque itération, chaque particule se déplace, en combinant linéairement les trois composantes citées ci dessus. En effet, à l'itération $t+1$, le vecteur vitesse et le vecteur position sont calculés à partir de l'équation (3.5) et de l'équation (3.6), respectivement :

$$v_{i,j}^{t+1} = \omega v_{i,j}^t + c_1 r_{1i,j}^t [pbest_{i,j}^t - x_{i,j}^t] + c_2 r_{2i,j}^t [gbest_j^t - x_{i,j}^t], j \in \{1, 2, \dots, D\} \quad (3.5)$$

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + v_{i,j}^{t+1}, j \in \{1, 2, \dots, D\} \quad (3.6)$$

Où ω est une constante, appelée coefficient d'inertie ; c_1 et c_2 sont deux constantes, appelées coefficients d'accélération ; r_1 et r_2 sont deux nombres aléatoires tirés uniformément dans $[0, 1]$, à chaque itération t et pour chaque dimension j .

Les trois composantes mentionnées ci-dessus (i.e. d'inertie, cognitive et sociale) sont représentées dans l'équation (3.5) par les termes suivants :

- $\omega v_{i,j}^{t+1}$: correspond à la composante d'inertie du déplacement, où le paramètre ω contrôle l'influence de la direction de déplacement sur le déplacement futur ;
- $c_1 r_{1i,j}^t [pbest_{i,j}^t - x_{i,j}^t]$ correspond à la composante cognitive du déplacement, où le paramètre c_1 contrôle le comportement cognitif de la particule
- $c_2 r_{2i,j}^t [gbest_j^t - x_{i,j}^t]$ correspond à la composante sociale du déplacement, où le paramètre c_2 contrôle l'aptitude sociale de la particule.

Une fois le déplacement des particules effectué, les nouvelles positions sont évaluées et les deux vecteurs $\vec{P}best_i$ et $\vec{G}best$ sont mis à jour, à l'itération $t + 1$, suivant les deux équations (3.7) (dans le cas d'une minimisation) et (3.8) (dans une version globale de PSO), respectivement.

$$\vec{P}best_i(t + 1) = \begin{cases} \vec{P}best_i(t), & \text{si } f(\vec{x}_i(t + 1)) \geq \vec{P}best_i(t) \\ \vec{x}_i(t + 1), & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\vec{G}best(t+1) = \arg \min_{\vec{P}best_i} f(\vec{P}best_i(t+1)), \quad 1 \leq i \leq N. \quad (3.8)$$

Où : N est le nombre de particules de l'essaim.

- Un essaim de particule est caractérisé par :
 - **le nombre de particules** de l'essaim, noté nb .
 - **la vitesse maximale** d'une particule, notée \vec{v}_{max} (3.10).
 - **la topologie et la taille du voisinage** d'une particule qui définissent son réseau social.
 - **l'inertie** d'une particule, notée Ψ (3.11).
 - **les coefficients de confiance**, notée p_1 et p_2 qui pondèrent le comportement conservateur (i.e. la tendance à retourner vers la meilleure solution visitée) et le panurgisme (i.e. la tendance à suivre le voisinage) (3.9).
- Une particule est caractérisée, à l'instant t , par :
 - $\vec{x}_i(t)$: sa position dans l'espace de recherche ;
 - $\vec{v}_i(t)$: sa vitesse ;
 - $\vec{x}pbest_i$: la position de la meilleure solution par laquelle elle est passée ;
 - $\vec{x}vbest_i$: la position de la meilleure solution connue de son voisinage ;
 - $pbesti$: la valeur de fitness de sa meilleure solution ;
 - $vbesti$: la valeur de fitness de la meilleure solution connu du voisinage ;

3.3.3.3 Configuration de la méthode

a) Nombre de particules

La quantité de particules allouées à la résolution du problème dépend essentiellement de deux paramètres : la taille de l'espace de recherche et le rapport entre les capacités de calcul de la machine et le temps maximum de recherche. Il n'y a pas de règle pour déterminer

ce paramètre, faire de nombreux essais permet de se doter de l'expérience nécessaire à l'appréhension de ce paramètre.

b) Topologie du voisinage

La topologie du voisinage définit avec qui chacune des particules va pouvoir communiquer. Il existe de nombreuses combinaisons dont les suivantes sont les plus utilisées :

- ✚ **topologie en étoile** : chaque particule est reliée à toutes les autres, ie. l'optimum du voisinage est l'optimum global ;
- ✚ **topologie en anneau** : chaque particule est reliée à n particules (en général, n = 3), c'est la topologie la plus utilisée ;
- ✚ **topologie en rayon** : les particules ne communiquent qu'avec une seule particule centrale.

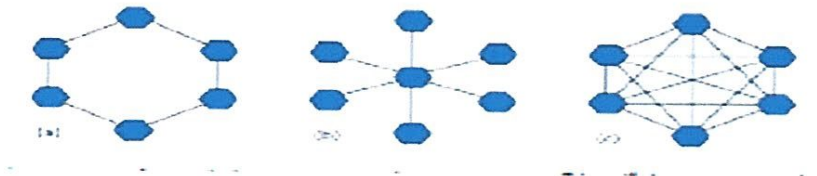


Figure 3.5 : (a) anneau (avec n = 2), (b) rayon, (c) étoile.

Le voisinage géographique auquel nous sommes amenés à penser en premier lieu n'est pas nécessairement pertinent car, d'une part, il s'agirait d'un voisinage trop local, et d'autre part car la sociabilisation des particules tend à rendre tout voisinage social en voisinage géographique. Enfin, c'est un voisinage très lourd en terme de calculs car nécessitant de recalculer le voisinage de chaque particule à chaque itération.

c) Coefficients de confiance

Les variables de confiance pondèrent les tendances de la particule à vouloir suivre son instinct de conservation ou son panurgisme. Les variables aléatoires r_1 et r_2 peuvent être définis de la façon suivante :

$$\begin{cases} \rho_1 = r_1 \cdot c_1 \\ \rho_2 = r_2 \cdot c_2 \end{cases} \quad (3.9)$$

d) Vitesse maximale et coefficient de constriction

Afin d'éviter que les particules ne se déplacent trop rapidement dans l'espace de recherche, passant éventuellement à côté de l'optimum, il peut être nécessaire de fixer une vitesse maximale (notée \vec{v}_{max}) pour améliorer la convergence de l'algorithme.

Cependant, on peut s'en passer si on utilise un coefficient de constriction κ — introduit par Maurice Clerc, [57] — et qui permet de resserrer l'hyper-espace de recherche.

L'équation de la vitesse devient alors :

$$\vec{v}_i(t) = \kappa \cdot (\vec{v}_i(t-1) + p_1 \cdot (\vec{x}_{pbest_i} - \vec{x}_i(t)) + p_2 \cdot (\vec{x}_{vbest_i} - \vec{x}_i(t))) \quad (3.10)$$

Avec :

$$\kappa = 1 - \frac{1}{p} + \frac{\sqrt{|p^2 - 4p|}}{2}$$

$$\rho = p_1 + p_2 > 4$$

Les études de Shi,[58] et Eberhart,[59] indiquent que l'utilisation d'un coefficient de constriction donne généralement un meilleur taux de convergence sans avoir à fixer de vitesse Maximale. Cependant, dans certains cas, le coefficient de constriction seul ne permet pas la convergence vers la solution optimale pour un nombre d'itérations donné. Pour résoudre ce problème, il peut être intéressant de fixer $\vec{v}_{max} = \vec{x}_{max}$ en plus du coefficient de constriction, ce qui, selon les études de Shi et Eberhart, permet d'améliorer les performances globales de l'algorithme.

e) Facteur d'inertie :

Le facteur d'inertie Ψ introduit par Shi et Eberhart permet de définir la capacité d'exploration de chaque particule en vue d'améliorer la convergence de la méthode. Une grande valeur de $\Psi (> 1)$ est synonyme d'une grande amplitude de mouvement et donc, d'exploration globale. Une faible valeur de $\Psi (< 1)$ est synonyme de faible amplitude de mouvement et donc, d'exploration locale. Fixer ce facteur, revient donc à trouver un compromis entre l'exploration locale et l'exploration globale.

Le calcul de la vitesse est alors défini par :

$$\vec{v}_i(t) = \Psi \cdot (\vec{v}_i(t-1) + p_1 \cdot (\vec{x}_{pbest_i} - \vec{x}_i(t)) + p_2 \cdot (\vec{x}_{vbest_i} - \vec{x}_i(t))) \quad (3.11)$$

La taille du facteur d'inertie influence directement la taille de l'hyper-espace exploré et aucune valeur de Ψ ne peut garantir la convergence vers la solution optimale.

Les études menées par Shi et Eberthart indiquent une meilleure convergences pour $\Psi \in [0.8, 1.2]$. Au delà de 1.2, l'algorithme tend à avoir certaines difficultés à converger.

f) Initialisation de l'essaim :

La position des particules ainsi que leur vitesse initiale doivent être initialisés aléatoirement selon une loi uniforme sur $[0...1]$. Cependant, en ce qui concerne la position des particules, il est préférable d'utiliser un générateur de séquence de Sobol qui est plus pertinent dans la disposition homogène des particules dans un espace de dimension n .

g) Critères d'arrêt :

Comme indiqué précédemment, la convergence vers la solution optimale globale n'est pas garantie dans tous les cas de figure même si les expériences dénotent la grande performance de la méthode. De ce fait, il est fortement conseillé de doté l'algorithme d'une porte de sortie en définissant un nombre maximum d'itération (que nous noterons $nbIter_{max}$). L'algorithme doit alors s'exécuter tant que l'un des critères de convergence suivant n'a pas été atteint :

- $nbIter_{max}$ a été atteint ;
- la variation de la vitesse est proche de 0 ;
- le fitness de la solution est suffisant, [53].

✚ Algorithme PSO est est défini comme suit :

1. Initialisation : Déterminez les paramètres PSO, Initialiser X_i et V_i de façon aléatoire entre leurs supérieurs et des limites inférieures sur les dimensions D pour N particules. Réglez $P_i = X_i$ pour toutes les particules,
2. Mettre à jour la vitesse et la position de chaque particule sur D dimension.
3. Calcul de la valeur de fonction objective de chaque particule,
4. Mettre à jour la meilleure position de chaque particule ainsi obtenue l'optimum et toutes les particules
5. Critère d'arrêt: si un critère d'arrêt est satisfait: collecte des informations, P_g est l'optimum Solution et $FO(P_g)$ est la valeur de la fonction objective. Sinon, passez à l'étape 2.

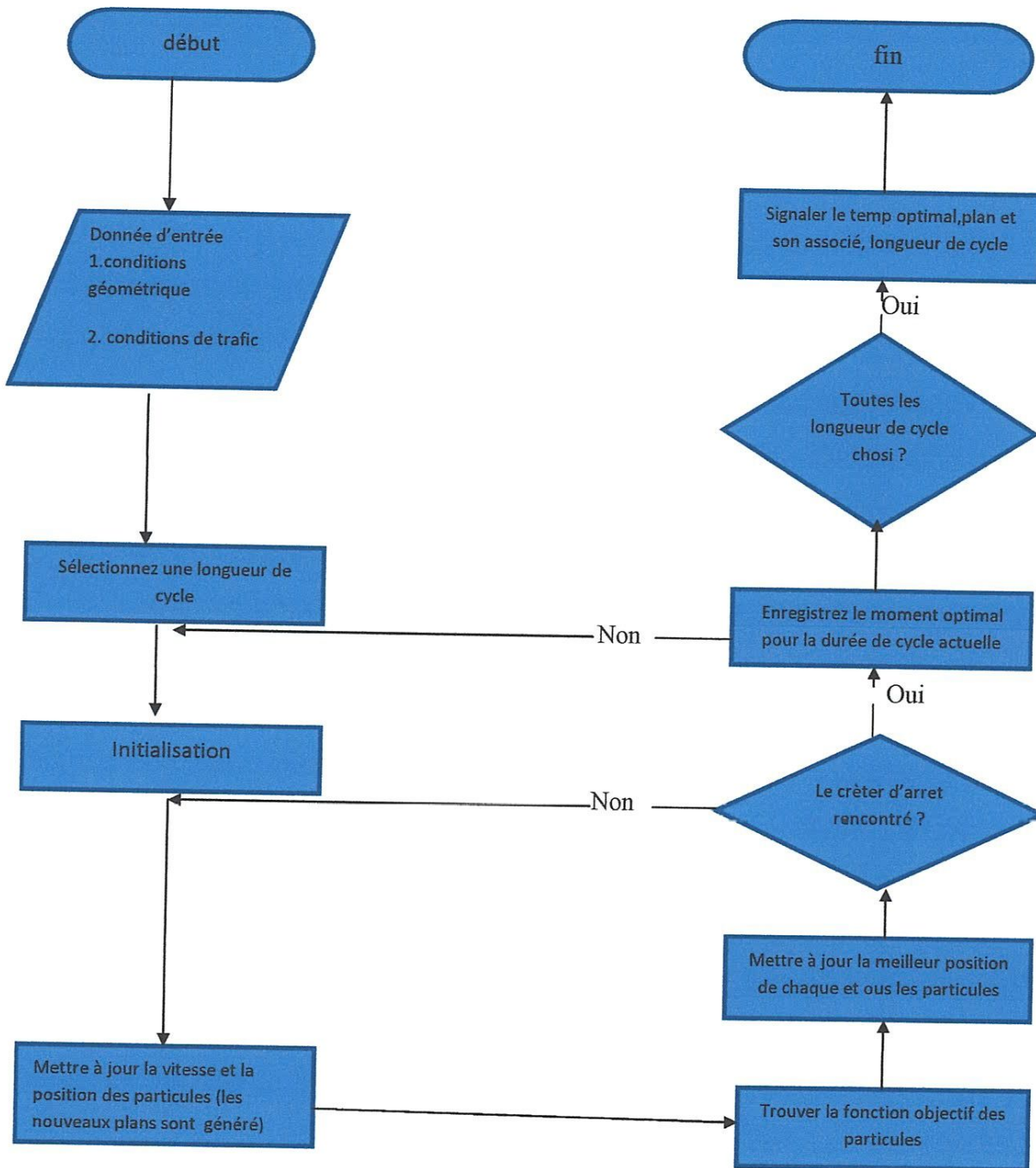


Figure3.6 : Méthode proposée pour optimiser les paramètres du signal de trafic artériel, [54].

3.3.4 Amélioration des algorithmes PSO

Malgré la simplicité et la facilité de l'utilisation de l'algorithme PSO il présente un risque de divergence ou de convergence rapide qui permet de stagner dans un optimum local, de ce fait plusieurs améliorations ont été apportées à l'algorithme de base sont [55]:

- *Confinement des particules.
- *Coefficient de constriction.
- *Coefficient d'inertie.
- *Stratégie Fully Informed Particle Swarm (FIPS).
- *Algorithme TRIBES.
- *Optimisation par essaim de particules à convergence rapides .
- *PSO coopérative.
- * PSO et hybridation.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté l' algorithme d'optimisation par essaim de particules qui a rencontré un succès remarquable depuis leur création, grâce à leur simplicité et facilité d'implémentation des différents traitements sans que l'utilisateur ait à modifier la structure de base de l'algorithme.

On a remarqué que l'algorithme PSO présente un problème majeur, qui est le problème de la convergence rapide, ce dernier permet de trouver un optimum local et dans ce sens on a présenté plusieurs améliorations sur cette technique pour améliorer les performances et éviter ce cas de problèmes.



Chapitre 4
Simulation et résultats

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la recherche d'un plan de coordination optimal des feux de signalisation. Pour cela nous procédons à l'optimisation des durées des phases dans un tronçon à deux intersections adjacentes. Nous choisissons d'appliquer comme méthode d'optimisation l'algorithme PSO. Afin de montrer l'efficacité de la méthode proposée, nous procédons à une étude comparative avec l'algorithme génétique où les résultats de simulation sont obtenus sous ToolboxMatlab.

4.2 Choix de site

Les principaux axes routiers de la ville de Guelma, tels les Boulevards Souidani Boudjemaa, 1^{er} Novembre et l'avenue A se plaignent des embouteillages quotidiens surtout aux moments des heures de pointes. En effet, les systèmes de gestion du trafic sur l'un de ces axes devons relever un défi majeur au cours des prochaines années pour assurer durablement la mobilité et les déplacements des personnes.

Notre étude porte sur un réseau artériel du 1^{er} Novembre 1945 à la ville de Guelma.

4.3 Tests numériques

4.3.1 Description de la zone d'études

Nous procédons ci-après à l'étude des performances de l'approche développée précédemment sur un tronçon urbain. Le site d'étude choisi est un réseau artériel 1^{er} Novembre 1954 à la ville de Guelma, cette ville située au nord-est d'Algérie. Cette artère s'étend du nord-est au sud-ouest du centre-ville, comprend de multiples intersections qui souffrent souvent de la congestion. Cette situation rend la circulation plus lente et même difficile, surtout aux heures de pointe. L'étude expérimentale est réalisée sur deux intersections adjacentes du réseau artériel, la zone d'étude et leur configuration expérimentales sont présentées sur les figures suivantes :



Figure 4.1 : Présentation de la zone d'étude.

Les paramètres du réseau artériel sont donnés comme suit :

- ✚ La longueur des voies l_{11} et l_{21} de la rue principale est respectivement 120 m et 100 m.
- ✚ la vitesse d'écoulement libre des deux rues principales et secondaires est 48.3 km/h (30 mph).
- ✚ le débit des véhicules de sortie de chaque intersection est 1629 (vph).
- ✚ la capacité du tronçon est de 24 véhicules.
- ✚ la durée du cycle $t_c = 66s$.
- ✚ la durée de vert $t_g = 28s$.

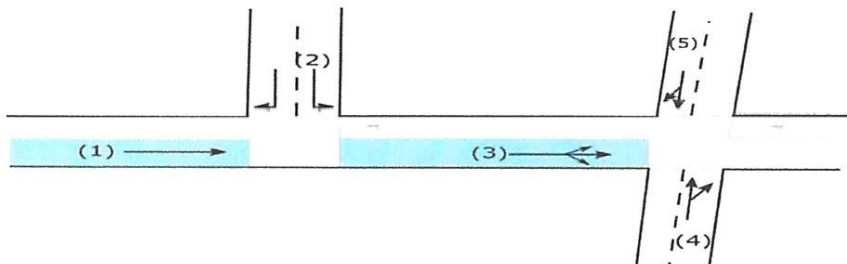


Figure 4.2 : Présentation schématique de la zone d'étude.¹

Le tableau suivant récapitule les débits d'entrée de chaque intersection pour trois scénarios:

Demande de trafic (vph)	Débit d'entrée (vph)				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Scénario 1	424	188	612	300	300
Scénario2	812	348	1160	800	750
Scénario3	1324	1236	1560	1000	900

Tableau 4.1 : Les différents scénarios expérimentaux de volume du trafic.

¹Dans cette étude, nous considérons le débit selon un seul sens (1-3)

Pour appliquer l'algorithme d'optimisation PSO, nous suivons les étapes suivantes :

- Etape1 : Modéliser les deux intersections adjacentes ;
- Etape2 : Formuler le problème d'optimisation (la fonction objective, variables de décision, les contraintes ;
- Etape3 : Choisir l'algorithme de solution et définir ces paramètres ;
- Etape4 : Appliquer l'algorithme et discuter les résultats

Une fois la configuration géométrie de la zone d'étude est illustrée, nous passons à la formulation du problème d'optimisation en fonction des variables de décision.

- La fonction objective :

$$OB1 = \max \sum_{i=1}^2 n_i(t\varphi_p) \quad (4.1)$$

Avec

i : le nombre d'intersection ;

n_i : le nombre des véhicules sortant.

$$\text{Tel que : } n_i = f_i^{out} \frac{tg_i}{tc} \quad (4.2)$$

$$OB1 = \max[n_1(t\varphi) + n_2(t\varphi)] \quad (4.3)$$

On remplace (4.2) dans (4.3), obtient :

$$OB1 = \frac{1}{t\varphi_1 + t\varphi_2 + t\varphi_3 + t\varphi_4} [f_1^{out} t\varphi_1 + (f_1^{out} + f_2^{out}) t\varphi_2 + f_2^{out} t\varphi_3] \quad (4.4)$$

$$\min f(t\varphi_i) \Rightarrow OB1 = \max \sum_{i=1}^2 n_i(t\varphi_p) \quad (4.5)$$

- Les variables de décision :

$$t\varphi_1 = t_0$$

$$t\varphi_2 = tg_1 - t_0$$

$$t\varphi_3 = tg_2 - (tg_1 - t_0)$$

$$t\varphi_4 = tc - (tg_1 + t_0)$$

- Sous les contraintes

$$t\varphi_1^{min} \leq t\varphi_1 \leq t\varphi_1^{max}$$

$$t\varphi_2^{min} \leq t\varphi_2 \leq t\varphi_2^{max}$$

$$t\varphi_3^{min} \leq t\varphi_3 \leq t\varphi_3^{max}$$

$$t\varphi_4^{min} \leq t\varphi_4 \leq t\varphi_4^{max}$$

Les paramètres de l'algorithme sont choisis comme suit :

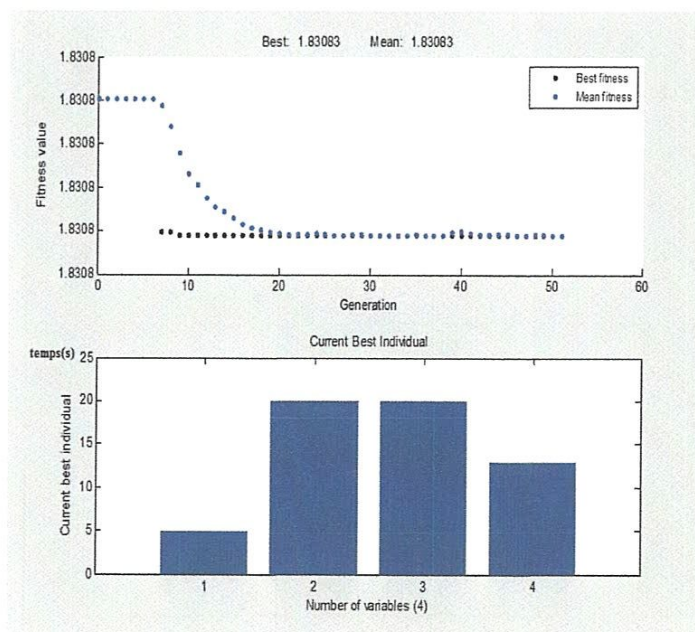
- ✚ Taille de la population nPop= 40 ;
- ✚ Nombre de variable nVar= 4 ;
- ✚ Nombre maximal d'itération MaxIt= 10 ;
- ✚ Nombre maximum de génération = 200.

4.3.2 Résultats de simulation et discussions

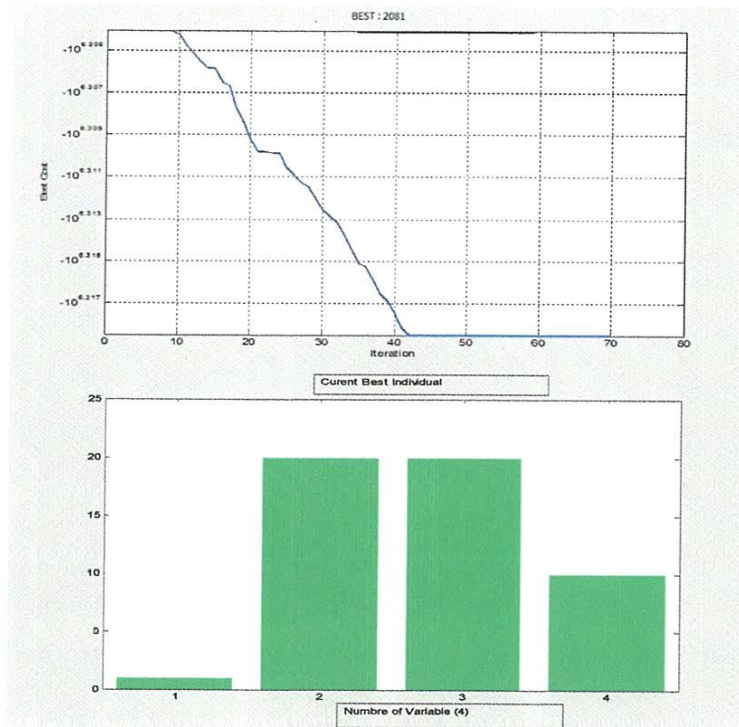
Dans ce qui suit, nous présentons l'évolution du débit de sortie dans les deux tronçons l_{11} et l_{21} en appliquant deux algorithmes d'optimisation à savoir PSO et les algorithmes génétiques (GA). Une simulation, sous logiciel Matlab, du volume sortant de véhicule et des différentes phases a été établie durant le même cycle, pour 3 scénarios différents. Les résultats sont illustrés dans les figures suivantes :

✓ Scénario 1

▪ GA

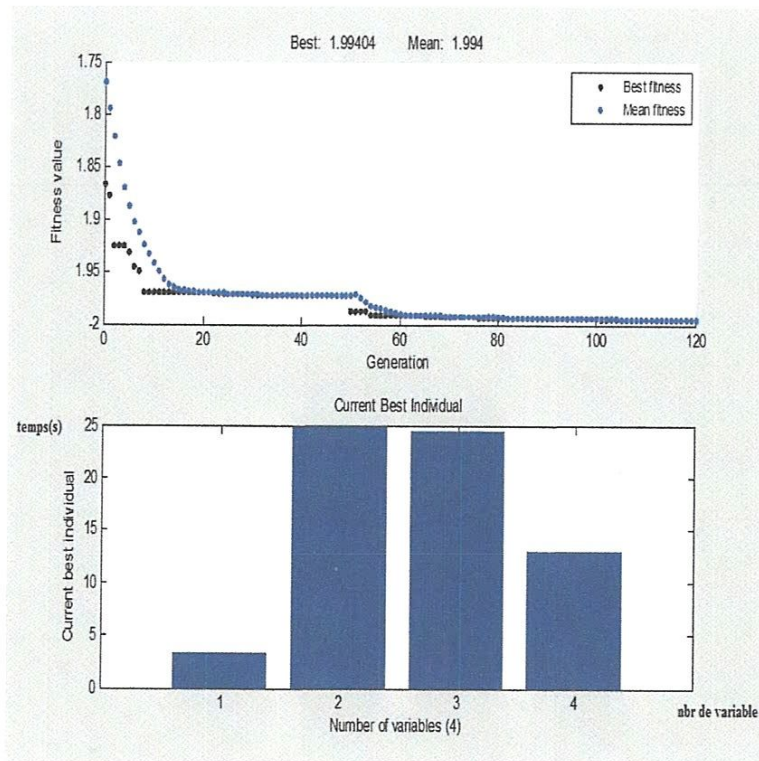


▪ PSO

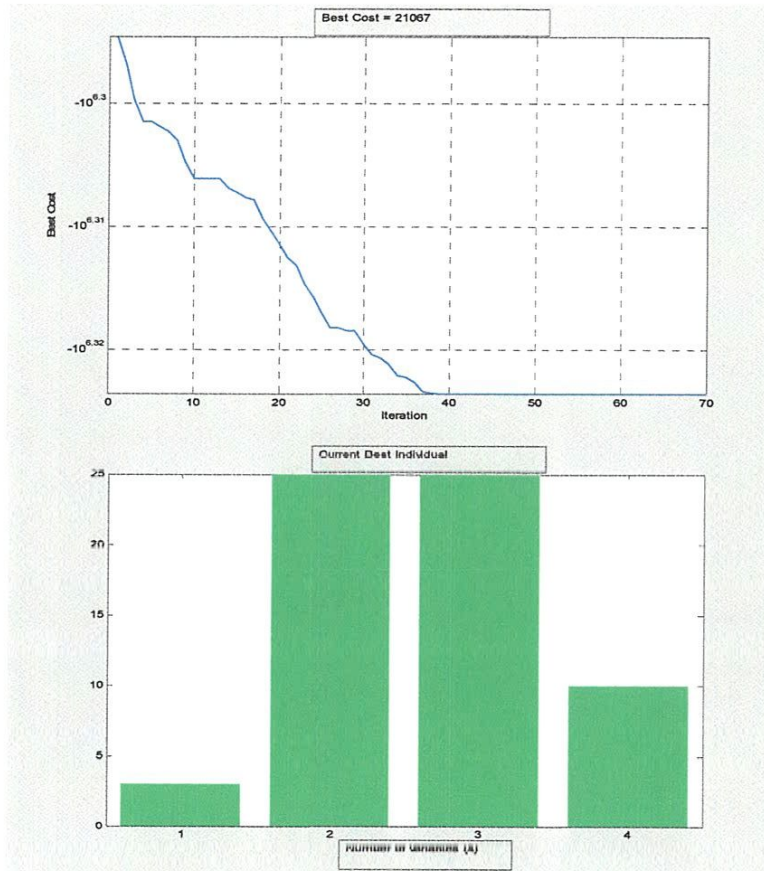


✓ Scénario 2

▪ GA

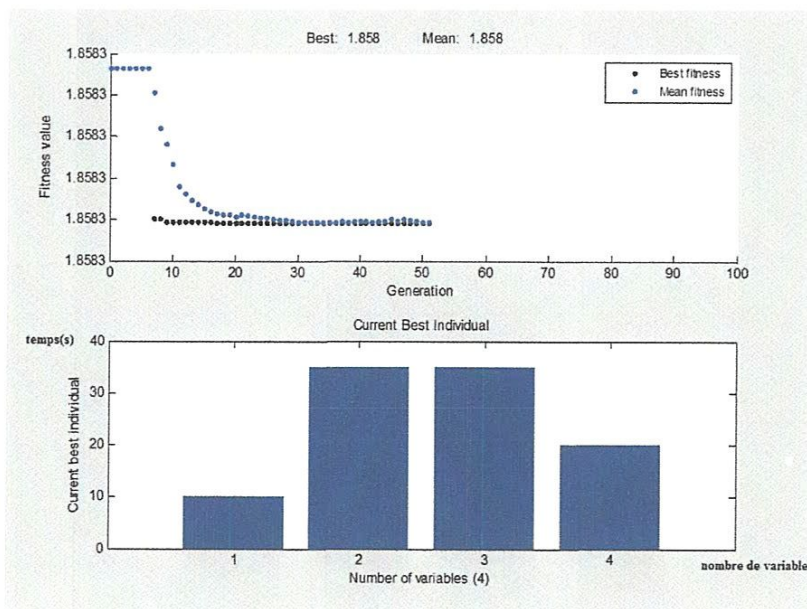


▪ PSO

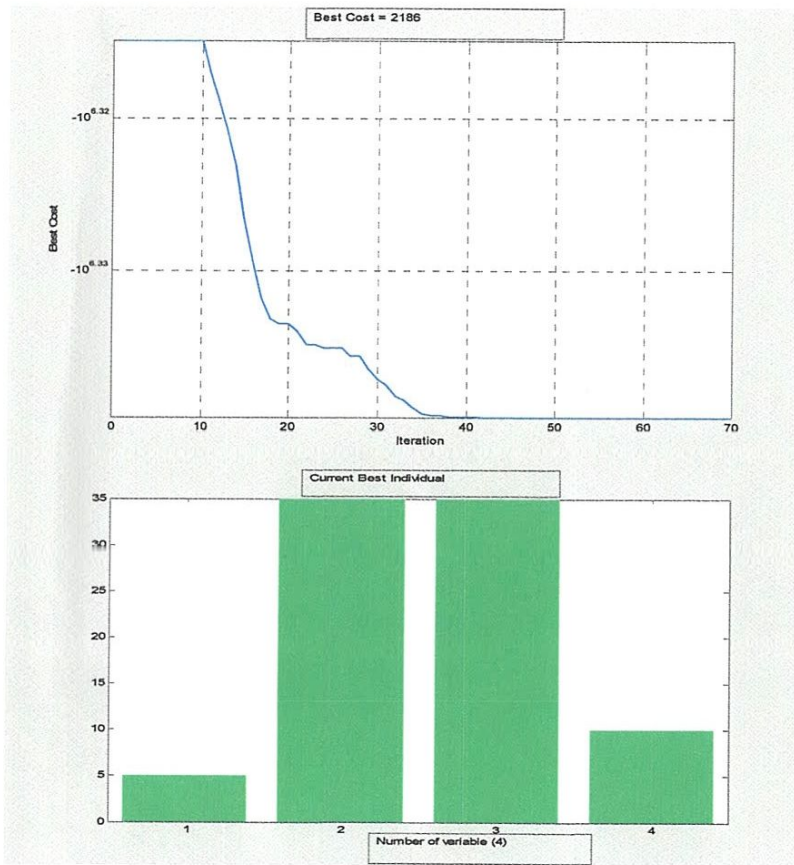


✓ **Scénario 3**

▪ GA



■ PSO



En se référant au tableau 3.1 du chapitre précédent et en se basant sur les résultats de simulation, on peut déduire les durées des feux de signalisation :

Scénarios	Intersection	T_c (s)		T_o (s)		T_g (s)	
		PSO	GA	PSO	GA	PSO	GA
Scénarios 1	1	60	58	5	11	20	19
	2			0	0	20	19
Scénarios 2	1	68	66	5	3.5	40	38.5
	2			0		40	38.5
Scénarios 3	1	104	100	10	10	45	41
	2			0	0	45	41

Tableau 4.2 : Plan des feux obtenu pour les trois scénarios

Les figures montrent l'évolution du nombre des véhicules dans les tronçons (l_{11} et l_{21}) des deux intersections adjacentes sous les 3 scénarios. Après la simulation, on voit que le nombre des véhicules sortant par application de PSO dépassent celui obtenu avec GA.

Ceci permettra de réduire le phénomène des files d'attente et par conséquent d'éviter la congestion et l'apparition des phénomènes de sursaturation.

Le tableau 4.3 montrent les résultats de comparaison des résultats des deux méthodes d'optimisation PSO et GA pour trois scénarios.

Scénarios	Fonction objectif	PSO	GA	Amélioration
Scénarios 1	OB1	2081	1830	13%
Scénarios 2	OB1	2106	1994	5%
Scénarios 3	OB1	2186	1858	17%

Tableau 4.3 : Comparaison des résultats numériques.

$$\text{Amélioration} = (\text{PSO}-\text{GA})/\text{GA} * 100.$$

Comme l'indique dans le tableau 4.3, on peut constater que:

- Pour les scénarios 1 et 2 où la demande est faible ou moyenne, la longueur du cycle est courte, et le nombre de véhicule sortant défini par OB1(PSO) est plus grand que celui de GA où nous constatons une amélioration de 5% et 13% pour les deux scénarios respectivement.
- Pour le dernier le scénario où la demande est très élevée, un cycle commun obtenu est très long par rapport aux deux scénarios précédents. La durée de feu vert est plus grande ce qui facilite de maximiser les véhicules sortants. Nous constatons ainsi une augmentation du nombre de véhicule sortant de la méthode PSO par rapport aux GA d'où une amélioration de 17%.

4.4 Conclusion

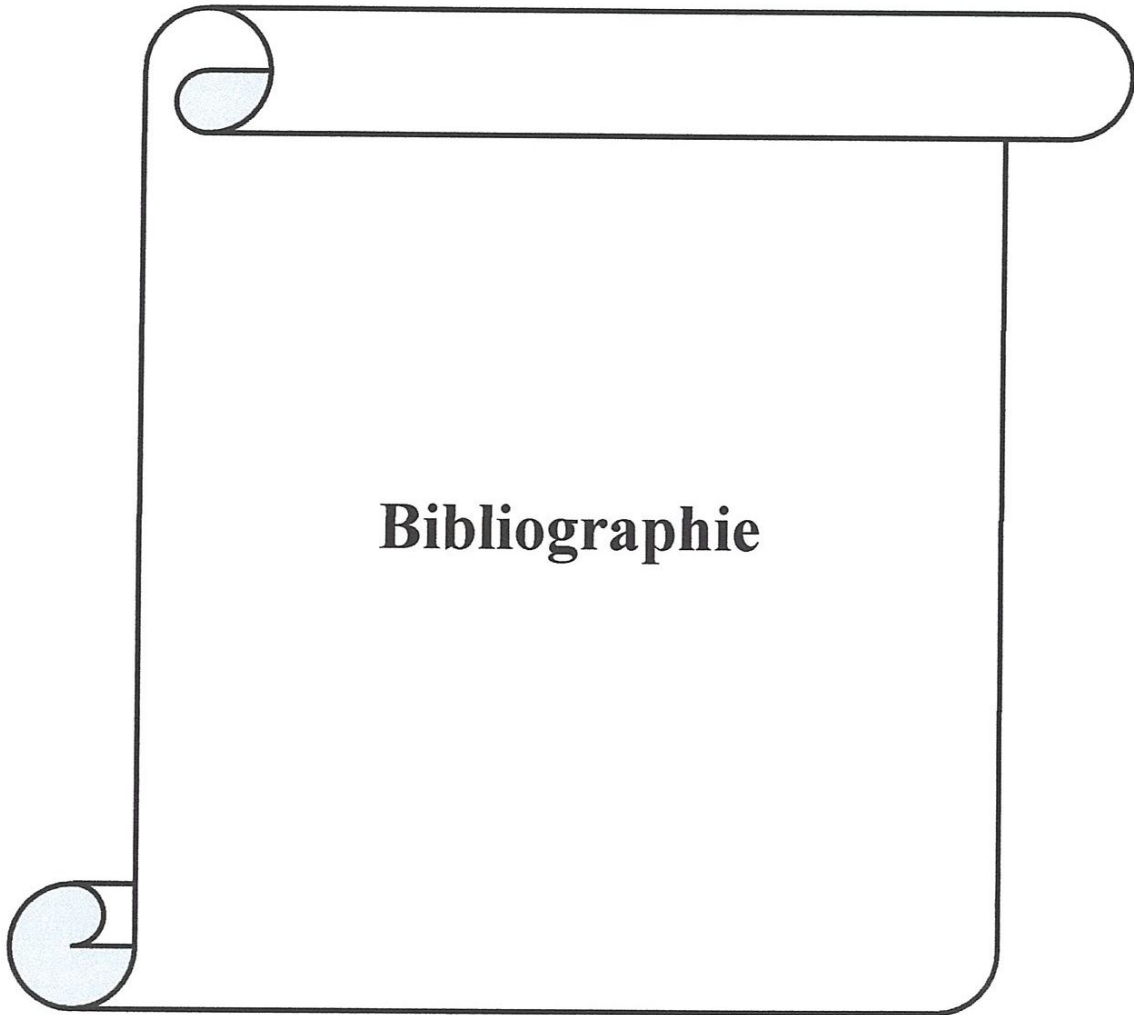
Dans ce chapitre, nous avons introduit l'application de l'optimisation par essais particuliers pour deux intersections adjacentes sur des différentes conditions de trafic.

Les résultats de simulation ont montré que la méthode PSO dépassent les AG en termes de volume sortant des véhicules ce qui prouve son efficacité à minimiser le degré de saturation.

Conclusion générale

La congestion du trafic routier est l'un des problèmes socio-économique qui doivent être résolus pour supporter l'évolution de la société. La solution appropriée est de trouver des algorithmes pour prévenir l'apparition de la congestion routière.

La construction d'infrastructures supplémentaires peut être considérée comme l'une des solutions pour le problème, mais cette option est non faisable en raison de préoccupations politiques et environnementales. Cela pousse les chercheurs à chercher d'autres stratégies afin d'améliorer la régulation du trafic routier, parmi ces stratégies: l'optimisation par essaim particulière est une méthode très efficace à minimiser la saturation.



Bibliographie

Référence

- [1] Dictionnaire Hachette langue française. **Hachette** Educ(Eds),2003
- [2] **Brahmia .N.** «**Mesure des données du trafic**»Mémoire Master CDSI.Université 8 mai 1945.2014
- [3] **Christine Buisson et Jean-Baptiste Le sort,** « **Comprendre le trafic routier méthodes et calculs**», Édition du certu, Paris,2010
- [4] **MathieuBorsu,** « **Les apports des nouvelles technologies pour recueil de données trafic** »,travail fin d'études ,ENTPE ,France,2004.
- [5] **Carles O.,Jomier G.et autre,** « **Entrepôt de données complexes pour le trafic routier** », note de recherché N 39, Laboratoire d'analyse et modélisation de système pour l'aide à la décision, paris, 2006.
- [6] **Cohen. S,** « **Ingénierie du trafic routier. Élément de théorie du trafic et applications** », presses de l'Ecole Nationale des ponts et Chaussées(ENPC) Paris, 1993.
- [7] **Cucchiara.R ,Crana.C, Piccardi .Met Prati.A,** « **Detecting Moving Objects,Ghosts, and Shadows in Video Streams** ».IEEE Transaction on pattern Analysis and Machine Intelligence ,vol.25,N°:10,pp.1337-1342,Oct.2003
- [8] **Pipes.L.A,**«**An Operational Analysis of Traffic Dynamics**»Appl. Phys., Vol. 3, n° 24, pp. 274-281 (1953).
- [9] **Chandler R.E., Herman.R, Montroll E.W,** «**Traffic Dynamics: Studies in Car Following. Operations. Res**», Vol.6, pp. 165-184 (1958).
- [10] **R. Wiedemann,**«**Simulation des Straßenverkehrsflusses,** » Technical Report, Institute for Traffic Engineering, University of Karlsruhe,(1947).
- [11] **Nagel .K,**«**Simplified Cellular Automaton Model for City Traffic**». Physical review E, Vol.58, n°02, pp. 1286-1295 (1998).

- [12] **S. Maerivoet, B. De Moor**,«**Cellular automata models of road traffic**», Physics Reports, Vol. 419, Issue 1, pp. 1-64, 2005.
- [13] **E. Brockfeld, R. Barlovic, A. Schadschneider, M. Schreckenberg**, «**Optimizing traffic lights in a cellular automaton model for city traffic**», Physical Review E 64,(2001).
- [14] **Cohen. S**,«**Flow Variables** ». Concise Encyclopaedia of Traffic and Transportation Systems,Editor Papageorgiou M., pp. 139-143 (1991).
- [15] **N.Messai** , «**Surveillance du trafic urbain et interurbain a base de modèles neuronaux** », Thèse de Doctorat de l'Université de Technologie de Belfort Montbéliard et l'Université de Franche-Comté ,13 Déc 2003.
- [16] **A.Hegyí**,«**Model predictive control for integrating traffic control measures**», TRAIL Thesis series T2004/2,the Netherland TRAIL research school,(2004)
- [17] **Pipes .L.A.**,«**An Operational Analysis of Traffic Dynamics**». J. Appl. Phys., Vol. 3, n° 24, pp. 274-281 (1953).
- [18] **Lighthill M.J, Whitham G.B**,«**On Kinematic Waves, II : A Theory of traffic flow on roads** ». , Proc. of the Royal Society, n° 229A, pp. 317-345 (1955).
- [19] **Whitham G.B**,«**Linear and Nonlinear Waves** ». , pp. 68-95 (1974). Edition Wiley & Sons,NY.
- [20] **Heidemann.D**,«**A Queueing Theory Approach to Speed-Flow-Density Relationships**». Proc. 13th Symp. Int. Conf. Transp. and Traffic Theory, pp. 103-118 (1996). Lyon-France.
- [21] **Williams.J.C, Mahmassani.H.S, Herman.R**,«**Analysis of Traffic Network Flow Relations and two Model Parameter Sensitivity**». Transp. Res. Record 1005 (1985).

- [22] **Athol. P.**, «*Interdependence of Certain Operational Characteristics Within a Moving Traffic Stream*». , Highway Research Record, Vol. 72, pp. 58-87 (1965).
- [23] **Wardrop. J.G.**, «*Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research*». Proc. of the Institution of Civil Engineers, Part II, Vol. 2, n°1, pp. 325-362 (1952). U.K.
- [24] **Richards P.I.**, «*Shock Waves on a Highway*». Oper. Res., Vol. 4, n° 1 (1956).
- [25] **Marie-Christine ESPOSITO, Christophe DESNOUAILLES et autre** «*Panorama des systèmes de recueil de données de trafic routier*» Rapport d'études, Service d'étude sur les transports, les routes et leurs aménagements, France, nov.2012.
- [26] **Philippe. B.** « *Développement de l'offre Equipement Urbains Dynamiques au sein de Citéos Strasbourg* ».Projet effectué au sein de l'entreprise BILD-SCHEER/Citéos du 7février au 22 juin 2011.
- [27] Instruction Interministérielle sur la Signalisation Routière-6^{ème} partie ; An, Sécurité Routière (2009).
- [28] La signalisation routière - Livre 1 - Article 111.1.
- [29] NF P 99-100. – Contrôleurs de carrefours a feux. - Caracteristiques des securites fonctionnelles d'usage ; An, AFNOR (2003)
- [30] NF P 99-105 - Regulation du trafic routier. - Contrôleurs de carrefour a feux. – Caracteristiques fonctionnelles ; An, AFNOR (1991)
- [31] **Hedahdia. B et Laour. S** «*Analyse de trafic urbain à Guelma* » Mémoire Master CDSI, Université 8 mai 1945, 2015.
- [32] **Webster, F. V.** Road Research Technical Paper 39. London, UK, Road Research Laboratory. (1958).
- [33] **Miller, A. J.** « *A computer control system for traffic network* ». The 2nd International Symposium on Theory of Road Traffic Flow, London, (1963).
- [34] **Horlroyd, J. et J. A. Hillier** « *The Glasgow Experiment PLIDENT and After* », RRL Report 384. (1971).
- [35] **Hunt, P. B.** « *The SCOOT on-line traffic signal optimisation technique* ». Traffic Engineering & Control 23: 190-192. (1982).
- [36] **Gartner, N. H.** « *Demand-responsive decentralised urban traffic control* », US Department of Transportation DOT/RSPA/DPB- 50/81/24. (1982).

- [37] **Henry, J. J., J. L. Farges, et J. Tufal** « The PRODYN real time traffic algorithm IFAC Symposium on Control in Transportation Systems (CTS) », Baden-Baden, Germany.(1983).
- [38] Les transports intelligents. <http://www.transport-intelligent.net/>.
- [39] Performance evaluation of los angeles adaptive traffic control system (atcs) on anarterialcorridor.<http://leonard.csusb.edu/outreach/documents/PERFORMANCEEVALUATIONOFLOSANGELES.Pdf>.
- [40] **SETRA**, 1995. « **Les capteurs de trafic routier** ». Guide technique. 68p
- [41] **Janin J.F**, 2003. « **Des transports intelligents ? Comment y parvenir** ». Lyon : CERTU.
- [42] **GRETIA (Cohen S.)**, 2005. « **Systèmes et méthodes de détection automatiques des Incidents Routiers** ». Paris : DSCR-INRETS
- [43] **CERTU**, 2003.« **Les systèmes d'aide à l'exploitation et à l'information des transports Publics urbains de surface** » : Evolutions et perspectives .Lyon : CERTU.
- [44] **Jouette E.**, 2008. « **Systèmes de transport intelligents et transport de marchandises** ». France ,DGMT.
- [45] **Abbas,D.** « **Perfectionnement des algorithmes d'Optimisation par Essaim Particulaire, Applications en segmentation d'images et en électronique** ». Thèse de doctorat, université Paris-Est, 2012.
- [46] **Bouriachi,F** « **Contribution à la modélisation et à la commande du trafic urbain :Application à la ville de Guelma** ». Thèse de doctorat , université 8 mai 1945,Guelma,2017.
- [47] **Hajbabaie,A,2013.** « **Traffic Signal Timing Optimization : Choosing the Objective Function** ». Submitted for consideration for publication and presentation at the 92th Annual Meeting of the 28 Transportation Resrarch Board, January 13-17.
- [48] **Maxime, B et Abdoulaye, S** « **L'optimisation par essaim de particulaire pour des problèmes d'ordonnement** ». Rapport d'ingénieur Projet de 2ème année,ISIMA 2011.
- [49] **Craig W,Reynolds.,Flocks, herds, and schools** « **A distributed behavioral model , Computer Graphics** », 21(4) :25-34, 1987.

- [50] **F, Heppner and U, Grenander.** « **A stochastic nonlinear odel for coordinated bird flocks** ». AAAS Publication, Washington, DC, 1990.
- [51] **J, Kennedy and R, C, Eberhart.** « **Particle Swarm Optimization** ». In : Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks IV, pp. 1942–1948, Perth, Australia, November 1995.
- [52] **F, van den Bergh.** « **An Analysis of Particle Swarm Optimizers** ». PhD thesis, Department of Computer Science, University of Pretoria, November 2002.
- [53] **Guillaume, C.** « **Optimisation par essaim particulaire** ». Article, Spécialisation Sciences Cognitives et Informatique Avancée. France, [SCIA] EPITA, 2009.
- [54] **Sina, D and Montasir, A** « **Arterial traffic signal optimization using Particle Swarm Optimization in an Integrated VISSIM-MATLAB simulation environment** ». Artical ,Blacksburg, Virginia, U.S.A.2016.
- [55] **Bellomi, R.** « **Optimisation par Essaim de Particules Application à un système Complexe** ».Mémoire de Magister , Université Batna 2.
- [56] **Kechida, S et Bouriachi , F.** « **Analyse de l'écoulement du Trafic : Application à un tronçon urbain de la ville de Guelma , Algérie** ». Univesité 8 Mai 1945, Guelma, Algérie.Proceedings CIMSI 2014.
- [57] **Maurice Clerc and James Kennedy.** « **The particleswarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space** ». IEEE Trans.Evolutionary Computation, 6(1) :58–73, 2002.
- [58] **Russell C. Eberhart, Yuhui Shi, and James Kennedy.** « **Swarm Intelligence. The Morgan Kaufmann Series in Artificial Intelligence** ». Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, USA, 2001.
- [59] **Y.Shi and E.R.C.** « **Empirical study of particle swarm optimization** ». Vol.3,pp.1945-1950,1999.
- [60] Arrete Interministeriel du 15 juillet 1974.

Annexe

Dans cet annexe, on décrit les différentes étapes de l'optimisation PSO sous le Toolbox Matlab. Le programme permettant d'aboutir aux résultats est le suivant :

Programme 1 : la fonction objectif

```
function z=loussa(x)

z=- (1/(x(1)+x(2)+x(3)+x(4)) * (1629*(x(1)+x(2))+1629*(x(2)+x(3))));

end
```

Programme 2 : algorithme de PSO

```
clc;
clear;
close all;

%% Définition du problème

CostFunction=@(x) loussa(x);          % Fonction de coût

nVar=4;                                % Nombre de variables de décision

VarSize=[1 nVar];                      % Taille de la matric des variables de décision

VarMin=[1 10 10 10];                  % Limite inférieure des variables

VarMax= [5 50 50 50];                 % plus haut lié Des variables

%% Paramètres PSO

MaxIt=10;                               % Nombre maximal d'itérations

nPop=40;                                % Taille de la population ( taille Essaim)

% Paramètres PSO

w=1;                                     % Poids de l'inertie
wdamp=0.99;                             % Inertie Ratio d'amortissement du poids
c1=1.5;                                  % Coefficient d'apprentissage personnel
c2=2;                                    % Coefficient d'apprentissage global

% Si vous souhaitez utiliser des coefficients de constriction pour PSO,
% Décommentez le bloc suivant et commentez l'ensemble de paramètres ci-
dessus.

% % Coefficients de constriction

% phi1=2.05;
% phi2=2.05;
```



```
% phi=phi1+phi2;
% chi=2/(phi-2+sqrt(phi^2-4*phi));
% w=chi; % Poids de l'inertie
% wdamp=1; % Inertie Ratio d'amortissement du poids
% c1=chi*phi1; % Coefficient d'apprentissage personnel

% c2=chi*phi2; % Coefficient d'apprentissage global

% Limites de vitesse

VelMax=0.02*(VarMax-VarMin);
VelMin=-VelMax;

%% Initialisation

empty_particle.Position=[];
empty_particle.Cost=[];
empty_particle.Velocity=[];
empty_particle.Best.Position=[];
empty_particle.Best.Cost=[];

particle= repmat(empty_particle,nPop,1);

GlobalBest.Cost=inf;

for i=1:nPop

% Initialiser la position

    particle(i).Position=unifrnd(VarMin,VarMax,VarSize);

% Initialiser la vitesse

    particle(i).Velocity=zeros(VarSize);

% Évaluation

    particle(i).Cost=CostFunction(particle(i).Position);

% Mettre à jour le meilleur personnel

particle(i).Best.Position=particle(i).Position;
particle(i).Best.Cost=particle(i).Cost;

% Mettre à jour Global Best

if particle(i).Best.Cost<GlobalBest.Cost

    GlobalBest=particle(i).Best;

end

end

BestCost=zeros(MaxIt,1);
```

```
%% Boucle principale de pso

for it=1:MaxIt

for i=1:nPop

% Mise à jour de la vitesse

particle(i).Velocity = w*particle(i).Velocity ...
+c1*rand(VarSize).*(particle(i).Best.Position-
particle(i).Position) ...
+c2*rand(VarSize).*(GlobalBest.Position-particle(i).Position);

% Appliquer des limites de vitesse

particle(i).Velocity = max(particle(i).Velocity, VelMin);
particle(i).Velocity = min(particle(i).Velocity, VelMax);

% Position de mise à jour

particle(i).Position = particle(i).Position + particle(i).Velocity;

% Effet de miroir de vitesse

IsOutside=(particle(i).Position<VarMin | particle(i).Position>VarMax);
particle(i).Velocity(IsOutside)=-particle(i).Velocity(IsOutside);

% Appliquer les limites de position

particle(i).Position = max(particle(i).Position, VarMin);
particle(i).Position = min(particle(i).Position, VarMax);

% Evaluation
particle(i).Cost = CostFunction(particle(i).Position);

% Mettre à jour le meilleur personnel

if particle(i).Cost<particle(i).Best.Cost

particle(i).Best.Position=particle(i).Position;
particle(i).Best.Cost=particle(i).Cost;

% Mettre à jour le meilleur global

if particle(i).Best.Cost<GlobalBest.Cost

GlobalBest=particle(i).Best;

end

end

end
```

```
BestCost(it)=GlobalBest.Cost;

disp(['Iteration ' num2str(it) ': Best Cost = '
num2str(BestCost(it))]);

w=w*wdamp;

end

BestSol = GlobalBest;

%% Résultats

figure;
%plot(BestCost,'LineWidth',2);
semilogy(BestCost,'LineWidth',2);
xlabel('Iteration');
ylabel('Best Cost');
grid on;
```