

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**

---

---

**Analyse de trafic urbain à Guelma**

---

---

Présenté par : **Hedahdia Badreddine**  
**Laouar Sedik**

Sous la direction de : **Dr Kechida Sihem**

**Juin 2014**

# Remerciements

*Avant tout ou remercie le dieu tout puissant pour  
Sa générosité de nous donner la santé, la volonté et  
La patience tout au long de la vie universitaire.*

*Ensuite, nous adressons nos sincères remerciements  
A nos enseignants notamment à notre promoteur*

*Dr.Mme : Kechida, lui franchement nous a  
Donné son maximum en une d'élaborer un très bon  
Mémoire : sans oublier aussi ses conseils permanent.*

*Ses orientations efficaces et sa grande patience.*

*On tient à exprimer notre profonde gratitude aux  
Membres de jury.*

*Nous remercions avec sincérité toutes les personnes  
Qui ont nous contribué de près ou de loin à réussir ce  
Travail.*

*Nos vives salutations.*



# Dédicace

*Avant tous, remercie dieu le tous puissant de m'avoir  
Donné le courage et la patience pour réalisé ce travail  
malgré  
Toutes les difficultés rencontrées.  
Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très cher parents, que dieu les garde et les protège  
Pour leur soutien moral  
A mes frères ma sœur  
Aux chers amis  
Halim, Monkid, Sadri, Sofiane, yacine, khaled, larek,  
Mossaah, Housseem, Sami, choukri, nadjeh*

*A tous les amis(es) d'études surtout ceux d'automatique  
Aux habitants de ma commune de dahouara.*

Badri

# Dédicace

*Avant tous, remercie dieu le tous puissant de m'avoir  
Donné le courage et la patience pour réalisé ce travail  
malgré  
Toutes les difficultés rencontrées.  
Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très cher parents, que dieu les garde et les protège  
Pour leur soutien moral  
A mes frères halim et riad  
A mes sœurs Amel,hiba et houda*

*Aux cher amis  
chaker,amine,ganino,billal,brahim,sami,monkid,halim,mosab  
Hossam,mahdi,(institut excellence,samir,asma) ahcen et  
anis.*

*A tous les amis(es) d'études surtout ceux d'automatique  
Aux habitants de ma wilaya skikda  
Skikda*

Sedik

# Sommaire

---

Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	01
Chapitre 1 : Aperçu général sur le trafic routier.....	03
1.1.Introduction.....	03
1.2.Définitions.....	03
1.3.Modèles d'écoulement.....	04
1.3.1.Niveau de détail.....	04
1.3.2.Modèles microscopiques.....	04
1.3.3.Modèles macroscopiques.....	05
a.Modèles du premier ordre.....	05
b.Modèle du seconde ordre.....	06
1.3.4.Modèles mésoscopiques.....	06
1.4.Composantes du trafic routier.....	07
1.4.1.Variables élémentaires du trafic routier.....	08
1.4.2. Ecart du temps inter-véhiculaire.....	08
1.4.3. Espacement ou distance inter-véhiculaire.....	09
1.4.4.Débit.....	09
1.4.5.Variation temporelles.....	10
1.4.6.Concentration (ou la densité).....	10
1.4.7.Taux d'occupation.....	11
1.4.8.Vitesse des véhicules et les vitesses moyennes.....	11
a.Vitesse instantanée d'un véhicule.....	11
b.Vitesse moyenne d'un véhicule.....	11
c.Vitesse moyenne temporelle.....	12
d.Vitesse moyenne d'espace.....	12
1.4.9.Facteur de point instantané.....	12
1.4.10.Débit par de catégories de véhicules Coefficient d'équivalence.....	12
1.4.11.Lien microscopique – macroscopique.....	13
1.5.Diagramme fondamental.....	14
1.6.Régulation des carrefours à feux.....	14
1.6.1.Carrefour à plan de feux fixe.....	15
1.6.2.Régulation du trafic avec les systèmes adaptatifs.....	16

---

# Sommaire

---

1.6.3. Systèmes de régulation.....	16
a.GERTRUDE.....	17
b.SCOOT.....	17
c.SCATS.....	17
d.PRODYN.....	18
1.7.Méthodes d'analyse.....	18
1.7.1.Analyse statique.....	18
a.Indicateur de trafic.....	18
b.L'indicateur de temps gêné.....	19
c.Recensement des points durs.....	20
1.7.2.Analyse dynamique.....	21
a.Appréciation des conditions de circulation.....	21
b.Observation de la congestion.....	21
c.Travail préliminaire sur les données.....	21
d.Analyse temporelle en des points donnés.....	22
e.Analyse spatiale sur des périodes données.....	23
1.8.Conclusion.....	25
Chapitre 02 :Systèmes de recueil de données.....	26
2.1.Introduction.....	26
2.2.Besoins liés au recueil de données trafic.....	26
2.2.1 Les applications en temps différé.....	26
2.2.2Les applications en temps réel.....	26
2.2.3Les données individuelles.....	27
2.2.4 Des besoins spécifiques.....	27
2.3 Les capteurs de recueil de données de trafic routier.....	27
2.3.1Les différentes technologies.....	27
a.Les capteurs intrusifs.....	28
i.Les capteurs à boucles inductives.....	28
ii.Les capteurs « magnétomètres » en chaussée.....	29
iii.Les capteurs à effet « Piézo-électrique ».....	29
iv.Les capteurs à Tubes pneumatiques.....	30

---

## Sommaire

---

v. Les capteurs à « Jauges de contraintes ».....	31
vi. Les capteurs Résistifs.....	31
vii. Les capteurs à « Fibres optiques ».....	32
b. Les capteurs non-intrusifs.....	33
i. Les capteurs hyper fréquences utilisant l'effet Doppler.....	33
ii. Les capteurs hyper fréquences utilisant deux antennes.....	33
iii. Les capteurs Laser.....	34
iv. Les capteurs à Infra-Rouge actifs et passifs.....	34
c. Les capteurs Vidéo.....	36
i. Les capteurs Vidéo visibles et infrarouges.....	36
ii. Les capteurs spécialisés dans la Lecture Automatique de Plaques d'Immatriculation (LAPI) visible et infrarouge.....	37
iii. Les capteurs spécialisés dans la Détection Automatique des Incidents (DAI).....	38
d. Les capteurs acoustiques.....	39
i. Les capteurs acoustiques passifs (microphone).....	39
ii. Les capteurs acoustiques actifs (à Ultrasons).....	40
iii. Les capteurs à « Couplage de technologies ».....	41
e. Les capteurs embarqués.....	41
2.4. Les nouvelles technologies de recueil de données de trafic routier.....	42
2.4.1. Les Traceurs continus.....	42
a. Localisation GNSS.....	42
b. Satellites.....	43
c. Les communautés d'utilisateurs.....	43
d. Les « Floating Mobile Data ».....	43
2.4.2. Traceurs points à points.....	44
a. Le RFID : infrastructures de péage.....	44
b. La localisation GSM.....	44

---

## Sommaire

---

c.Positionnement par bornes Wifi (WPS).....	45
2.5. Les systèmes coopératifs et recueil de données.....	45
2.6 Mesures disponibles.....	45
2.7 Conclusion.....	48
Chapitre 03 Application et résultats.....	49
3.1 Introduction.....	49
3.2. Statistiques routière en Algérie.....	50
a. Statistiques de la ville de Guelma.....	50
3.3. Choix de site.....	50
3.4. Application.....	52
3.4.1. Description de la Zone d'Etude.....	52
3.4.2. Présentations et Discussions Des Résultats.....	52
3.5 Conclusion.....	59
Conclusion générale.....	60
Bibliographie.....	61

---

<b>Figure 1.1:</b> Représentation des modèles du trafic selon le niveau de détail.....	04
<b>Figure 1.2:</b> L'écart du temps inter-véhiculaire.....	08
<b>Figure 1.3:</b> Distribution du flux de véhicules pendant une journée.....	10
<b>Figure 1.4:</b> Profil moyen journalier de trafic VL et PL sur une route Nation Par tranche horaire.....	13
<b>Figure 1.5:</b> Le diagramme fondamental.....	14
<b>Figure 1.6:</b> Illustration d'un carrefour isolé.....	15
<b>Figure 1.7:</b> Diagramme des méthodes d'analyse.....	24
<b>Figure 2.1:</b> Photographie d'une boucle électromagnétique.....	28
<b>Figure 2.2:</b> Capteur piézo-électrique.....	30
<b>Figure 2.3:</b> Capteurs à Tubes pneumatiques.....	30
<b>Figure 2.4:</b> Système à fibre optique.....	32
<b>Figure 2.5:</b> Capteur laser.....	34
<b>Figure 2.6:</b> Les lecteurs de plaque d'immatriculation installés sur portique (à droite) et mât temporaire (à gauche), à raison d'un lecteur par voie.....	37
<b>Figure 2.7:</b> Capteur acoustique passif.....	39
<b>Figure 2.8:</b> Capteurs acoustiques actifs (à ultrasons).....	40
<b>Figure 3.1 :</b> Répartition du parc national d'automobile selon les principaux genres au 31/12/2012 d'après l'office national des statistiques.....	49
<b>Figure 3.2 :</b> vue aérienne de la zone d'étude de la ville de Guelma.....	51
<b>Figure 3.3 :</b> Présentation de la zone d'étude.....	53
<b>Figure 3.4 :</b> Débit horaire du tronçon (7 Mai 2014).....	54
<b>Figure 3.5 :</b> Variabilité de l'HPS (7 Mai 2014) (voie sud-ouest).....	54
<b>Figure 3.6 :</b> Débit horaire pour les différentes heures de pointe (06-12 Mai 2014).....	56
<b>Figure 3.7 :</b> Variabilité de l'HPM moyen (7/5/2014).....	57

## Liste des tableaux

---

<i>Tableau 2.1: Notations et Unités des données de trafic.....</i>	<i>45</i>
<i>Tableau 2.2: Les mesures disponibles par les différents capteurs.....</i>	<i>46</i>
<i>Tableau 3.1 : Evolution du parc national automobile par année de mise en circulation de la ville de Guelma.....</i>	<i>50</i>
<i>Tableau 3.2 : Débit moyen et Débit moyen (HPM, HPS).....</i>	<i>57</i>
<i>Tableau 3.3 : Facteur de pointe.....</i>	<i>58</i>
<i>Tableau 3.4 : pourcentage de poids lourds.....</i>	<i>58</i>

# Introduction générale

---

## Introduction générale

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

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

Les avancées technologiques en matière de télématique routière (électronique embarquée, localisation des véhicules, télécommunications, traitement de l'information...) ont favorisé l'amélioration des moyens existants de collecte de donnée du trafic et parfois l'apparition de nouveaux capteurs ou de nouvelles architectures : équipements embarqués, déportés en recueil multiforme,...

Parallèlement, face aux nouveaux comportements des usagers, devenus à la fois demandeurs et consommateurs d'information routière, les exploitants d'infrastructure routières et grands groupes industriels (constructeurs automobiles, équipementiers,...) ont innové avec de nouveaux produits, qui nécessitent une alimentation permanente en donnée de trafic issues de sources multiples : capteurs à boucles, caméras, systèmes embarqués, véhicules traceurs...

Notre mémoire s'articule autour de trois chapitres

Dans le premier chapitre, nous commencerons par la classification succincte des différents modèles du trafic, et nous présentons les éléments de base composant un trafic urbain, ainsi que les méthodes de régulation existantes au niveau des feux de signalisation. Ensuite, nous analysons les systèmes de régulation dynamique du trafic

## **Introduction générale**

---

Le deuxième chapitre présente les besoins liés au recueil de données trafic, et consacré étudier les différentes techniques et technologies de mesure du trafic routier, principe du fonctionnement, mesures disponible ainsi que Limites de fonctionnement

Dans le troisième chapitre, nous exposons notre étude concernant un tronçon de la ville de Guelma. Présentations et Discussions Des Résultats

---

## Chapitre 1 : aperçu générale sur le trafic routier

- 1.1. Introduction
  - 1.2. Définitions
  - 1.3. Modèles d'écoulement
  - 1.4. Composantes du trafic routier
  - 1.5. Diagramme fondamental
  - 1.6. Régulation des carrefours à feux
  - 1.7. Méthodes d'analyse
  - 1.8. Conclusion
-

## 1.1 Introduction

Une particularité du trafic automobile est essentiellement liée à la conception de l'infrastructure qui est conçue, selon une demande projetée, pour répondre à un optimum Collectif mais que chaque individu réalise son déplacement en cherchant à atteindre son optimum individuel, ce qui est souvent antagoniste avec l'optimum collectif. Les deux définitions ci-dessous montrent bien le double aspect individuel et collectif du trafic, l'aspect individuel étant représenté par le fait que le trafic est formé par différents véhicules et l'aspect collectif par le fait que le trafic est interprété comme un fluide (i.e. un flux de véhicules) [1].

## 1.2 Définitions

- a) Trafic routier:(Anglicisme) Circulation de nombreux véhicules sur un itinéraire, un réseau [2].
- b) Circulation : Mouvement d'un fluide qui circule.
- c) Un peloton  $p$  est composé d'un ensemble de véhicules qui se suivent de façon autonome par accrochage virtuel. Le véhicule de tête est appelé leader et les autres membres sont appelés suiveurs. Un peloton qui contient un seul véhicule est un leader appelé agent libre.
- d) La congestion : La congestion du trafic est une notion intuitivement simple mais dont l'analyse rigoureuse s'avère en fait assez complexe. C'est un phénomène qui survient lorsque la demande (le nombre de véhicules qui cherchent à utiliser une infrastructure donnée) est supérieure à la capacité de cette infrastructure. Si la demande excède la capacité, alors des véhicules seront ralentis à l'entrée de l'infrastructure, formant ainsi un bouchon. Ces véhicules excédentaires seront à chaque instant plus nombreux qu'à l'instant précédent. Comme chaque véhicule occupe une certaine longueur de voie, la longueur de la file d'attente ne fera que croître en proportion du nombre de véhicules présents dans cette file d'attente. On voit de ce qui précède que la congestion est un phénomène évolutif, à la fois dans le temps et dans l'espace. Or, en raison du caractère maillé de l'infrastructure, cet allongement de la file d'attente peut la conduire à atteindre des points de choix d'itinéraire, et ainsi congestionner des parties du réseau où circulent des véhicules qui n'utiliseront pas l'infrastructure à l'origine de la congestion.
- e) Bouchon : Zone de la route où les véhicules sont gênés les uns 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].
- f) Goulot : on appelle Goulot de circulation, tout rétrécissement sur un itinéraire emprunté limitant l'importance du trafic pouvant s'écouler en aval. Les goulots peuvent être de nature permanente ou temporaire, c'est-à-dire induits par des particularités de la circulation. Les configurations les plus répandues de goulots géométriques permanents correspondent à des réductions du nombre de voies, des courbures planes accentuées ou des pentes du profil en long assez prononcées. Les goulots de circulations temporaires sont généralement dus à des accidents ou des incidents divers.

- g) Fluidité : État de l'écoulement du trafic pendant lequel la plupart des véhicules roulent à leur vitesse désirée ou à une vitesse très faiblement inférieure.
- h) Carrefour : Un carrefour isolé est situé à la rencontre de plusieurs rues déterminant des voies d'entrée et de sortie. Il peut revêtir de nombreuses formes, tant dans l'infrastructure que dans les règles de franchissement. Les flux de véhicules sont soit des flux directs, soit des flux de tourne-à-gauche, soit des flux de tourne-à-droite.
- i) Longueur des files d'attente : cette variable correspond au nombre de véhicules arrêtés derrière la ligne d'arrêt à un feu de circulation. La longueur des files d'attente constitue l'une des grandeurs majeures de l'évaluation d'une stratégie de régulation.

### 1.3 Modèles d'écoulement

#### 1.3.1 Niveau de détail

Le niveau de détail (appelé aussi résolution ou grain) est un autre critère selon lequel les modèles peuvent être distingués. Certains auteurs regroupent traditionnellement les modèles d'écoulement existants en deux grandes catégories, selon l'échelle des phénomènes (niveau de détail) qu'ils décrivent [4] : les modèles microscopiques et macroscopiques. Dans la littérature, nous pouvons également trouver une classification regroupant les modèles en trois ou quatre catégories [5] [6] : les modèles sub-microscopiques, microscopiques, mésoscopiques et macroscopiques (Figure 1.1).

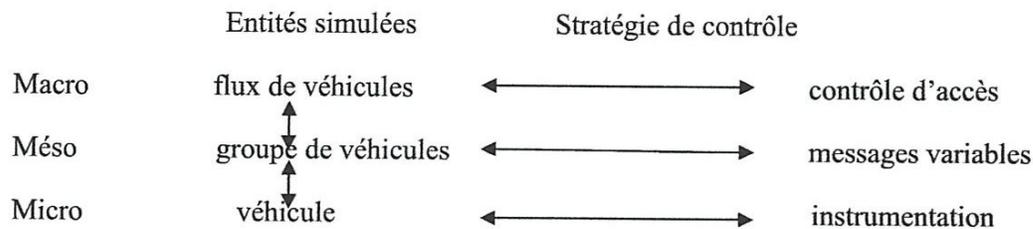


Figure 1.1: Représentation des modèles du trafic selon le niveau de détail

#### 1.3.2 Modèles microscopiques

La modélisation microscopique de la circulation routière a fait partie des toutes premières contributions aux sciences de l'ingénierie du trafic, grâce aux premières avancées obtenues par les modèles de Reuschel (1950) et Pipes (1953) [7]. Ce sont les types de modèles les plus fins parmi les modèles courants de flux de trafic : les modèles sub-microscopiques, décrivant l'architecture interne des véhicules, sont rarement considérés dans ce cas. Dans ces modèles, la vitesse d'un véhicule est directement fonction de la distance qui le sépare du véhicule précédent (véhicule leader), modulo un temps de retard. Ce temps de retard est généralement assimilé au temps de réaction du conducteur afin de prendre en compte les variations de comportement de son véhicule leader. Il s'agit alors d'un modèle de poursuite [8].

Ainsi, l'écoulement du trafic dans les modèles microscopiques est principalement décrit par une loi de poursuite, décrivant le déplacement d'un véhicule en fonction des véhicules

qui l'entourent. Elle est complétée par une loi de changement de voie destinée à représenter les changements de voie ou les dépassements et une loi de navigation, représentant le chemin emprunté par le véhicule pour se rendre de son origine à sa destination [9].

Ce type de modélisation représente le mouvement de chaque véhicule, en cherchant à reproduire le plus finement possible la réaction du conducteur à son environnement. Le comportement de chaque couple véhicule/conducteur peut ainsi être paramétré selon la vitesse désirée du conducteur, les capacités d'accélération et de décélération du véhicule, l'agressivité de la conduite, etc.

Les modèles microscopiques peuvent être basés sur cinq approches différentes [10] ; Les modèles d'interdistance de sécurité, les modèles de poursuite à stimuli, les modèles psychophysiques, les modèles neuro-flous et les modèles discrets et à automates cellulaires

Ils ont donné lieu au développement d'outils de simulation et de réalisations informatiques nombreuses. Cependant, hormis les lois de poursuite, les modèles décrivant les autres fonctions de conduite (y compris les dépassements et les changements de voie) font l'objet de publications plus restreintes ; il est difficile d'accéder aux lois implémentées, protection industrielle oblige. Nous citons les simulateurs microscopiques les plus utilisés : Aimsun [11], PtvVissim [12], etc. On peut aussi évoquer le modèle Mobil, cité comme source d'inspiration par les simulateurs évoqués [13].

Cette catégorie de modèles est très utile, en particulier pour la conception et pour la simulation du trafic à petite échelle dans des environnements complexes comme une partie de réseau urbain. Cependant, ces modèles microscopiques se révèlent n'être plus cohérents pour de nombreuses autres applications telles que la gestion du trafic, la planification et l'évolution des réseaux. En effet, l'utilisation de ces modèles est parfois limitée par l'impossibilité d'avoir accès à la description détaillée des dynamiques individuelles des véhicules. Dans ces cas, l'utilisation de modèles macroscopiques s'impose.

### 1.3.3 Modèles macroscopiques

Les modèles macroscopiques correspondent à une vision continue de l'écoulement. Ils sont fondés sur une analogie avec la mécanique des fluides : on représente l'écoulement des véhicules sous la forme d'un flux. Ici, l'objectif n'est pas de décrire le comportement individuel des véhicules comme dans les modèles microscopiques, mais de donner une description du comportement global, à travers des variables agrégées.

Les principales variables utilisées dans ces modèles sont définies de la façon suivante. Le débit, noté  $Q(x, t)$ , est le nombre de véhicules qui passent en un point  $x$  du réseau à l'instant  $t$ . La concentration, notée  $K(x, t)$ , correspond aux nombres de véhicules présents au point  $x$  à l'instant  $t$ . La vitesse du flot, notée  $V(x, t)$ , est la vitesse moyenne des véhicules se situant en  $x$  à l'instant  $t$  [14].

#### a) Modèles du premier ordre

Le modèle le plus couramment utilisé est également un des modèles pionniers en modélisation du trafic routier. Il s'agit du modèle développé simultanément par [15] ainsi que [16], s'appuyant sur une analogie avec la dynamique des fluides. Plus

communément appelé modèle LWR, ce modèle fait intervenir trois variables décrites précédemment à savoir la vitesse, le débit et la concentration. Pour que le système soit totalement déterminé, il se compose des trois équations suivantes :

- L'équation de définition de la vitesse, vue précédemment comme étant le rapport du débit sur la concentration ;
- L'équation de conservation, provenant de la conservation du nombre de véhicules sur une section de longueur infinitésimale et pendant un laps de temps ;
- Le diagramme fondamental permettant de postuler que la vitesse de flot est obtenue en permanence pour un état d'équilibre, celui-ci ne dépendant uniquement que de la concentration instantanée. Il s'agit d'une équation d'état séparant généralement une partie fluide et une partie congestionnée.

$$\begin{cases} Q(x, t) = K(x, t) \times V(x, t) \\ \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} + \frac{\partial K(x, t)}{\partial t} = 0 \\ V(x, t) = V_e(K(x, t)) \end{cases} \quad (1.1)$$

Ce système d'équations peut être condensé en une équation aux dérivées partielles hyperbolique sous forme non conservative :

$$\frac{\partial K(x, t)}{\partial t} + Q'_e(K(x, t)) \frac{\partial K(x, t)}{\partial x} = 0 \quad (1.2)$$

$$\text{Où} \quad Q_e(K(x, t)) = K(x, t) \times V_e(K(x, t)) \quad (1.3)$$

La forme de la fonction de vitesse à l'équilibre  $V_e$  étant obtenue grâce au diagramme fondamental. C'est la raison pour laquelle il est commun de parler de modèles de premier ordre pour cette famille de modèles. La résolution de cette équation permet de déterminer la valeur de concentration et de déduire d'après la relation d'équilibre, les valeurs de débit et de vitesse correspondantes.

#### b) Modèle du seconde ordre

Les modèles de second ordre permettent de prendre en compte les états de non équilibre ainsi que les situations de convergence vers un état d'équilibre. L'équation d'équilibre utilisée dans le cadre des modèles de premier ordre est ainsi remplacée par une équation dynamique exprimant l'accélération du flux. L'accélération est composée d'un terme de relaxation vers la vitesse d'équilibre  $V_e(K)$  ainsi qu'un terme physique de comportement individuel.

#### 1.3.4 Modèles mésoscopiques

Un modèle mésoscopique différencie pas et ne suit pas les véhicules comme entités individuelles, mais il spécifie le comportement de véhicules en termes probabilistes. Ainsi, le trafic est représenté par de 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 instant, où la décision de faire un changement de voie est

basée sur les densités relatives des bandes et les différences de vitesse. Certains modèles mésoscopiques sont obtenus par analogie avec la théorie cinétique de gaz, en décrivant la dynamique des distributions de vitesse.

Les modèles mésoscopiques occupent une position intermédiaire entre les modèles microscopiques et les modèles macroscopiques. Ils ont la possibilité de modéliser les grands réseaux sans un grand effort sur le codage et le calibrage, tout en assurant une meilleure représentation de la dynamique du trafic et les comportements individuels des participants, par rapport aux modèles macroscopiques.

Les modèles mésoscopiques sont utilisés pour la planification, mais aussi pour des opérations en temps réel. Ils sont plus flexibles que les modèles macroscopiques en termes de modélisation des éléments importants, tels que le comportement de voyage (par exemple, le choix d'un itinéraire). Cependant, il y a des limites dans la capacité à représenter des opérations détaillées du trafic.

Quelques modèles mésoscopiques, les plus souvent rencontrés dans la littérature, seront présentés succinctement dans la suite.

CONTRAM [17], représente le réseau routier par des nœuds et des arcs, et les véhicules sur les arcs sont groupés en paquets qui voyagent de l'origine à la destination (à noter que les paquets peuvent être formés à partir d'un seul véhicule).

DYNAMIT [18], utilise des véhicules individuels se déplaçant le long des segments sur la base des relations vitesse - densité et des modèles des queues d'attente. Les voies sont représentées en détail lorsque des congestions du réseau se produisent et les files d'attente commencent à s'agrandir. Les files d'attente sont spécifiques à chaque voie. Les opérations sur les intersections sont capturées en termes de leur capacité

DYNASMART [19], utilise aussi la relation vitesse - densité, mais il adopte une représentation plus détaillée pour les intersections signalées (au niveau de la succession de feux de circulation) pour modéliser les retards pris dans ces positions.

FASTLANE [20], représente les véhicules individuellement, répondant aux relations vitesse - densité, et utilise des serveurs stochastiques pour les files d'attente au niveau des nœuds pour justifier les retards dus aux feux de circulation, ainsi que les interactions avec les flux de trafic provenant d'autres directions.

DYNAMEQ [21], fonctionne de façon similaire au modèle précédent, mais la dynamique des véhicules dans les liens est capturée par des relations simplifiées de type suivi de véhicule. Les voies sont représentées de manière explicite, y compris les opérations de changement de voies.

#### **1.4 Composantes du trafic routier**

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

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

Les mobiles sont les individus qui utilisent l'infrastructure, principalement dit, des véhicules. Les piétons ne sont pas considérés car leurs mouvements sont supposés dépendre de celui des mobiles.

Notons que les véhicules à l'arrêt ou en stationnement, au sens défini par le code de la route, sont considérés comme faisant partie de l'infrastructure et ne sont généralement pas pris en compte. Autrement dit, seuls les mobiles en mouvement sur la route et en interaction avec la signalisation sont considérés. Dans les sous-sections suivantes, nous introduisons les variables élémentaires utilisées et les mesures usuelles pour l'analyse du trafic [22].

#### 1.4.1 Variables élémentaires du trafic routier

Le développement considérable de la circulation automobile et l'accroissement constant de la motorisation ont rendu nécessaire l'élaboration des théories du trafic, capables de décrire, d'expliquer et de prévoir les interactions entre les véhicules ainsi que les mouvements d'ensemble sur les infrastructures routières. Ces théories, déterministes ou probabilistes s'introduisent au moyen d'un certain nombre de variables, de relations ou de distributions caractéristiques [23].

#### 1.4.2 Ecart du temps inter-véhiculaire

Le premier concept introduit est l'écart du temps inter-véhicule (en anglais, « the headway »). En un point donné de la route, c'est le temps qui s'écoule entre les instants de passage de deux véhicules successifs (Figure 1.2).

Cette variable se révèle particulièrement utile dans les études relatives à la sécurité routière et dans de nombreux problèmes de simulation du trafic. Certains algorithmes de régulation de carrefours à feux en ville, utilisent ce temps inter-véhiculaire. Sur autoroute, la « régulation d'intervalles » continue aujourd'hui d'être une mesure d'exploitation de plus en plus répandue. Enfin, ce paramètre permet d'appréhender les effets de la composition du trafic sur les conditions d'écoulement de la circulation.

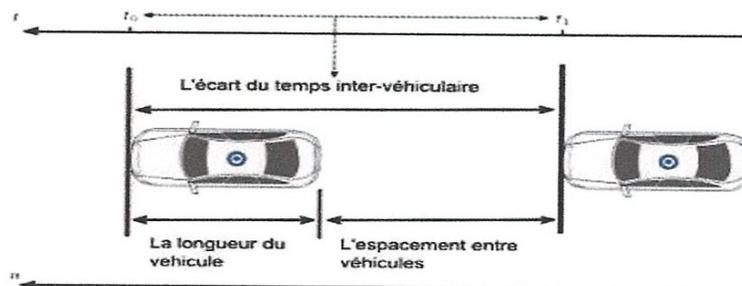


Figure 1.2 : L'écart du temps inter-véhiculaire

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

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

### 1.4.3 Espacement ou distance inter-véhiculaire

L'espacement inter-véhiculaire, noté DIV, désigne à un instant donné, la distance séparant l'avant(ou l'arrière) de 2 véhicules successifs sur une même voie. Cette Mesure est effectuée à partir de boucle magnétiques dans un Intérêt d'étudier la sécurité routière (anti-collision) et la relations vitesse instantanée-espacement [24].

### 1.4.4 Débit

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

$$q(t_1, t_2, x) = \frac{n(t_1, t_2, x)}{t_2 - t_1} \quad (1.4)$$

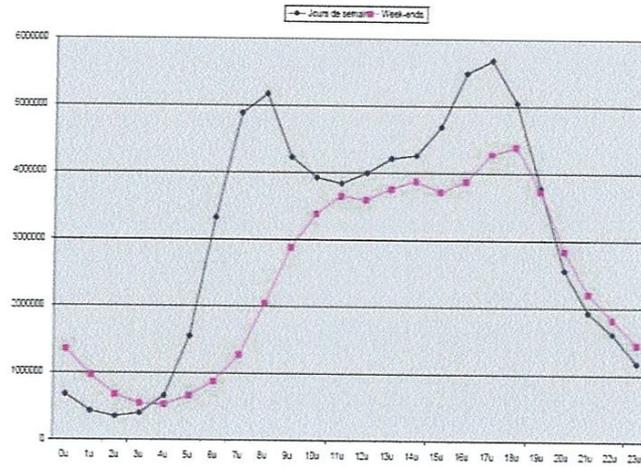
Dans lequel  $n(t_1, t_2, x)$  désigne le nombre de véhicules passés en  $x$  entre les 2 instants. Expérimentalement, le débit peut être déterminé par de simples comptages sur la route. Dans certaines théories, le flot des véhicules est parfois considéré comme continu. On définit alors le débit  $q(x, t)$  au point  $x$  et à l'instant  $t$  par :

$$q(x, t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} q\left(t - \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}, x\right) \quad (1.5)$$

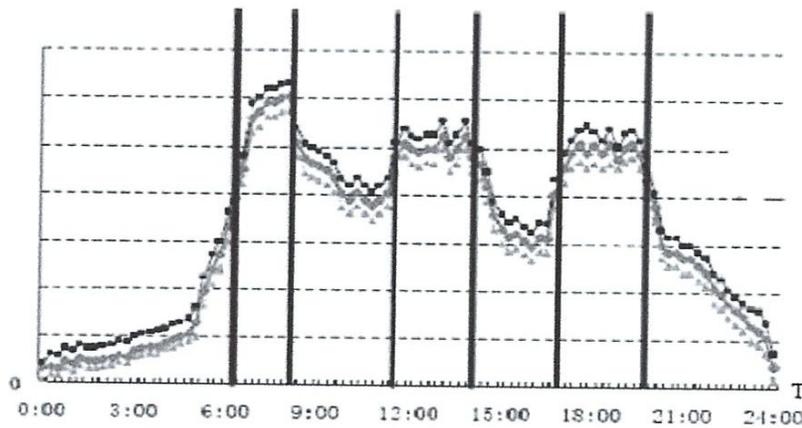
Une telle définition ne s'applique pas en ces termes à une théorie discrète de l'écoulement de la circulation, car cette limite vaudrait l'infini ou zéro, selon qu'il passerait ou non un véhicule à l'instant  $t$ . Il s'agit donc d'une schématisation mathématique. En fait, on considère qu'il y a identité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

#### ☞ Exemple 1.1

La figure 1.3 (a) représente un exemple de l'évolution de débit de véhicule durant deux journées de la semaine (une journée ouvrable et un week end). La figure 1.3 (b) les caractéristiques générales de l'évolution du débit moyen de véhicules en fonction du moment de la journée précis les trois pics: un premier le matin (6h45 – 9h), un deuxième au moment du déjeuner (12h – 15h) et un troisième le soir (17h – 20h).



(a)



(b)

Figure 1.3 Distribution du flux de véhicules pendant une journée

#### 1.4.5 Variation temporelles

Variantes multiples (Annuelles, mensuelles, Journalière, horaires, ...) déclinées selon le jour ouvrable ou férié, ... On distingue :

- TMJA : Trafic Journalier moyen Annuel (en veh/j)
- TMJM : Trafic Journalier moyen mensuel par classe de silhouette (véh/mois)
- TM diurne/ nocturne par type de véhicule

#### 1.4.6 Concentration (ou la densité)

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

$$k(x_1, x_2, t) = \frac{n(x_1, x_2, t)}{x_2 - x_1} \quad (1.6)$$

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

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

Par :

$$k(x, t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} k\left(x - \frac{\Delta x}{2}, x + \frac{\Delta x}{2}, t\right) \quad (1.7)$$

Sans reprendre le précédent commentaire, soulignons cependant que si  $\Delta x$  est de l'ordre de 5 0 à 100 mètres, il y a pratiquement identité entre les valeurs de  $k(x, t)$  et  $k\left(x - \frac{\Delta x}{2}, x + \frac{\Delta x}{2}, t\right)$ .

#### 1.4.7 Taux d'occupation

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

$$\tau = (L + l) \cdot k \quad (1.8)$$

Où  $L$  et  $l$  désignent respectivement la longueur moyenne des véhicules et la longueur de la boucle.

Une telle relation se relève très utile car à la différence du taux d'occupation, les procédés de mesure de la concentration sont actuellement complexes et coûteux.

#### 1.4.8 Vitesse des véhicules et les vitesses moyennes

a) Vitesse instantanée d'un véhicule.

Pour un même véhicule, l'enregistrement des vitesses instantanées permet de caractériser le profil temporel de la vitesse. Cet enregistrement est utile à l'obtention de divers paramètres. Il est révélateur de la qualité du trafic sur un itinéraire et s'emploie fréquemment dans les calculs relatifs à la consommation d'énergie des véhicules.

b) Vitesse moyenne d'un véhicule

Sur un parcours de durée  $T$ , la vitesse moyenne  $v_{\text{moy}}$  d'un véhicule est définie par :

$$v_{\text{moy}} = \frac{\int_0^T v(t) dt}{T} \quad (1.9)$$

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

## c) Vitesse moyenne temporelle.

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

$$u_t = \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{N} \quad (1.10)$$

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

## d) Vitesse moyenne d'espace.

La notion de vitesse moyenne d'espace  $u_s$ , définie par [25], s'avère plus utile en pratique. Ainsi, sur une section de route de longueur fixée, la moyenne arithmétique des vitesses des véhicules à un instant donné est :

$$u_s = \frac{d}{\frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}} \quad (1.11)$$

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

**1.4.9 Facteur de point instantané**

Rapport, noté  $FP_i$ , du débit horaire de pointe au maximum de l'intensité horaire atteinte pendant une durée de base comprise dans la même heure.

$FP_i$  caractérise les variations du débit au cours d'une même heure. Il est calculé pour une durée donnée (6 min, 15 min, 30 min,...)

Les faibles valeurs de  $FP_i$  impliquent une grande variabilité du débit.

Les intensités sur de faible durée à 5 min sont considérées comme instables.

Les données horaires sont disponibles, ce facteur de pointe est le rapport du maximum atteint dans la journée et le trafic moyen sur la journée (TMJ calculé divisé par 24) :

$$FP = Q_{h_{\max}} / Q_{h_{\text{moy}}} \quad (1.12)$$

**1.4.10 Débit par de catégories de véhicules Coefficient d'équivalence**

Trafic composé de quatre catégories de véhicules, à savoir les motorisations à deux roues, les camions ou poids lourds(PL), les transports en communs et les voitures ou véhicules légers (VL).

On appelle coefficient d'équivalence PL/VL, noté  $e$  (PL/VL) ou simplement  $e$ , le nombre de voitures particulières (VL) que représente chaque poids lourd (PL) dans des conditions de circulation données:

$$Q_{\text{vvp}} = Q_{\text{VL}} + eQ_{\text{PL}} \quad (1.13)$$

$Q_{\text{vvp}}$  =débit exprimé en vvp/h

QVL= débit des voitures particulières en véh/h

QPL=débit des poids lourds en véh/h

Le coefficient  $e$  permet de définir des débits en unités de voitures particulières par unités de temps (uvp/h)

A défaut de calibrage précis, il est fréquent d'adopter la valeur [26].

- 1 uvp pour un VL ou une camionnette.
- 2 uvp pour un camion ou un bus
- 0.2 uvp pour un cycle

On établit la relation :

$$Q_{uvp} = Q(1 + \sum(e_i - 1)p_i) \quad (1.14)$$

Dans lequel  $p_i$  désigne la proportion de véhicule de type (i) dans le trafic et  $e_i = e(i/VL)$

### Exemple 1.2

Dans cet exemple, on présente le calcul et l'évolution du PL par rapport aux VL

- Un flot de 2500 véh/h, dont 10% de PL  $\Rightarrow Q_{uvp} = 2500(1 + (2-1).0.1) = 2750 \text{ uvp/h}$

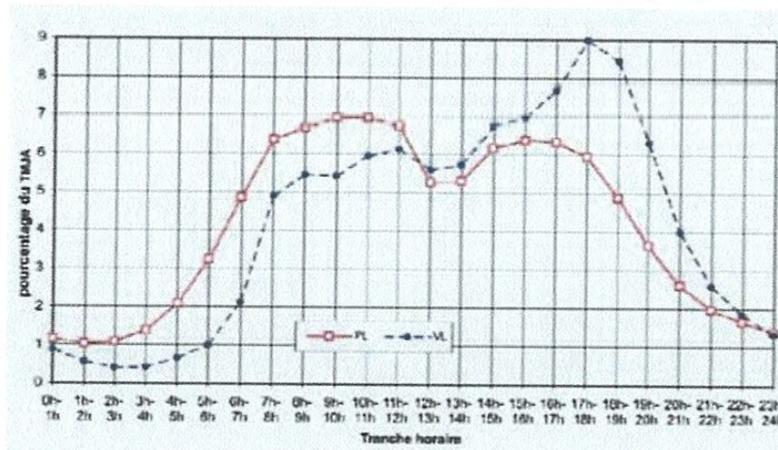


Figure 1.4. Profil moyen journalier de trafic VL et PL sur une route Nationale par tranche horaire.

### 1.4.11 Lien microscopique - macroscopique

- Débit et temps inter-véhiculaire sont inverse l'un de l'autre :

$$q = 1/TIV \quad (1.15)$$

- Concentration et espacement inter-véhiculaire sont inverse l'un de l'autre :

$$k = 1/DIV \quad (1.16)$$

- Vitesse moyenne d'espace  $u_s$  correspond au rapport :

$$u_s = DIV/TIV \quad (1.17)$$

## 1.5 Diagramme fondamental

Le trafic est supposé homogène et stationnaire. Autrement dit, le débit, la concentration et la vitesse varient peu autour de leurs moyennes respectives  $q$ ,  $k$  et  $u$ . A faible concentration de véhicules, nous observons une vitesse moyenne de flot généralement élevée, appelée vitesse libre ou vitesse désirée  $u_{max}$ . A l'inverse, lorsque  $k$  augmente, les espaces entre les véhicules deviennent plus importantes et  $u$  diminue. Ce constat suggère que  $u$  est une fonction décroissante de  $k$ . L'hypothèse  $u = u(k)$  s'appelle l'hypothèse du diagramme fondamental. La courbe observée est dans la Figure (1.5) [23].

Compte tenu de la relation liant les trois variables, la loi d'écoulement du trafic sur une section de route peut donc être formulée par une fonction liant deux des trois variables : débit, concentration et vitesse. Le diagramme fondamental est sensible à de nombreux facteurs comme la géométrie de la route, la nature et la composition du trafic, les conditions météorologiques, les mesures d'exploitation,...

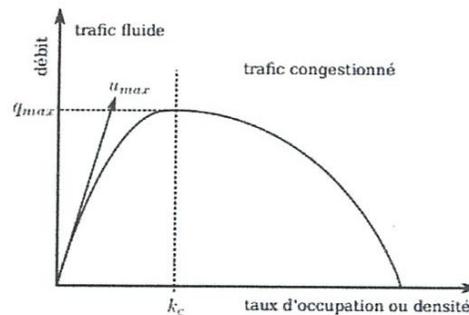


Figure 1.5. Le diagramme fondamental

## 1.6 Régulation des carrefours à feux

Dans les villes, la plupart des systèmes de régulation des carrefours sont de deux types : régulation à plan de feux fixe et régulation adaptative. Le premier type de régulation est plus ancien et moins coûteux, tandis que le deuxième est plus complexe et performant.

Comme le montre la Figure 1.6, ce carrefour simple est composé de quatre routes (ou quatre directions). Une route est caractérisée par sa longueur, son nombre de voies. Cette figure montre également les zones fonctionnelles : la « zone de conflit », commune aux deux routes et la « zone de stockage ». On peut aussi définir la « longueur de stockage » comme la longueur sur laquelle se stockent tous les véhicules pouvant pénétrer le carrefour pendant la durée du feu vert.

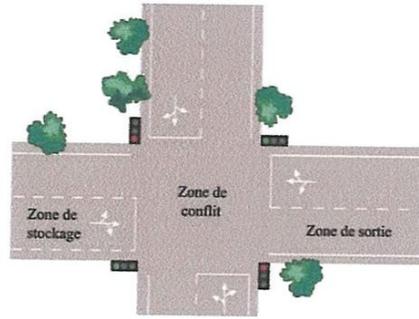


Figure 1.6. Illustration d'un carrefour isolé.

Un « mouvement » est défini par son origine et sa destination. Une voie n'est pas allouée à chaque type de mouvement, mais ceux-ci sont au contraire regroupés en flux sur une même voie mixte. Un flux de mobiles est donc l'ensemble des mouvements des véhicules qui proviennent d'une même branche d'accès à un carrefour et qui sont admis simultanément au moyen d'un même groupe de signaux.

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

### 1.6.1 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 historique. Dans [27], les auteurs ont proposé une formule importante pour trouver la durée de cycle optimale  $c_0$  en minimisant le retard subi par les véhicules :

$$C_0 = \frac{1.5T+5}{1-Y} \quad (1.18)$$

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

$$T = \sum t_p + \sum r_i \quad (1.19)$$

En règle générale, la valeur moyenne de  $t_p$  correspond à 5.5s et celle de  $r_i$  à 2s de sorte que  $T = 7,5n$ ,  $n$  désignant le nombre de phases. Par suite, on choisit une durée de cycle  $C$  la plus proche possible de  $c_0$  en tenant compte des limites inférieures et supérieures déterminées lors de l'établissement des données.

Le système le plus célèbre avec plan de feux fixe est TRANSYT «Traffic Network StudyTool» [28]. Il évalue le réglage des feux en temps fixe d'un réseau urbain et fournit un plan de feux optimal (répartition optimale des durées de vert et décalages optimums) minimisant un indice  $OP_i$  de performance du réseau :

$$OP_i = T + h.S \quad (1.20)$$

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

### 1.6.2 Régulation du trafic avec les systèmes adaptatifs

Le principe de la régulation adaptative a d'abord été utilisé par [29] 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[30]. Dans la fin des années 60, PLIDENT a été appliqué à Glasgow et a enfin échoué. En 1981,[31] a analysé les insuffisances des stratégies de 1ère génération et a surmonté les problèmes par une stratégie plus avancée de la deuxième génération – SCOOT « Split Cycle Offset Optimization Technique». Il minimise le retard par l'adaptation du temps de cycle. Au début des années 80, certains systèmes adaptatifs de 3ème génération ont été développés. Par exemple, OPAC « Optimisation Policies for Adaptive Control» [32] et le PROLYN « Programmation Dynamique» [33]. Ces stratégies peuvent fonctionner à 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.

### 1.6.3 Systèmes de régulation

L'enjeu de la régulation dynamique est essentiellement un enjeu de trafic, lié aux problèmes du fonctionnement d'un réseau. Les enjeux « accidentologie » et « environnement » sont des enjeux indirects de la régulation du trafic, bien souvent associés à l'enjeu « trafic ». Les problèmes de fonctionnement se traduisent par des difficultés de circulation et sont provoqués par :

- des diminutions temporaires de la capacité d'un axe à écouler le trafic ;
- des augmentations temporaires de la demande de trafic.

Pour faire face à cet enjeu " trafic " générant des pertes de temps pour l'utilisateur, l'exploitant poursuit en général trois objectifs :

- améliorer l'information diffusée auprès des usagers ;
- minimiser les temps perdus par les usagers et
- fiabiliser les temps de parcours des usagers.

Pour atteindre les objectifs cités ci-dessus, deux stratégies de régulation dynamique sont possibles :

- moduler l'offre routière pour l'adapter au mieux à la demande de trafic ;
- réguler la demande de trafic afin de la maintenir en deçà de l'offre routière.

#### a) GERTRUDE

GERTRUDE « Gestion Electronique de Régulation en Temps Réel pour l'Urbanisme, les Déplacements et l'Environnement » utilise un certain nombre de plans de feux pré-calculés, avec deux types d'adaptativité en temps réel superposés [34]:

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

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

#### b) SCOOT

SCOOT « Split, Cycle and Offset Optimisation Technique » ou technique d'optimisation des durées de vert, du cycle et des décalages [35] utilise un plan de feux déformé en temps réel par de petites altérations apportées à la durée du cycle, à la répartition des temps de vert sur chaque carrefour, et aux décalages entre les carrefours [31].

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

#### c) SCATS

L'architecture de SCATS « Sydney Co-ordinated Adaptive Traffic System » est composée d'un ordinateur central, connecté en réseau à plusieurs mini-ordinateurs de zone, eux-mêmes connectés à de nombreux micro-ordinateurs, assurant le rôle de contrôleurs locaux [36]. Ces contrôleurs exploitent les données des détecteurs, prennent les décisions tactiques relatives à la gestion des feux et évaluent les défauts de fonctionnement. Ils permettent également une méthode logicielle de coordination sans câble, englobée

comme système de secours. Le réseau est subdivisé en sous-systèmes, comprenant jusqu'à 10 intersections signalées, partageant une durée du cycle commune.

Le mode normal de coordination correspond à un réglage en temps réel sur des valeurs de base pré-spécifiées des paramètres des plans de feux : durées de cycles, répartition de vert et décalages. Ces valeurs sont modifiées et adaptées au mieux en réponse aux fluctuations détectées de la demande.

#### d) PRODYN

C'est un système développé en 1980. Il permet de commander les feux au niveau des carrefours afin de minimiser les retards des véhicules particuliers. Il convertit le complexe problème d'optimisation de départ en de petits sous-problèmes correspondant chacun à un niveau inférieur qui traite un seul carrefour. La décomposition du problème de départ se base sur les méthodes de décomposition-coordination. La résolution de ces sous-problèmes au niveau des carrefours fait appel à la programmation dynamique [37].

### 1.7 Méthodes d'analyse

Elle consiste à faire un diagnostic des conditions de circulation sur le réseau considéré. L'enjeu est donc ici de mettre en évidence les sections et les périodes horaires générant des difficultés de circulation susceptibles d'être atténuées par de la régulation.

L'idée est ainsi de réaliser un diagnostic en deux niveaux :

- sur un premier niveau de zoom, mener une analyse « statique » qui consiste à observer les niveaux de trafic sur le réseau considéré ainsi que les endroits stratégiques de celui-ci ;
- sur un deuxième niveau, mener une analyse « dynamique » qui consiste à observer et quantifier les congestions qui s'y forment [38].

#### 1.7.1 Analyse statique

La première partie d'un diagnostic trafic consiste à réaliser une analyse statique du réseau.

L'analyse statique relate essentiellement les niveaux de charge des infrastructures et les secteurs stratégiques en termes d'écoulement du trafic. Elle doit mettre en lumière les principales informations sur :

- les débits qui s'écoulent en toute période temporelle représentative (sur une journée moyenne, une heure particulière etc.);
- les types de trafic qui (reflètent en partie la motivation des déplacements) ;
- les points géométriques particuliers du réseau ;
- le recensement des mauvaises conditions de circulation qui apparaissent régulièrement en tout secteur et toute période.

#### a) Indicateur de trafic

Un indicateur du trafic est un moyen d'évaluer la performance d'un trajet ou d'un réseau. Il est calculé à partir des variables macroscopiques ou microscopiques provenant des capteurs. Il peut y avoir plusieurs sortes d'indicateurs. Un indicateur peut avoir (ou ne

pas) un sens physique, l'important c'est son évolution au cours du temps et le long d'un trajet (espace). Comme on s'intéresse ici aux difficultés de circulation, ceci nous amène à s'intéresser aux variations du trafic dans le temps tels que :

- Indicateur de trafic journalier générique : Un indicateur de trafic, usuellement disponible, est le trafic moyen journalier annuel (TMJA).
- Indicateurs de trafic journalier par échelle de temps : Le TMJA a le défaut de mélanger plusieurs périodes hétérogènes de temps.

Pour affiner l'analyse statique d'une infrastructure selon des variations du trafic dans le temps plus précises, il est nécessaire de fixer une échelle de temps pour chaque infrastructure.

Les infrastructures routières en zone urbaine supportent généralement des trafics liés aux activités économiques et l'on considère ainsi plutôt les trafics qui s'écoulent les jours de semaine hors périodes de vacances scolaires. On étudie dans ce cas pour plus de commodités le trafic moyen journalier des jours ouvrés (TMJO) ;

Les axes interurbains, quand ils ont une fonction de desserte régionale voire nationale, sont plus soumis à des trafics liés aux activités de loisirs. Pour ces axes, selon les types d'activités qui sont en jeu, on retiendra généralement les trafics moyens journaliers des mois de période de congés scolaires (TMJM été, printemps et hiver) ou les trafics moyens journaliers des week-ends (TMJ –Vendredi Samedi).

- Indicateur de trafic poids lourds : on associe en général une valeur qualifiant la densité de poids lourds, par le pourcentage moyen de poids lourds dans le trafic.
- Indicateur de trafic horaire : Une fois la période considérée et après avoir déterminé le niveau de trafic journalier qualifiant la charge d'une infrastructure, il est nécessaire de connaître les pics qui sont atteints pendant ces journées types. Cela permet de caractériser l'allure générale (niveau stable ou niveau variable en fonction d'heures de pointe et d'heures creuses). on peut recourir aux données horaires du trafic disponibles et déterminer un indicateur du trafic que doit prendre en charge l'infrastructure pendant les périodes les plus chargées (FP).

#### b) L'indicateur de temps gêné

On considère comme un gêne le fait pour un véhicule léger (VL) de ne pas rouler en état libre, plus précisément, lorsqu'il subit la contrainte du véhicule prédécesseur (le VL est alors contraint de rouler à la vitesse du véhicule lent qui le précède, au lieu d'une vitesse de circulation fluide).

Le temps gêné est le temps passé par les VL en état ralenti. Cet indicateur de gêne présente l'état moyen de congestion pour des périodes en régime non saturé. Pour cela, on considère deux catégories d'usagers : les VL et les PL, la principale hypothèse

simplificatrice est de considérer qu'en situation de gêne, les VL roulent à la vitesse libre trouvent pas en situation saturée mais sont gênés par les PL.

Le temps gêné peut être calculé à partir du TMJA et du pourcentage de PL (%PL), en fonction d'un certain nombre de paramètres dépendant du type de routes [39].

#### c) Recensement des points durs

En plus des niveaux de trafics et des répartitions temporelles et par types de véhicules qui, quand ils sont élevés, révèlent des sections à plus ou moins fort enjeu, l'analyse plus géométrique de la section peut permettre également de recenser les sources potentielles de difficultés de circulation. On appelle généralement ces sources « points durs ».

Un point dur est le lieu d'une infrastructure fragile pour l'écoulement du trafic.

Cette fragilité peut se révéler par une capacité d'écoulement intrinsèquement diminuée (passage de 3 à 2 voies par exemple) ou par une capacité fréquemment en mode dégradé (panne de véhicule, incident) diminuée.

Les causes de chute de capacité sont nombreuses, on pourra citer les plus significatives :

- Réduction du nombre de voies de circulation ;
- ouvrage d'art (tunnel, viaduc, etc.) à gabarit ou vitesse contraints ;
- diminution de la largeur des voies de circulation ;
- entrecroisement sous dimensionné ;
- rampe avec un fort taux de PL ;
- .... ;

#### d) Indicateur d'accidentologie

Les accidents, et plus généralement les incidents, sont une des sources pour la formation de congestions. Leur analyse peut apporter des enseignements supplémentaires sur les enjeux de circulation d'un réseau.

- Apparition des accidents : Le premier élément intéressant en matière d'accidentologie est l'heure de survenance des accidents. Si une part importante de ceux-ci surviennent pendant les heures de pointes, en tout cas pendant les périodes de la journée susceptibles d'être régulées, alors l'accidentologie constitue un paramètre non négligeable pour les réflexions de régulation du trafic.
- Effets positifs des mesures de régulation : Chaque mesure de régulation dynamique du trafic agit d'une manière ou d'une autre sur l'accidentologie, généralement positivement si l'usager comprend et respecte le dispositif de régulation. Ces facteurs de réduction du risque routier, on notera les plus importants :
  - homogénéisation des vitesses réduisant les accidents liés à des vitesses pratiquées trop importantes

- meilleur espacement entre véhicules diminuant le nombre d'accidents liés aux insertions et changement de voie
  - réduction des dépassements des poids lourds diminuant le nombre d'accidents liés aux conflits VL/PL
- Effet négatif des mesures de régulation : Cependant, dans certains cas, on a pu relever que la réduction des dépassements poids lourds augmente les problèmes de sécurité routière car elle contribue à la formation de « trains de poids lourds » sur voie lente. Ce phénomène conduit à rendre plus difficile les changements de voie et les insertions.  
La caractérisation des accidents (cause, véhicules impliqués etc.) Est donc particulièrement importante dans l'analyse du réseau routier pour la mise en place de mesures de régulation du trafic.

Bien sûr, les indicateurs classiques (densité d'accidents, zones d'accumulation d'accidents etc.) complètent utilement l'analyse pour la hiérarchisation du risque routier entre plusieurs axes.

### 1.7.2 Analyse dynamique

#### a) Appréciation des conditions de circulation

La congestion est une notion facile à représenter. Sa caractérisation peut se faire à partir de différents indicateurs.

Les indicateurs pour caractériser cette congestion sont parfois le taux d'occupation, parfois la vitesse, parfois une combinaison des deux. Ces seuils attribués peuvent être fixés pour tout un réseau, ou être déclinés pour chaque tronçon considéré.

Ces notions permettent un traitement aisé des données de trafic sur tout un réseau considéré. Mais si l'on veut prendre en compte les spécificités de chaque tronçon de route, il est possible alors de se référer aux courbes de théorie du trafic. En effet, ces courbes déterminent les points d'équilibre (couple débit/vitesse ou couple taux/débit) du trafic et donc des seuils sur les vitesses ou taux d'occupation adaptés à chaque infrastructure.

#### b) Observation de la congestion

La congestion étant un phénomène spatial, sa description est insuffisamment rendue par l'analyse des données de trafic issues des stations de comptage. A l'inverse, les observations visuelles des agents d'exploitation (patrouilles, opérateurs) rendent bien compte de l'étendue des congestions, mais la précision des relevés est moindre.

Plusieurs types d'analyse peuvent être effectués, en fonction des moyens d'observation disponibles.

#### c) Travail préliminaire sur les données

Un travail préliminaire peut permettre de faciliter le traitement des données de trafic ou d'autres type de données :

- identifier les données de trafic disponibles ;
  - identifier la taille d'échantillon disponible ;
  - contextualiser chaque journée de recueil ;
  - sélectionner les données qui permettront une analyse cohérente.
- Taille de l'échantillon : Afin que l'analyse des congestions porte sur un échantillon de données représentatif, il convient de s'assurer que la taille de celui-ci soit suffisamment importante.  
Afin de préserver un échantillon suffisamment représentatif, il est recommandé de collecter au minimum deux semaines de données, pour un même contexte.
  - Contexte de l'échantillon : Le contexte de l'échantillon va permettre de cibler ce qui sera analysé.  
Par exemple, pour identifier les enjeux de circulation pendant les heures de pointe pour les déplacements domicile-travail, il est utile de récolter des données sur une période large autour de ces heures de pointe, hors vacances scolaires.  
Si le but est d'identifier les enjeux de circulation les jours de départ en vacances, on peut centrer l'analyse, par une analyse calendaire sur ces journées (jeudis, vendredis).
    - Filtre sur les données : L'analyse sur les congestions suppose également une connaissance factuelle des congestions. Ainsi, pour les congestions provoquées par une augmentation brutale du trafic, il convient d'isoler les cas où la congestion a été causée par des phénomènes tels que : accident, précipitations, etc.

#### d) Analyse temporelle en des points donnés

L'analyse temporelle en des points fixes (stations de comptage) consiste à étudier le comportement d'indicateurs de trafic au droit de chaque station de recueil.

Lorsque l'on peut obtenir un recueil suffisant de données agrégées, par exemple sur 15 minutes, il est alors possible d'analyser les congestions à partir de l'évolution des vitesses moyennes ou du taux d'occupation.

Cependant, ce travail doit être fait en plusieurs points localisés sur un axe (stations de recueil), en nombre suffisant.

- Chronique des indicateurs : Afin de conduire une analyse globale sur l'ensemble de l'échantillon (par exemple 7 journées Recueillies), il n'est pas recommandé de faire la moyenne, par pas de temps choisi (par exemple 15 minutes), des débits, vitesses ou du taux d'occupation sur l'ensemble de cet échantillon. En effet, ce travail comporte le risque de lisser certaines journées marquées plus que d'autres.

- Traitement statistique des indicateurs : Afin d'objectiver les temps de congestion dans l'ensemble de l'échantillon, sans développer plus avant les différentes méthodes disponibles, on peut citer les approches suivantes : les données de l'échantillon peuvent être traitées par des méthodes d'analyse des données.

e) Analyse spatiale sur des périodes données

L'observation des conditions de circulation décrite précédemment se limite à une observation ponctuelle, au droit des stations de comptage utilisées.

Pour compléter ces observations, il est intéressant de se pencher sur l'analyse spatiale d'un réseau, qui peut consister à :

- l'analyse (quantitative) simultanée des stations de recueil permettant d'évaluer sur un réseau :
- les temps de parcours ; plus la variabilité des temps de parcours en un point et en un moment est grande, plus les conditions de trafic observées sont variables.
- les temps perdus et/ou volumes de bouchon ; calculés à partir des indicateurs de trafic recensés par un panel de stations de comptage régulièrement espacées.
- l'analyse (qualitative) à partir des mains courantes ou des flux vidéo sur des secteurs stratégiques. Celle-ci a le désavantage de ne pas quantifier les temps perdus par les usagers, mais a l'avantage de mieux appréhender la formation des congestions et leurs causes.

Le diagramme ci-dessous récapitule les éléments des méthodes d'analyse pour identifier les tronçons les plus sensibles à l'enjeu de circulation.

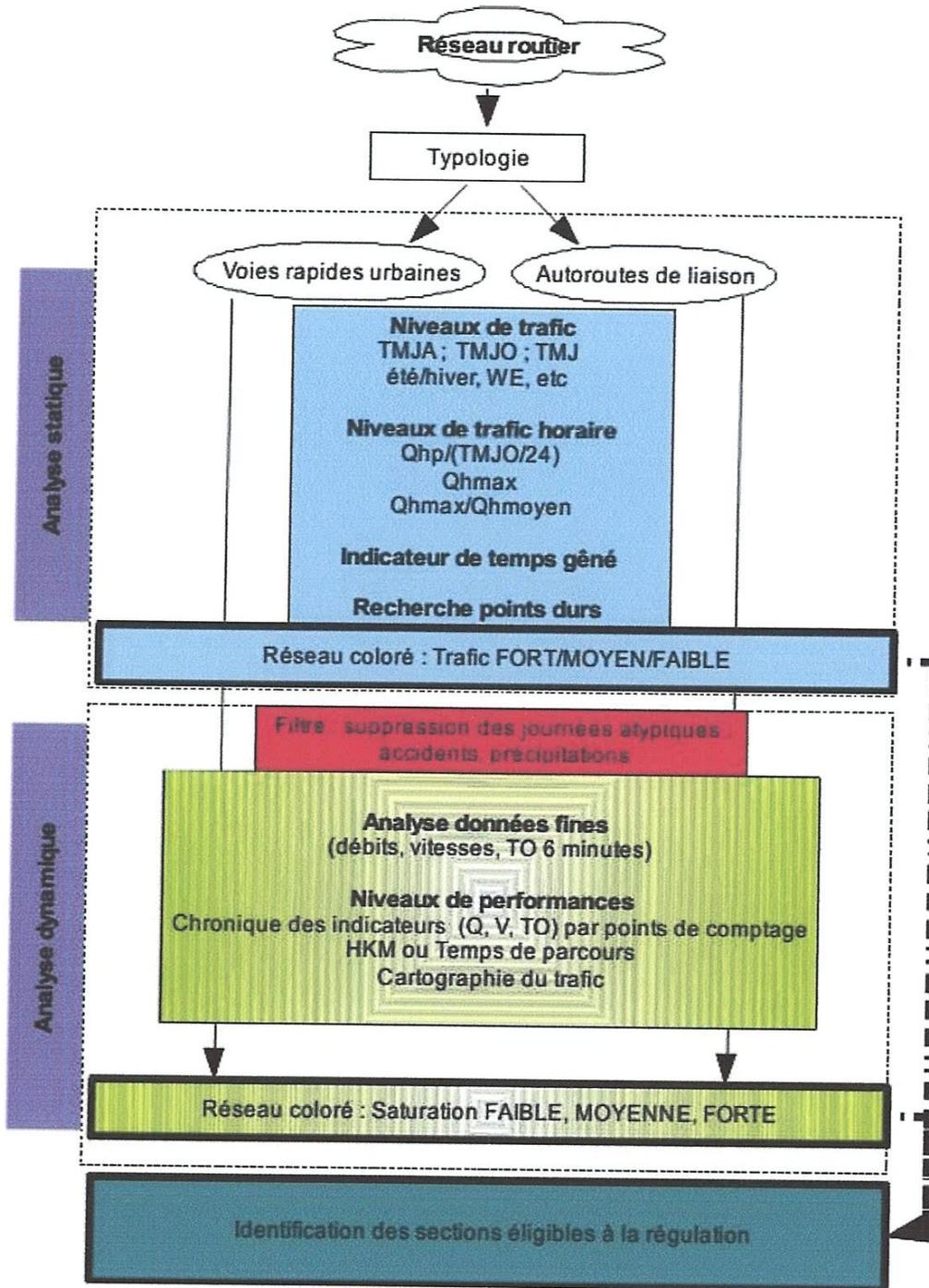


Figure 1.7. Digramme des méthodes d'analyse.

## 1.8 Conclusion

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

---

## Chapitre 02 : Systèmes de recueil de données

2.1. Introduction

2.2. Besoins liés au recueil de données trafic

2.3 Les capteurs de recueil de données de trafic routier

2.4. Les nouvelles technologies de recueil de données de trafic routier

2.5. Les systèmes coopératifs et recueil de données

2.6 Mesures disponibles

2.7 Conclusion

---

## 2.1 Introduction

Les technologies ont considérablement progressé au cours des dernières années dans les domaines des télécommunications, de l'informatique, et de l'internet, élargissant les perspectives pour les systèmes de transport intelligent.

Avec ces progrès technologiques, les besoins se sont progressivement diversifiés: information trafic, temps de parcours, détection automatique de bouchon (DAB) et d'incident (DAI), observatoire de l'évolution du trafic...

Dans le domaine du recueil de données trafic, qui joue un rôle important pour l'exploitation de la route, de nouveaux besoins apparaissent dans les différents domaines, aussi bien en temps réel, en temps différé, en données individuelles ou des besoins plus spécifiques comme la détection de certaines catégories de véhicules (poids lourds, deux-roues motorisés ou non motorisés, piétons...)

## 2.2 Besoins liés au recueil de données trafic

Les exploitants et les gestionnaires de réseaux routiers ont en charge la gestion du trafic, la sécurité des déplacements avec notamment le maintien de la viabilité et l'information de l'utilisateur. Pour assurer ces missions, la politique de gestion du trafic de chaque gestionnaire routier peut se décliner en différentes stratégies d'exploitation qui dépendent de la typologie du réseau et de ses caractéristiques (voies rapides urbaines, trafics pendulaires, niveaux de trafic, etc.).

Ces différentes stratégies nécessitent une bonne connaissance du trafic. Selon les objectifs poursuivis, on recense quatre types de besoins en matière de données de trafic. Certains capteurs peuvent couvrir plusieurs champs d'applications à la fois et d'autres sont spécifiquement déployés de façon complémentaire au système global de recueil de données de trafic [46].

### 2.2.1 Les applications en temps différé

Il s'agit de l'application la plus courante, les données sont agrégées en séquences horaires ou journalières pour des besoins statistiques. La plupart des gestionnaires ne s'intéressent, dans ce cas, qu'aux débits et à la composition du trafic, débits des véhicules légers (VL) et des poids lourds (PL), le plus souvent pour la planification de l'entretien des routes.

### 2.2.2 Les applications en temps réel

Les données sont utilisées au fil de l'eau par les gestionnaires et sont généralement fournies par séquences de 6 minutes ou toutes les minutes. La nature des mesures est généralement le débit, la vitesse, la longueur des véhicules et le taux d'occupation de la chaussée. Elles sont destinées aux besoins d'exploitation pour la gestion du trafic routier comme l'affichage des temps de parcours, la détection automatique des congestions ou simplement le renseignement de l'état du trafic. Ici, les capteurs sont déployés en grand

nombre afin d'obtenir un maillage dense, ils se doivent donc d'être simples, économiques, ne nécessitant qu'une maintenance réduite et associés à un système de transmission de données performant.

### **2.2.3 Les données individuelles**

Il s'agit de données fines de trafic appelées aussi données microscopiques. Elles sont stockées au fil de l'eau véhicule par véhicule pour alimenter des études d'aide à la définition de stratégies d'exploitation (ex : réduction des vitesses, interdiction de dépasser des PL, etc.), des études de sécurité ou des études comportementales des usagers. Les mesures exploitées sont souvent la vitesse, le débit et quelquefois la catégorie, le poids des véhicules ou le temps inter-véhiculaire. Les capteurs qui fournissent ce type de donnée individuelle doivent être d'une bonne qualité métrologique.

### **2.2.4 Des besoins spécifiques**

Il s'agit principalement de la détection de véhicules particuliers. Les objectifs sont d'étudier, d'alerter, ou de renseigner la présence sur la chaussée de véhicules particuliers comme les deux roues motorisées (2RM), les véhicules de transports en commun (TC), les véhicules de transports de matières dangereuses (TMD), les vélos etc. Les applications sont multiples en matière de statistiques, de sûreté, de stratégie d'itinéraire ou de péage. Les besoins sont variés pour l'analyse du comportement des usagers (circulation et stationnement), la taxation des véhicules, la caractérisation du réseau (tunnels) ou bien encore pour la supervision des équipements.

## **2.3 Les capteurs de recueil de données de trafic routier**

Les variables caractérisant le trafic routier sont nombreuses. Les configurations et les géométries de chaussées sont également déterminantes dans le choix d'un système de recueil de données de trafic. Ce chapitre se propose de présenter de manière synthétique les différentes grandes technologies de recueil de données de trafic.

Une attention particulière est portée sur les principes de fonctionnement, sur l'intrusivité des capteurs et sur la description des mesures disponibles, associées aux limites de fonctionnement pour chaque technologie.

### **2.3.1 Les différentes technologies**

Ce chapitre présente les principales technologies de recueil de données de trafic. On recense trois catégories de capteurs :

- ✓ les capteurs intrusifs : lorsqu'ils sont posés en chaussée
- ✓ les capteurs non intrusifs : lorsqu'ils ne nécessitent pas un travail sur la chaussée
- ✓ 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).

**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, généralement noyé dans la chaussée et relié à un détecteur. Chaque boucle est constituée de plusieurs spires de fil de cuivre multibrins étamé d'une section de l'ordre de 1 à 2 mm<sup>2</sup>. La boucle est placée en chaussée à 7cm 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).

A chaque passage d'un véhicule au-dessus de la boucle, la masse métallique en mouvement du véhicule perturbe le champ magnétique rayonnant, ce qui a pour effet de modifier le courant induit de la boucle et donc la fréquence du signal électrique émis. Ce décalage de fréquences est converti en tension à l'aide d'une boucle à verrouillage de phase. Ce dernier est souillée pour fournir un signal « tout ou rien » directement lié à la présence du véhicule. A l'aide de deux boucles inductives, il est possible de déduire la vitesse du véhicule ainsi que sa longueur. Des boucles plus étroites permettent de déduire la silhouette de chaque véhicule en détectant leurs essieux.



*Figure 2.1. Photographie d'une boucle électromagnétique*

**▪ Limites de fonctionnement**

Ce capteur est utilisé dans plus de 80 % des systèmes d'exploitation. Faible coût mais travaux de génie civil pouvant être important, bonne durée de vie selon la qualité de réglage...

Facteurs perturbant les détections : champs magnétiques, véhicules circulant à basse vitesse (inférieure à 5km/h), véhicules très proches les uns des autres et remorques, véhicule présentant une garde au sol importante, très petit gabarit de véhicules.

## ii. Les capteurs « magnétomètres » en chaussée

### ▪ Principe de fonctionnement

Ce capteur intrusif intègre de très petites selfs pouvant être réalisées sur des circuits imprimés de très petite taille. Il fonctionne grâce à une analyse de la variation du champ magnétique terrestre causée par le passage des véhicules (comme une boussole). Le signal délivré par le capteur est un signal électrique proportionnel aux variations du champ magnétique terrestre sur les 3 axes x, y et z. Une de ses particularités réside donc dans sa petite taille (quelques centimètres). De forme cylindrique en général, il est souvent posé en chaussée via un petit carottage à quelques centimètres en dessous de l'enrobé. Un seul capteur posé en milieu de voie permet de détecter la présence d'un véhicule. Tout comme pour les boucles inductives, plusieurs capteurs posés à plusieurs mètres d'intervalle sur le profil en long de la chaussée permettent de déduire d'autres natures de mesure (vitesses, etc.). Plusieurs capteurs posés suivant le profil en travers de la chaussée permettent de mesurer une « signature magnétique » de chaque véhicule. La liaison de ce type de capteur avec son point de collecte est réalisée en général en mode « sans fil » à l'aide d'une liaison radio très basse consommation. Par ailleurs, les mesures des magnétomètres sont également influencées par la température de chaussée. Cette influence est prise en compte dans le traitement des signaux électromagnétiques.

### ▪ Limites de fonctionnement

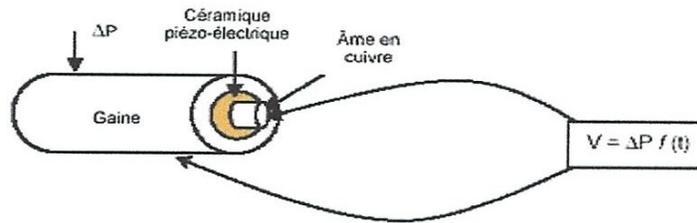
Facteurs perturbant les détections : champ magnétiques, véhicules circulant à basse vitesse (inférieure à 10km/h), véhicules très proches les uns des autres et remorques, véhicules non centrés dans la voie, véhicules présentant une garde au sol importante, véhicules de très petit gabarit.

## iii. Les capteurs à effet « Piézo-électrique »

### ▪ Principe de fonctionnement

Ces capteurs intrusifs présentent la propriété physique qu'ont certains matériaux diélectriques de générer une tension sous l'effet d'un déplacement de charges électriques lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique. Cette tension électrique  $U$  est proportionnelle à la pression exercée sur le capteur (grandeur que nous appellerons pression  $P$  par la suite). Trois types de capteurs sont utilisés aujourd'hui pour cette technologie : les capteurs céramiques, les capteurs quartz et les capteurs polymères. Le capteur piézo-électrique à base de céramique est très utilisé aujourd'hui dans le domaine du trafic routier. Ce capteur est conditionné sous la forme d'un câble coaxial comportant une gaine et une âme conductrice en cuivre. Ce câble est inséré de manière transverse dans la chaussée, il est enrobé dans un barreau de résine pour qu'il conserve sa rigidité, la tension électrique créée dans la céramique lorsque la force d'impact des pneus d'un véhicule lui est appliquée est mesurée entre l'âme et la gaine. L'effet piézo-électrique est observable également sur des matériaux autres que la céramique, et notamment sur les polymères à

l'aide de films de matière plastique à haute résistivité et le quartz qui possède cette propriété naturelle.



*Figure 2.2 Capteur piézo-électrique.*

#### ▪ Limites de fonctionnement

Facteurs perturbant les mesures : véhicules très proches les uns des autres (et remorques), véhicules mal positionnés dans la voie et très petit gabarit de véhicules présentant de faibles forces d'impact.

#### iv. Les capteurs à Tubes pneumatiques

##### ▪ Principe de fonctionnement

Il s'agit de capteurs faiblement intrusifs. 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 électro-pneumatique qui va les filtrer, les dater et les comptabiliser.



*Figure 2.3 : Capteurs à Tubes pneumatiques*

##### ▪ Limites de fonctionnement

Les tubes pneumatiques sont sensibles à l'arrachage si leur installation est d'une durée importante (plus de 2 mois). Ils ne sont pas recommandés pour les routes à chaussées

séparées et pour les axes présentant un trafic journalier tous véhicules supérieurs à 10 000 v/j. Un fort trafic lourd (> 30%) accélère également le vieillissement des tubes ou leur arrachage.

#### v. Les capteurs à « Jauges de contraintes »

##### ▪ Principe de fonctionnement

Ces capteurs intrusifs présentent la propriété physique qu'ont certains matériaux conducteurs de voir leur résistivité électrique varier lorsque qu'une pression leur est appliquée. Cette résistivité électrique est proportionnelle à la pression  $P$  exercée sur le capteur.

Utilisation des jauges de contraintes pour le pesage en marche des ponts instrumentés:

Les systèmes de pesage en marche par ponts instrumentés ont été développés à la fin des années 70 à l'université Case Western Reserve de Cleveland. Le système développé utilise des jauges de déformation (appelées aussi jauge de contrainte) sur les principaux éléments longitudinaux du pont. Les jauges sont placées à mi-portée sur les semelles inférieures des poutres selon un axe perpendiculaire à celui du pont. Les signaux de chaque jauge sont sommés pour obtenir le signal correspondant au moment fléchissant total du pont. Le principe de pesage en marche porte sur la résolution du problème inverse, c'est-à-dire que la réponse de la structure (le moment fléchissant) est mesurée et la charge ayant provoqué ce moment est calculée, en considérant que la vitesse du poids lourd reste constante. Le système fournit les mesures des charges aux essieux, la position latérale du poids lourds sur le pont, la silhouette du véhicule, sa vitesse et son accélération. Cette technique présente de nombreux avantages : il n'y a pas de capteurs installés sur la chaussée, l'installation et la maintenance du système sont possibles sous trafic et en sécurité, le système est non détectable par les chauffeurs de poids lourds, le coût de ces systèmes est avantageux en comparaison aux autres techniques de pesage en marche, la discrétion du système peut limiter le vandalisme.

##### ▪ Limites de fonctionnement

Fortes dynamiques de véhicules ou de chaussées.

#### vi. Les capteurs Résistifs

##### ▪ Principe de fonctionnement

Ces capteurs intrusifs sont basés sur le principe de la variation d'une mesure de résistivité électrique. Une pression exercée sur deux surfaces conductrices séparées par un composant diélectrique élastique provoque un rapprochement voire un contact faisant varier la résistivité.

L'application la plus connue est le tapis détecteur de piétons utilisé dans de nombreux domaines. Dans le domaine de l'exploitation de trafic, il trouve son usage en milieu urbain :

- Sur les passages piétons implantés en section courante et non équipés de feux ;
- Sur les carrefours équipés de feux, pour l'adaptation du « temps de vert piéton ».

## vii. Les capteurs à « Fibres optiques »

### ▪ Principe de fonctionnement

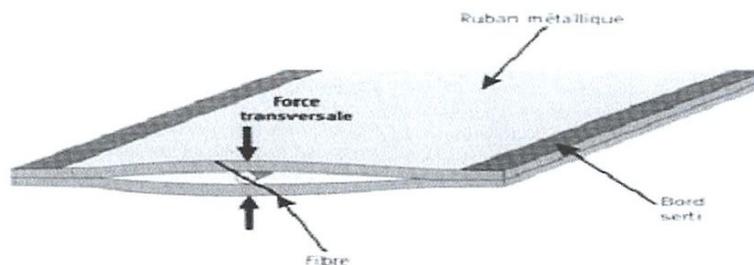
Les capteurs à fibre optique sont définis selon la norme NF C 93-800 (1991) : « Un capteur à fibre optique est un dispositif comprenant une ou plusieurs fibre(s), permettant de recueillir des informations représentatives de grandeurs mesurées sans autre apport d'énergie que celui des phénomènes observés 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 rétro-diffuse ce signal) avec une source et un détecteur côte à côte.



*Figure 2.4* : Système à fibre optique

### ▪ Limites de fonctionnement

Ces capteurs présentent des inconvénients résumés en pertes engendrées par la courbure de la fibre ; fragilité et coût des connecteurs et mesures par contact.

Par contre, ils possèdent les avantages suivants :

- une insensibilité aux perturbations électromagnétiques ;
- une isolation électrique entraînant une plus grande sécurité dans son fonctionnement et dans son installation ;
- un temps de réponse rapide ;

- un poids faible par rapport au cuivre notamment ;
- une large plage de mesures possibles ;
- une mesure pouvant être sans contact et sur une longue distance ;
- une absence d'alimentation au point de mesure ;

#### **b) Les capteurs non-intrusifs**

##### **i. Les capteurs hyper fréquences 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 réfléchiée 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 liées à la forme du véhicule et à sa surface de réflexion. La valeur de la SER (Surface Équivalente Radar exprimée en m<sup>2</sup>) 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.

###### **▪ Limites de fonctionnement**

Facteurs perturbant les détections : véhicules circulant à basse vitesse (inférieure à 20km/h), véhicules très proches les uns des autres, véhicules en forte accélération ou décélération, très petit gabarit de véhicules.

##### **ii. Les capteurs hyper fréquences utilisant deux antennes**

###### **▪ Principe de fonctionnement**

Système non-intrusif installé généralement en hauteur, face ou perpendiculairement aux voies de circulation. Un train d'ondes électromagnétiques pulsées est émis à une fréquence de l'ordre de 3 à 30 GHz (Super High Frequency ou SHL) par deux antennes radar. Au contact du véhicule, l'onde est réfléchiée et renvoyée modifiée vers le capteur.

Dans le cas d'un capteur utilisant deux faisceaux, de la même façon que les boucles électromagnétiques, les mesures se font par l'analyse des temps de présence et des temps de coupure entre des faisceaux (formant l'équivalent de deux barrières). En mesurant le temps de renvoi d'un train d'ondes pulsées, il est possible de mesurer une distance d'un véhicule coupant les faisceaux du radar pour indiquer sa voie de circulation.

###### **▪ Limites de fonctionnement**

Limites semblables aux capteurs n'utilisant qu'une seule antenne. Les essais de ce type de matériel montrent une forte similitude avec les stations à boucles électromagnétiques.

### iii. Les 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 mono point à faisceau conique ponctuel et les Lasers à faisceau asymétrique.

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.

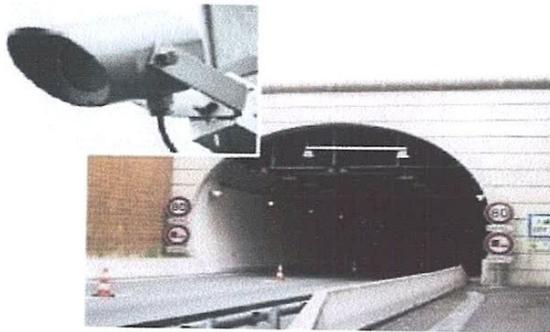


Figure 2.5 Capteur laser

#### ▪ Limites de fonctionnement

Les Lasers à balayage ou 1D ont une vitesse d'analyse limitée ( $< 1\text{kHz}$ ) qui bornent leurs précisions pour les véhicules « rapides », les Lasers mono point sont très sensibles à la pluie et leur faisceau « étroit » ne permet pas de détecter tous les véhicules (moto par exemple), les Lasers à faisceau asymétrique constituent un moyen de détection plus fiable et plus précis.

### iv. Les capteurs à Infra-Rouge 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 ( $0,8\mu\text{m} < \lambda < 3\mu\text{m}$ ).

- i. *Les capteurs IR passifs* : Ces capteurs sont composés de trois parties : un capteur pyroélectrique sensible au rayonnement infrarouge, une lentille de Fresnel - parfois associée à un miroir - chargée de faire converger les rayons sur le capteur, et une partie électronique dont le rôle est de traiter le signal issu du capteur. Cette technologie repose sur le fait, que tout corps porté à une température au dessus du zéro degré Kelvin dégage une énergie sous forme d'ondes électromagnétiques. Ainsi, le véhicule est un objet détectable puisqu'il émet une source de chaleur importante et notamment au niveau de son moteur et de son pot d'échappement. La cible est détectée lorsqu'elle émet une longueur d'onde incluse dans la plage de sensibilité du capteur. Ainsi, ce type de capteur permet la détection de présence de véhicules, et proposent des applications variées telles que le comptage et la régulation du trafic, et la commande de feux tricolores. Ces capteurs sont de type non-intrusif et, en fonction du besoin, sont installés en accotement ou en surplomb des voies de circulation.
- ii. *Les capteurs IR actifs* : Ces capteurs sont constitués d'une partie émettrice et d'une partie réceptrice. L'émetteur est une diode électroluminescente (DEL) qui émet un pinceau lumineux plus ou moins fin selon son application. Cet émetteur peut être un laser dont l'avantage est de pouvoir travailler dans un domaine proche du visible. En effet, le faisceau n'est pas visible pour l'utilisateur puisque sa longueur d'onde cible est dans l'IR, pourtant le phénomène de dispersion de cette longueur permet de distinguer, lors du réglage de l'alignement du capteur, une partie visible du faisceau de couleur rouge. De plus, la directivité du faisceau issu d'une DEL laser garantit une précision de mesure notamment pour la vitesse. Le capteur IR actif est utilisé selon trois modes de détection : Le mode vis-à-vis, le mode réflex et le mode de proximité. L'ensemble émetteur/récepteur est dissocié en deux modules en mode vis-à-vis, ou combiné dans un même boîtier en mode réflex (utilisation d'une surface réfléchissante) et en mode de proximité (réflexion du faisceau sur le véhicule). Cette technologie a plusieurs applications dans le domaine routier telles que la réalisation de barrières optiques, de télémètres, et de cinémomètres laser de contrôle routier.

#### ▪ 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.

### c) Les capteurs Vidéo

On distingue :

#### i. Les capteurs Vidéo visibles et infrarouges

##### ▪ Principe de fonctionnement

Le principe de base est de paramétrer sur l'image de la route des boucles virtuelles dont le comportement sera analogue aux boucles inductives (électromagnétiques) standards. A ceci près que ce n'est plus la masse métallique qui est détectée mais la présence de groupes de pixels. Afin d'améliorer les performances globales du système, d'autres techniques de traitement d'image sont appliquées afin d'éliminer le bruit dans l'image, mais surtout de déterminer les mouvements des groupes de pixels, d'extraire les contours des objets, les reconnaître et les classer via des processus de reconnaissance des formes. D'autres processus de traitement d'image comme l'extraction des ombres ou des halos et faisceau de phare viennent également renforcer la fiabilité de ses systèmes, spécialement pour le recueil de données précis par voie et le calcul de longueur de véhicule.

Les caméras utilisées pour l'acquisition des séquences d'images sont toutes matricielles. Dans le domaine visible, deux types de capteur sont utilisés, les CCD et les CMOS. De par leur nature, les capteurs CCD sont plus sensibles que les CMOS, mais ils sont aussi plus coûteux. Toutefois, le développement des applications vidéo et de la demande dans les capteurs rendent, de nos jours les capteurs CCD plus abordables tout en ayant bénéficié d'améliorations effaçant leurs défauts tels que la lecture séquentielle, ainsi, les fonctions de pilotage et de traitement sont plus facilement intégrables sur le support du capteur. De nos jours, les capteurs CCD permettent d'avoir des caméras HD en couleurs. Toutefois, ces caméras sont réservées au cas où il y aurait un éclairage minimal de la scène.

##### ▪ Limites de fonctionnement

Sensibilité aux conditions météorologiques (pluie, neige), aux illuminations fortes (soleil rasant) ou changeantes., aux masquages et occlusions (végétation, véhicules de grands gabarits), aux flous de bougé (occasionné par le support). Résultats dépendant de l'implantation, en bord de voie, terre plein central ou en surplomb. Nécessité de maintenance : nettoyage de la vitre du caisson de caméra. Dans le cas des PL, il n'y a pas de distinction entre un camion et un autocar. Il n'est également pas possible, à ce jour, de déterminer la catégorie de PL et/ou de compter le nombre d'essieux.

## ii. Les capteurs spécialisés dans la Lecture Automatique de Plaques d'Immatriculation (LAPI) visible et infrarouge

### ▪ Principe de fonctionnement

En règle générale, les systèmes de Lecture Automatique de Plaque d'Immatriculation (LAPI) utilisent, en cascade, deux techniques de traitements d'image: La détection d'objet pour repérer les plaques d'immatriculation potentielles suivi de la reconnaissance optique de caractère afin d'identifier les caractères alphanumériques de la plaque. Dans quelques cas, la LAPI est couplée à une phase de détection/reconnaissance de véhicule afin de renforcer les performances de la détection de plaques. Afin d'accélérer et d'améliorer les performances de la phase de détection des plaques, une technique courante est d'utiliser un apriori sur les zones potentielles de détection et de réduire la recherche, par l'analyse des localisations des détections précédentes, dans le cadre des caméras ayant une prise de vue large (plusieurs voies).

Les caméras utilisées pour l'acquisition des séquences d'images sont toutes matricielles. Dans le domaine visible, deux types de capteur sont utilisés, les CCD et les CMOS. Dans le cas où les caméras sont utilisées dans un environnement sombre, il est généralement choisi de travailler dans le domaine infrarouge non-visible. Les capteurs utilisés sont également de type CCD (mais sans filtre infra-rouge) et un illuminateur permet d'avoir une source de lumière infrarouge (non visible par l'œil humain) qui est diffusée sur la scène visée. C'est la réflexion des sources infrarouge qui permet de constituer une image en niveau de gris sur la caméra. Cette technique ne permet pas d'obtenir d'image couleur, mais permet de s'affranchir des conditions de luminosité par des réglages auto-adaptatifs. Dans la plupart des cas, ce sont des caméras en niveaux de gris couplées avec un illuminateur infrarouge qui sont utilisées. Toutefois, dans le cas de prises de vue orientées pour l'analyse de trafic, on commence à voir apparaître l'utilisation de caméras HD couleurs (voire jour/nuit) utilisées sans illuminateurs infrarouges.

Dans le cadre des dispositifs de LAPI, plusieurs solutions matérielles sont proposées :

- l'utilisation d'une caméra en champ proche, qui ne filme alors qu'une seule voie de circulation. Ceci permet d'avoir un capteur abordable et un traitement d'image facilité, mais impose d'avoir autant de capteurs que de voies de circulation.
- l'utilisation d'une caméra Haute Définition (HD) qui permet de filmer l'ensemble des voies. Ceci, même si le capteur utilisé est plus coûteux, permet de réduire les coûts globaux de maintenance et de mise en place.



*Figure 2.6 Lecteurs de plaque d'immatriculation installée sur portique (à droite) et mât temporaire (à gauche), à raison d'un lecteur par voie.*

#### ▪ Limites de fonctionnement

Sensibilité aux conditions météorologiques (pluie, neige), aux illuminations fortes (soleil rasant) ou changeantes., aux masquages et occlusions (végétation, véhicules de grands gabarits), aux flous de bougé (occasionné par le support). Résultats dépendant de l'implantation, en bord de voie, terre plein central ou en surplomb. Nécessité de maintenance : nettoyage de la vitre du caisson de caméra. Les performances sont liées à la qualité du couple capteur/traitements mais aussi aux paramétrages physiques du capteur (position de prise de vue, éloignement, ...) et aux paramétrages des algorithmes de détection (zone de recherche, ...) et de reconnaissance (seuils de contraste, ...).

### iii. Les capteurs spécialisés dans la Détection Automatique des Incidents (DAI)

#### ▪ Principe de fonctionnement

Certains ouvrages sont équipés d'installations de surveillance télévisées afin d'assurer un contrôle visuel permanent de l'état du trafic. Toutefois, l'opérateur ne peut pas concentrer simultanément son attention sur plusieurs moniteurs. Aussi, dans les années 90, les progrès de l'imagerie numérique ont permis le développement de systèmes de détection automatique d'incidents (DAI) par analyse vidéo. La mise en œuvre de cette fonctionnalité au niveau des postes de surveillance (notamment des tunnels) permet d'assister l'opérateur dans ses missions de contrôle des ouvrages en l'informant de l'apparition d'un événement pouvant être à l'origine d'une situation accidentogène tout en lui donnant l'enregistrement des instants précédant l'incident potentiel. Dans ces conditions, l'opérateur peut déclencher le scénario d'intervention le mieux adapté dans les délais les plus brefs. Le retour d'expérience montre que la DAI par traitement d'image en temps réel est le moyen de détection d'un incident en tunnel le plus performant. Pour les

ouvrages disposant d'une surveillance permanente, l'installation de ces systèmes est imposée par la circulaire 2000-63. Sur le reste du réseau, cet investissement est laissé à l'appréciation du gestionnaire.

Une installation de DAI par analyse d'image comporte : une ou plusieurs caméras, un analyseur traitant les images issues des caméras, un canal de transmission des signaux, un système d'alerte de l'opérateur avec un ou des moniteurs vidéo et enfin, selon le niveau de complexité et d'intégration, un affichage automatique ou supervisé de l'alerte à destination des usagers via panneaux à messages variables.

#### ▪ Limites de fonctionnement

Sensibilité aux conditions météorologiques (pluie, neige), aux illuminations fortes (soleil rasant) ou changeantes, aux masquages et occlusions (végétation, véhicules de grande gabarite), aux flous de bougé (occasionné par le support). Résultats dépendants de l'implantation, en bord de voie, terre plein central ou en surplomb. Nécessité de maintenance : nettoyage de la vitre du caisson de caméra. Les performances sont liées à la qualité du couple capteur/traitement mais aussi aux paramétrages physique du capteur (position de prise de vue, éloignement, ...) et aux paramétrages des algorithmes de détection (zone de recherche, ...) et de reconnaissance (seuils de contraste, ...). Nécessité d'avoir une illumination suffisante (source de lumière visible), donc par éclairage public, pour assurer de bonnes performances. Nécessité de pose en hauteur pour éviter les masquages. Nécessité de pose sur mât fixe lorsque la hauteur est de l'ordre de 12m. Utilisation d'un mât basculant possible pour hauteur inférieure, mais le bouger influence les performances. Lors des mouvements de la caméra PTZ, la DAI devient inactive pendant quelques minutes et retrouve ses performances dès que le système s'est auto-recalibré

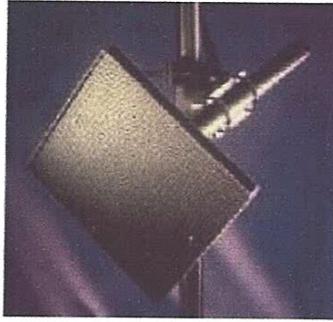
#### d) Les capteurs acoustiques

Parmi lesquelles, on trouve

##### i. Les capteurs acoustiques passifs (microphone)

#### ▪ Principe de fonctionnement

Ces capteurs détectent les bruits de roulement et / ou de moteur émis par les véhicules. Ces capteurs sont donc peu directifs, et ne peuvent servir que pour détecter la présence ou l'absence de véhicules sur une certaine zone de la chaussée. Il est possible d'avoir une mesure précise, par voie en utilisant un faisceau de capteurs situés à intervalles réguliers en bord de route et associés à un dispositif de traitement de signal relativement complexe. En conséquence, ce type de capteurs est peu utilisé dans l'exploitation courante du trafic. Leur utilisation est préférable en trafic fluide car les congestions créent une pollution sonore trop importante pour permettre une détection précise des véhicules. La classification VL/PL se fait par le volume sonore et l'analyse de la fréquence propre du véhicule. Certains capteurs de ce type sont utilisés en complément de la vidéo pour pallier les baisses de performances de nuit de ces derniers.



*Figure 2.7* Capteur acoustique passif

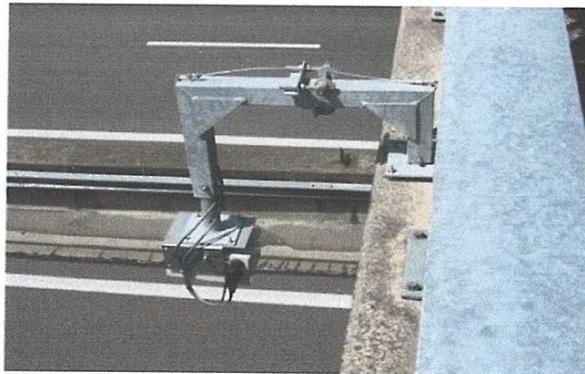
▪ **Limites de fonctionnement**

Fonctionne en trafic fluide, baisse de performance en congestion. Pas de mesure de vitesse. Uniquement de la présence de véhicule.

ii. **Les capteurs acoustiques actifs (à Ultrasons)**

▪ **Principe de fonctionnement**

Ces capteurs sont constitués de couples émetteurs / récepteurs à ultrasons (US) fonctionnant aux environs de 60 kHz, et placés au-dessus de la chaussée. L'émetteur envoie périodiquement un signal impulsionnel en direction de la chaussée. Ce signal est réfléchi par les véhicules ou par la chaussée vers le récepteur. Ainsi, l'analyse du temps de parcours entre l'émission et la réception permet de détecter la présence ou le passage d'un véhicule. Associé à un analyseur, il est alors possible de représenter la forme du véhicule ou plus exactement le profil en long de ce dernier (par échantillonnage de points) et par le même procédé de déterminer sa longueur. L'avantage de ce capteur est d'être non intrusif et d'avoir de bonnes performances, spécialement en congestion. Ils sont couramment utilisés au Japon.



*Figure 2.8* Capteur acoustiques actifs (à ultrasons)

### ▪ Limites de fonctionnement

Faibles précisions de la vitesse et du taux d'occupation. Non robuste aux conditions météo (brouillard et pluie) qui altèrent le fonctionnement et la précision. Ne fonctionne qu'en surplomb, nécessite un capteur par voie.

### iii. Les capteurs à « Couplage de technologies »

#### ▪ Principe de fonctionnement

Afin de pallier les imprécisions relatives et les limites des différentes technologies disponibles sur le marché,

Certains industriels ont décidé de créer des capteurs à couplage de technologie ou « multi technologies ». Ces capteurs permettent ainsi de combiner les avantages des différentes technologies et de pouvoir annihiler certains inconvénients de chacune d'entre elles. Les précisions et les fonctionnalités de ces capteurs sont ainsi nettement améliorées. On peut citer pour exemple la possibilité de mesurer des véhicules pour toute les classes de vitesses (y compris les basses vitesses 0-50km/h) en croisant des mesures de type hyperfréquence Doppler et acoustiques. Les premiers capteurs développés ont utilisé un couplage vidéo et infrarouge afin de pouvoir améliorer les performances de la vidéo de nuit. Désormais on observe jusqu'à quatre ou cinq technologies embarquées dans le même capteur.

#### ▪ Limites de fonctionnement

##### *Avantages*

- Meilleures performances et précisions
- Nature de mesures plus étendues
- Nouvelles fonctionnalités

##### *Inconvénients*

- Consommation en énergie plus élevée pour certains produits
- La tolérance aux pannes dépend de la technologie la moins fiable
- L'électronique de traitement de signal est plus complexe donc plus sensible et présente une maintenabilité plus faible

### e) Les 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...

#### ▪ 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.

### 2.4. Les nouvelles technologies de recueil de données de trafic routier

#### 2.4.1. Les Traceurs continus

Les véhicules traceurs sont des véhicules instrumentés stockant et/ou transférant à un opérateur des données de trafic. L'instrumentation peut être légère, un simple GPS, un téléphone portable ou encore un système de navigation peuvent suffire lorsque les données de vitesse et de positionnement permettent d'élaborer l'information souhaitée.

##### a) Localisation GNSS

#### ▪ Principe de fonctionnement

La puce ou récepteur GPS utilise le système de positionnement par satellites pour calculer sa position. La précision de la mesure de positionnement n'est pas suffisante pour localiser le véhicule au niveau de la voie de circulation. Pour localiser le véhicule sur le réseau, un algorithme est généralement utilisé. Pour améliorer la précision du positionnement, d'autres sources de données peuvent être utilisées par exemple l'odomètre et le gyromètre.

Les véhicules traceurs sont localisés, toutes les secondes en général, grâce au GNSS (GPS, GALILEO, GLONASS, BEIDOU) et les données sont récupérées, depuis un récepteur GPS et ce à intervalles réguliers, par l'intermédiaire d'un moyen de communication mobile (GSM, GPRS, UMTS, Wi-Fi etc.). Ces données sont ensuite filtrées et projetées sur le réseau routier (Map-Matching). Après le passage dans une plate-forme d'analyse, on peut avoir accès à des temps de parcours et vitesses moyennes des VT sur une section donnée. Le suivi de véhicules traceurs offre aussi la possibilité d'établir des Matrices O/D.

#### ▪ Limites de fonctionnement

Pas de distinction des voies (mais distinction de la chaussée empruntée), intégration d'un moyen de communication mobile (notion de coût et de fréquence d'envoi des données).

## b) Satellites

### ▪ Principe de fonctionnement

Des véhicules possédant un moyen de communication par satellite sont suivis sur le réseau routier par un ou plusieurs satellites. A la différence de la localisation GNSS, les données de positionnement sont renvoyées au(x) satellite(s). Les données trafic, transitant par le centre de contrôle des satellites, sont ensuite envoyées au serveur FCD central. Les positions horodatées obtenues par le suivi des véhicules permettent d'obtenir des temps de parcours et des vitesses moyennes.

### ▪ Limites de fonctionnement

Taux d'équipement en moyen de communication par satellites.

## c) Les communautés d'utilisateurs

### ▪ Principe de fonctionnement

Produire des informations sur le trafic à partir des communautés d'utilisateurs d'un service d'information trafic consiste à utiliser l'utilisateur lui-même comme source d'information trafic. Le terme anglais pour ce principe de fonctionnement est « crowdsourcing » littéralement « approvisionnement par la foule ». Il existe déjà en France et à l'étranger des offres se basant sur ce procédé pour fournir de l'information trafic. L'instrumentation est simple (équipement de navigation personnel (PND, « Personal Navigation Device), Smartphone) et permet de recueillir des données de positionnement, de vitesse et de sens de déplacement.

### ▪ Limites de fonctionnement

Taux de véhicules instrumentés, qualité de la donnée fournie.

## d) Les « Floating Mobile Data »

### ▪ Principe de fonctionnement

Le Floating Mobile Data ou plus exactement les données FMD, sont des données issues des réseaux des opérateurs de téléphonie mobile et permettant de recueillir des informations utiles pour la connaissance et la gestion du trafic comme par exemple la localisation, la vitesse et le sens de déplacement. Après exploitation, des données FMD peuvent donner des informations sur la localisation, le sens de déplacement du véhicule traceur, les temps de parcours. Chaque opérateur a sa façon de recueillir des données FMD dont le recueil par événements de handover (positions, sens de déplacement). En effet, chaque mobile communicant en permanence avec sa station de base, elle-même associée à une cellule du réseau GSM, on peut localiser le mobile dans cette cellule (« cell-id », identification de la cellule). Les antennes relais étant généralement trisectorisées (3 fois 120 degrés), on peut restreindre la localisation à une zone de la cellule.

---

---

- **Limites de fonctionnement**

Précision (faible), disponibilité des mobiles (mobiles en communication et sur la route), risque de saturation du réseau mobile à certaines périodes de l'année, pas de distinction des voies de circulation

#### 2.4.2 - Traceurs points à points

Contrairement aux Traceurs continus, les Traceurs points à points permettent d'acquérir des données FCD seulement au niveau de relais sur le terrain. C'est un mode de recueil dit passif.

##### a) Le RFID : infrastructures de péage

- **Principe de fonctionnement**

Dans le but d'atténuer les congestions à l'entrée des péages, les sociétés d'autoroute ont équipé leurs péages de bornes RFID ou DSRC capables de communiquer avec un appareil RFID/DSRC (badge, téléphone) à l'intérieur du véhicule. C'est le principe du télépéage (ElectronicToll Collection).

Aussi, des portiques RFID/DSRC peuvent être installés le long des voies. Ainsi il devient possible d'associer un véhicule à un identifiant RFID/DSRC anonymisé et chaque véhicule équipé devient alors une sonde de trafic sur le réseau emprunté.

Les transactions de péage étant datées et localisées à l'entrée, le long et à la sortie de l'autoroute, on peut avoir accès à des temps de parcours et, donc, des vitesses moyennes, et aux débits en se basant sur le pourcentage d'utilisateurs du télépéage.

- **Limites de fonctionnement**

Taux d'équipement des usagers en badges, téléphones RFID/DSRC, coût d'installation et d'exploitation, continuité de la mesure (arrêts sur l'autoroute, interférences), qualité de lecture à haute vitesse, certains badges étrangers émettant à une puissance plus élevée peuvent endommager les lecteurs Français (notamment les badges Espagnols).

##### b) La localisation GSM

- **Principe de fonctionnement**

Le GSM, Global System for Mobile Communications, est la norme numérique pour la téléphonie mobile. Cette norme utilise la gamme de fréquences des 900 MHz. Un dérivé du GSM, le DCS, Digital Communication System, utilise la gamme des 1800 MHz.

Le GSM 900 utilise la bande 890-915 MHz pour l'envoi des données et la bande 935-960 MHz pour la réception des informations. Quant au GSM 1800, il utilise la bande 1710-1785 MHz pour l'envoi des données et la bande 1805-1880 MHz pour la réception des informations

- **Limites de fonctionnement**

En interurbain, le nombre d'antennes ne permet pas la triangulation précise.

**c) Positionnement par bornes Wifi (WPS)**

- **Principe de fonctionnement**

Le WPS (WiFipositionning System) permet de se positionner grâce aux bornes d'accès WiFi (hotspots) de plus en plus répandues en milieu urbain et notamment dans tous les lieux publics. Cette technique permet de pallier les défauts de positionnement relatifs au GPS en milieu urbain, d'avoir une couverture intéressante au niveau des villes et d'être complètement gratuit.

Après identification par ces bornes d'accès WiFi, il est donc possible de localiser ces terminaux Wi-Fi avec une précision inférieure à 50 mètres. A partir de ces positions horodatées, il est possible d'estimer la vitesse moyenne et le temps de parcours d'un véhicule équipé.

- **Limites de fonctionnement**

Utilisation en milieu urbain, zone couverte par les bornes WiFi

## **2.5. Les systèmes coopératifs et recueil de données**

Les technologies de recueil de données de trafic présentées précédemment et se fondant sur les communautés d'utilisateurs, les satellites et véhicules traceurs ou encore les FloatingMobile Data, font partie intégrante des systèmes coopératifs. Ils constituent la partie mûre des systèmes coopératifs, et font partie des solutions proposées et développées. Sans nul doute, ils feront partie de l'architecture globale des systèmes coopératifs qui tend à se mettre en place afin d'assurer une interopérabilité des systèmes. Cette architecture est portée par le Mandat M453 de la Commission Européenne.

Par le terme de systèmes autonomes, on désigne les véhicules équipés de leurs assistance à la conduite. On peut également assimiler comme système autonome la chaîne composée de l'infrastructure routière, ses capteurs, le CIGT et les dispositifs d'information

Par le terme de systèmes coopératifs, on désigne, au sens des définitions utilisées dans les comités de normalisation et projets européens (ainsi qu'internationaux), l'interopérabilité des systèmes autonomes précédents afin de pouvoir réaliser, en temps réel des échanges d'informations via cinq types de communications :

- Véhicules – Véhicules (V2V)
- Véhicules – Infrastructure (V2I) et Infrastructure – Véhicules (I2V)
- Infrastructure – Infrastructure (I2I).

## **2.6 Mesures disponibles**

Ces capteurs sont généralement des éléments transducteurs, sensibles à la grandeur physique que l'on veut saisir : présence, passage, vitesse d'un véhicule,.... Le capteur

traduit l'information en un signal élémentaire, transmis au détecteur. Le signal reçu est transformé en une information électrique simple, significative du paramètre de circulation. 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	%
$V_{moy}$	vitesse moyenne	km/h

*Tableau 2.1* Notations et Unités des données de trafic.

Les capteurs	Mesures disponibles															
	Q	V	L	silhouettes	T de présence	TO	T et DIV	poids à l'essieu	distance cap/véh	dét de piétons	débit (v1/pl)	T de parcoure	matrice o/d	sens de dépl	Vmoy	Det de congestion
boucles inductives	x	x	X	x	x	x	X									
magnétomètres	x	x	X	x	x	x	X									
Piézo-électrique	x	x		x			X	x								
pneumatiques	x	x														
jauges de contraintes	x	x	X	x	x	x	X	x	x							
fbre optique	x	x	X	x	x	x	X		x							
Hyperfréquence Utilisant l'effet doppler	x	x	X								x					
hyperfréquence utilisant deux antennes	x	x	X	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							
vidéo visibles et IR	x	x	X			x	X			x						
spécialisés dans la (lapi) visibles et IR	x	x				x	X			x	x			x		
acoustiques passifs (microphone)	x	x									x					
acoustiques actifs (à ultrason)	x	x	X	x	x	x	X		x							
Résistifs					x					x						
Spécialisés dans la (DAI)									x	x		x				x
Couplage de technologie	x	x	X	x	x	x	X									
Embarques												x	x	x	x	x
Localisation GNSS												x	x	x	x	x
Satellites												x		x	x	x
commuautés d'usagers												x			x	
FMD		x										x			x	x
capture d'adresses plutooth												x	x	x	x	
RFID:infrastructure de péage												x			x	
localisation GSM												x		x		
positionnement par borne WIFI WPS)												x		x	x	

Tableau 2.2 Mesures disponibles par les différents capteurs.

## 2.7 Conclusion

Le domaine des transports, et plus singulièrement celui de la circulation routière, est l'objet d'innovations permanentes, tant sur le plan de la conception de modèles que sur le plan technologique. Les moyens de recueil de donnée du trafic ont ainsi bénéficié de cette dynamique favorisant l'amélioration des moyens techniques existants avec parfois l'apparition de nouveaux capteurs ou de nouvelles architectures. Cependant, dans le cadre de l'exploitation du trafic, un système de recueil de donnée, aussi évolué soit-il, ne permet pas de fournir les indicateurs nécessaires aux missions d'exploitation et d'information des usagers.

---

## Chapitre 03 Application et résultats

3.1. Introduction

3.2. Statistiques routière en Algérie

3.3. Choix de site

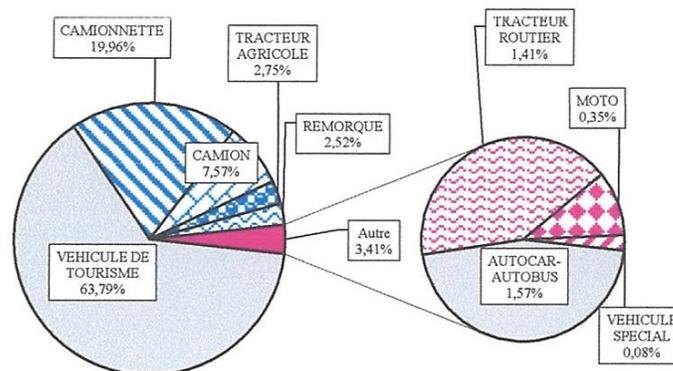
3.4. Application

3.5 Conclusion

---

### 3.1. Introduction

En Algérie, le parc national d'automobile a connu, ces dernières années, une très forte croissance (plus de 10% par an) qui s'élève à plus de 6.367.876 véhicules dont 63,79% sont des véhicules particuliers (VP) alors qu' en 2003, ce nombre ne dépasse pas quatre millions ce qui explique l'accroissement des demandes en circulation routière ; environ 85% des déplacements de personnes s'effectuent par voie routière et 90% du volume des échanges (transport intérieur de marchandises hors transit) sont assurés par le transport routier et par conséquent une augmentation du taux de consommation en carburant équivaut à 25% de la production d'énergie annuelle du pays [41].



*Figure 3.1 : Répartition du parc national d'automobile selon les principaux genres au 31/12/2012 d'après l'office national des statistiques.*

Les premiers efforts de recherche dans domaine de l'ingénierie du trafic ont été initiés dans la planification, dynamiques d'urbanisation, la mobilité et transports et le développement durable dont la majorité des recherches ont été menés sur l'étude des grandes agglomérations et en particulier l'agglomération algéroise

Cependant les études de connaissances et d'analyse technique du trafic n'ont attiré que récemment l'intention de la communauté scientifique et les recherches sont à leur début.

Cette thématique vise à estimer les caractéristiques du réseau : débits, vitesse, densité, ... ainsi que le niveau de congestion à partir d'un recueil de données. Cette connaissance et le suivi du niveau de la congestion permettent ensuite d'envisager des actions de régulation, d'aménagements de voirie, voire de gestion du réseau urbain.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail, il s'intéresse dans cette première démarche à l'utilisation d'un capteur vidéo pour étudier le comportement du trafic à partir d'une analyse de ses paramètres.

### 3.2. Statistiques routière en Algérie

En Algérie, le seul organisme officiel qui dispose des données du parc véhicule national est l'office National des Statistiques(ONS). Cet organisme est chargé de la collecte, du traitement et de la publication des données du parc annuellement. Cependant, le traitement des données du parc n'est pas basé sur une analyse technique du parc mais sur des statistiques. L'ONS n'étant pas un organisme spécialisé dans le transport, il collecte et synthétise les données pour les mettre à la disposition des utilisateurs conformément à ses missions. Les données sont traitées telles que reçues de la part de ses sources primaires en provenance des 48 wilayas et des douanes algériennes. Devant cette source unique de donnée relative au parc automobile et les nombreuses anomalies observées lors de l'analyse du parc et de son évolution dans le temps, il est devenu impératif de développer une méthodologie pour les besoins de la recherche scientifique sur les transports routiers.

#### a. Statistiques de la ville de Guelma

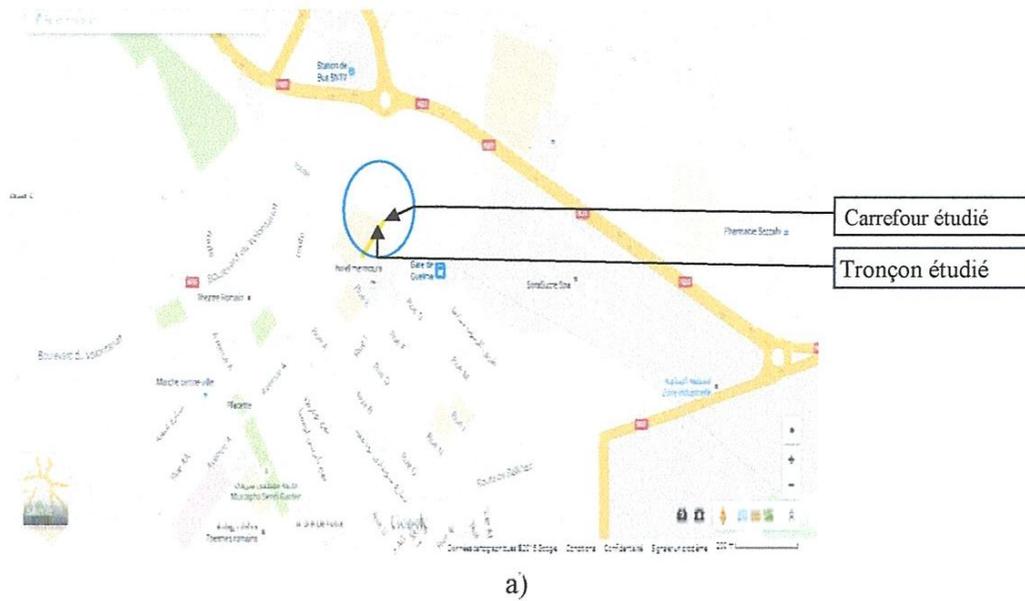
A partir de simples observations de la ville de Guelma, on constate une augmentation considérable de motorisation, le tableau suivant présent les dernières statistiques selon L'ONS :

Année de mise en circulation	Avant 2000	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2012	2013	total	%
Nombre de véhicules	22957	137	127	507	1210	1508	1323	1950	2673	1345	1726	1845	3876	2062	46328	0.9

*Tableau3.1 : Evolution du parc automobile par année de mise en circulation de la ville de Guelma.*

### 3.3. Choix de site

Notre étude porte sur le carrefour Sindibad (ASWAK Elhadaik, anciennement appelé) et plus particulièrement l'intersection entre l'avenue A et la Rue Abane Ramdane.



**Figure 3.2 :** Vue aérienne de la zone d'étude de la ville de Guelma

Sur l'avenue A site l'hôtel mermoura, l'agence djezzy, l'assurance CAAT, deux stations de service, école primaire et moyenne. Cette avenue est un axe principale de passage du centre-ville de Guelma vers la sortie de la ville à travers le rond-point liant les routes principale vers Annaba, Souk-Ahras ainsi que Constantine et Skikda. Elle se situe à la rencontre de plusieurs ruelles (branchements) déterminant des voies d'entrée et de sortie. Elle est caractérisée par deux voies et équipée par plusieurs feux de signalisation dont seulement un qui est opérationnel ce qui provoque souvent des phénomènes de congestion rendant la circulation de plus en plus lente et même difficile au cours de la journée.

### 3.4. Application

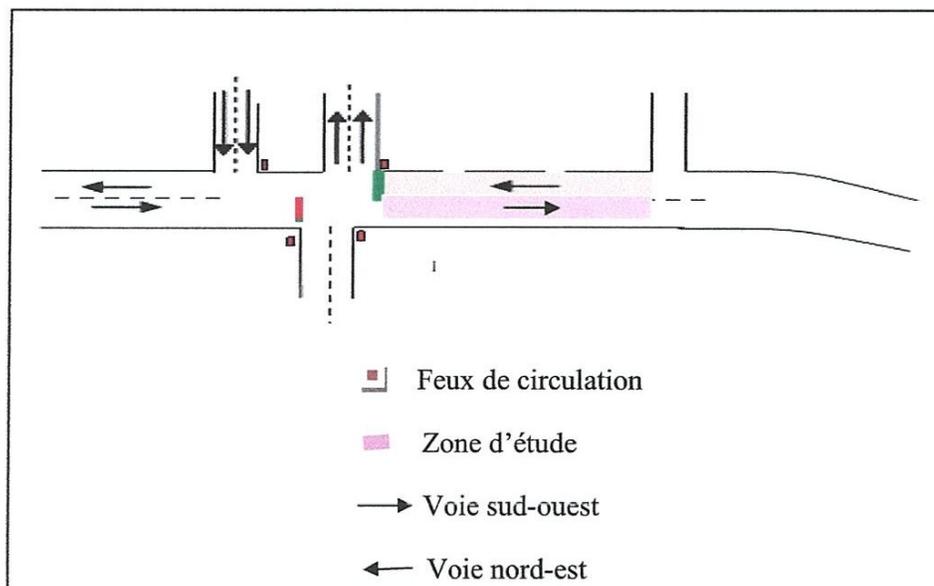
La problématique de ce mémoire concerne une étude préliminaire portant sur la détermination des indicateurs de trafic. Les données disponibles permettent pour le moment la mesure de quelques paramètres du trafic. Cette étude s'est déroulée en quatre phases distinctes :

- Mise en place du matériel,
- Expérimentation en circulation,
- Constitution d'une première base de données de circulation de la ville de Guelma
- Traitement et analyse des données de trafic.

#### 3.4.1. Description de la Zone d'Etude

Les principaux axes routiers de la ville de Guelma, tels les boulevards Soudai Boudjemaa, 1<sup>er</sup> 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 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 une section de l'avenue A de la ville de Guelma. Cette avenue dessert l'agglomération Guelmoise depuis le centre-ville (Sud-est), vers la sortie et (sud-ouest), la entrée de la ville à travers le rond-point liant les routes principales vers Annaba, Souk-Ahras ainsi que Constantine et Skikda. Elle se situe à la rencontre de plusieurs ruelles (branchements) déterminant des accès d'entrée et de sortie et équipée par plusieurs feux de signalisation. Cette infrastructure subit de fortes pointes de trafic qui génèrent plusieurs problèmes recirculations : bouchon files de circulation, rendant la circulation de plus en plus lente et même difficile au cours de la journée (Fig. 3.4).



*Figure 3.3 : Présentation de la zone d'étude*

### 3.4.2. Présentations et Discussions Des Résultats

Le recueil de données en temps différé permet de disposer d'une vue des trafics moyens sur nos routes et mesurer les évolutions de la circulation. Des enregistrements vidéo ont été réalisés entre 14 avril 2014 jusqu'au 13 mai 2014 ; environ 12 scènes par jour de durée chacune une heure équivalent à 53 cycles. Sachant que la capacité du tronçon est de 24 véhicules et la durée du cycle est de 66s avec 28s la durée du vert.

Les mesures étudiées sont uniquement celles qui concernent les usagers des véhicules particulière. Elles se présentent sous la forme de débits horaires mesurés tous les quarts d'heure. Les journées du 06 au 12 mai 2014 seront utilisées pour les Illustrations.

La figure (3.4) montre un comportement quasi stable du trafic après une phase transitoire présentant ainsi une montée en charge rapide du trafic traduisant un phénomène de congestion qui s'établit aux heures de pointes.

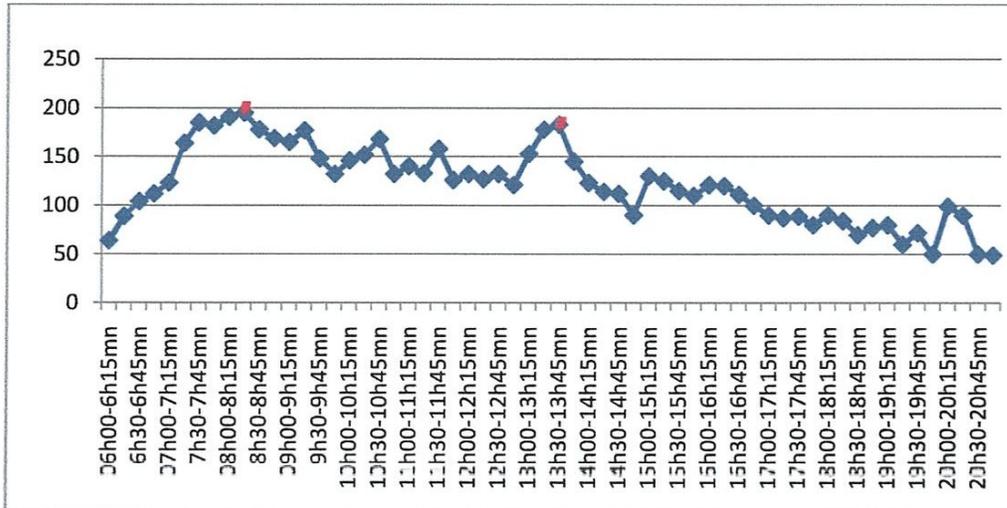


Figure. 3.4 : Débit horaire du tronçon (7 Mai 2014)

Les Heures de Pointe du Matin (HPM) et du Soir (HPS) ont été extraites de la base avec les définitions suivantes :

- HPM : heure où la moyenne des débits est maximale

(9h15mn-9h30mn),

- HPS : heure où la moyenne des débits est maximale

(13h15mn-13h30mn)

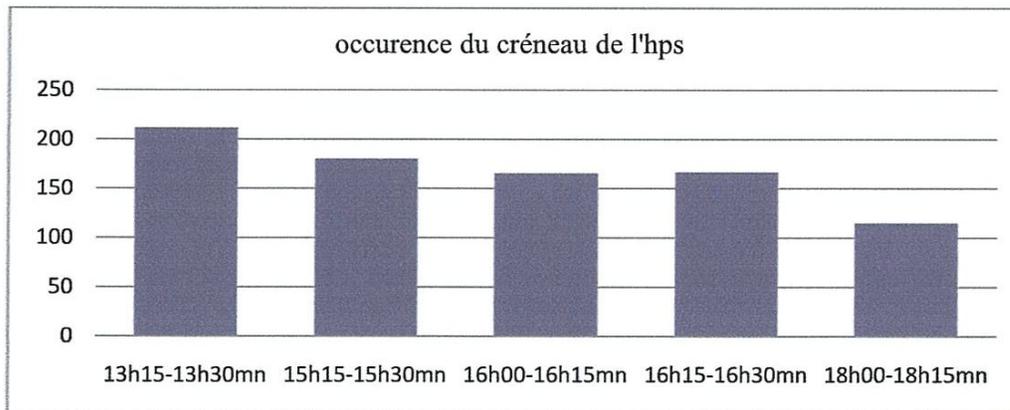
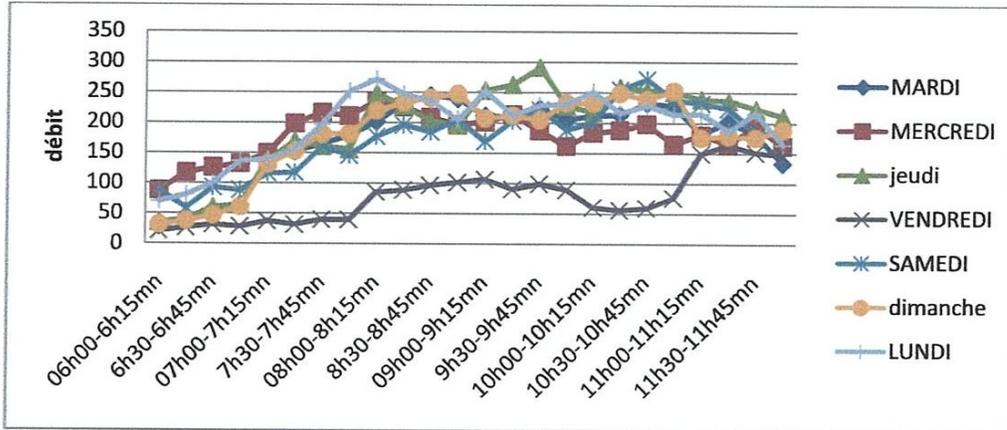


Figure.3.5 : Variabilité de l'HPS (7Mai2014) (voie sud-ouest)

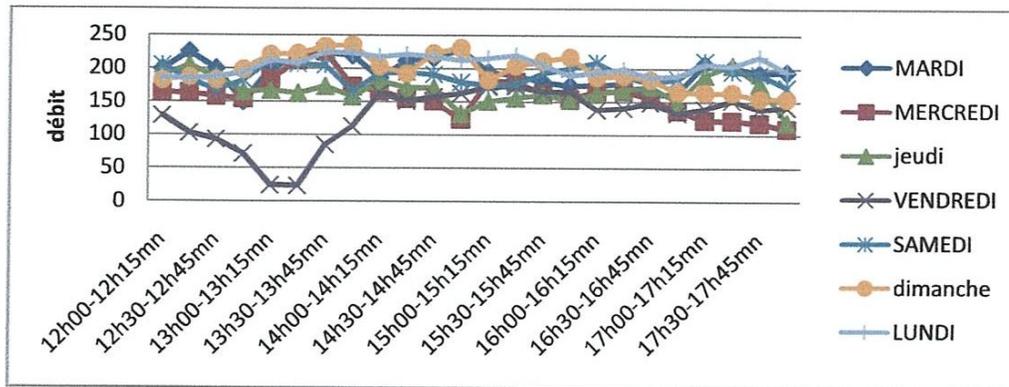
Avant de chercher à réduire la congestion voire améliorer la gestion du trafic, il convient donc de faire une analyse un peu plus globale et notamment d'observer l'évolution de la circulation sur une période suffisante. Comme première étape, nous cherchons essentiellement à identifier l'état du trafic pendant une semaine

L'étude est réalisée pour trois pics différents HPM, HPS et celui du midi. Il est à noter que le choix de ce pic dépend de plusieurs facteurs; de la position de la zone d'étude qui se trouve à proximité d'une école et aussi du mode de vie de la région qui connaît une activité importante durant cette période de la journée.

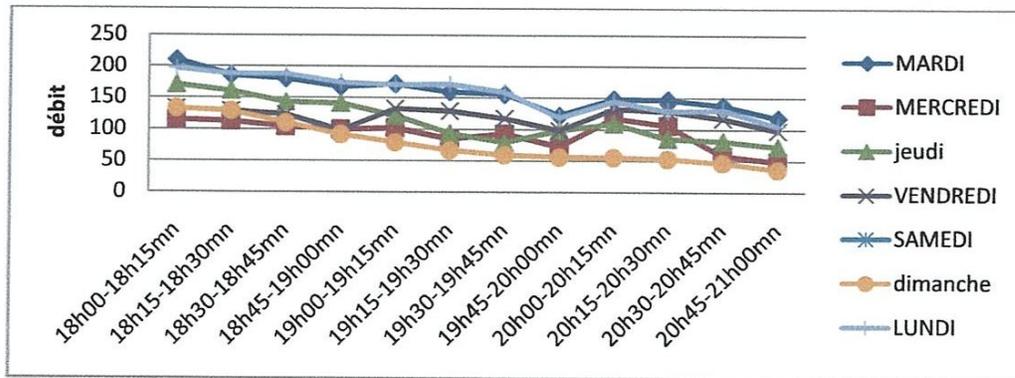
1. voie sud-ouest



a)

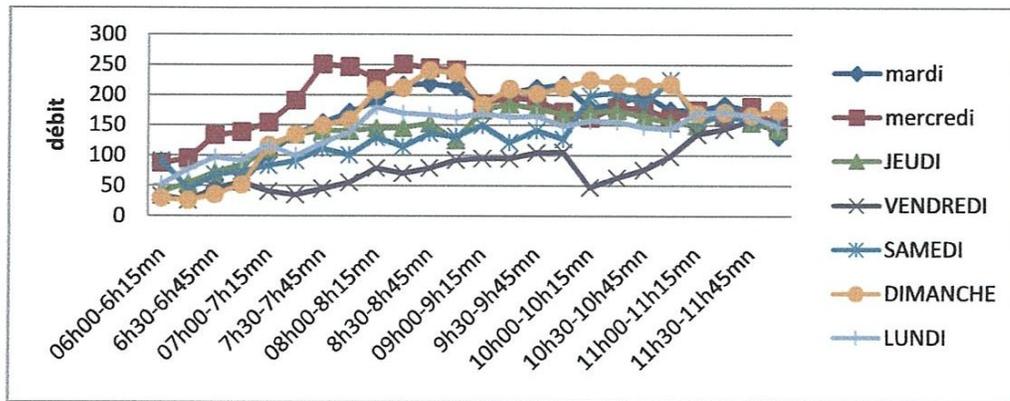


b)

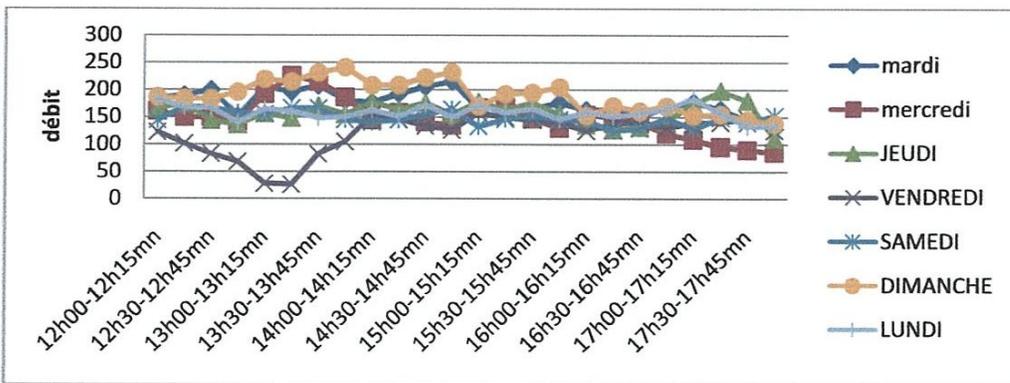


c)

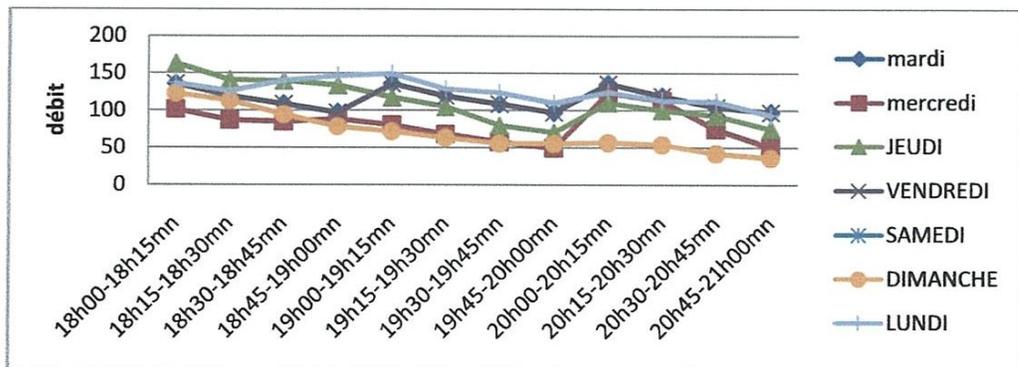
2. voie nord-est



a)



b)

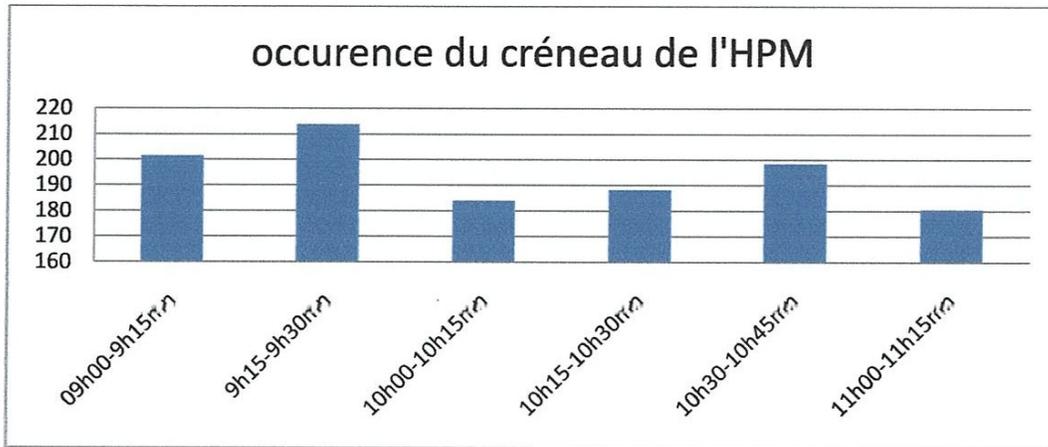


c)

**Figure.3.6** : Débit horaire pour les différentes heures de pointe (06-12 Mai 2014)

A l'exception du weekend (Vendredi et Samedi), l'évolution du trafic pour les trois périodes choisies présentent presque la même allure avec une dynamique stable.

La circulation automobile sur le tronçon pour les jours ouvrables est plus faible le lundi, le mardi étant la journée la plus chargée .



*Figure 3.7 : Variabilité de l'HPM moyen (7/5/2014)*

Les mesures effectuées montrent une forte variabilité des heures de pointe par rapport à celle du soir. La figure (3.8) représente une image du comportement de trafic et identifie avec précision les heures de pointe les plus fréquentes du matin.

#### Débit moyen, débit moyen HPM et débit moyen HPS

jours	voie sud -ouest			voie nord-est		
	débit moyen	débit moyen HPM	débit moyen HPS	débit moyen	débit moyen HPM	débit moyen HPS
mardi	179.26	228.1	206.58	160.25	213.53	185.81
mercredi	153.75	204.67	172.49	148	204.58	167
jeudi	166.77	244.78	178.58	140.95	172.22	169.23
vendredi	106.78	121.11	158.05	102.8	133.66	173.11
samedi	182.57	206.62	202.98	140.09	161.42	157.96
démanche	165.28	238.26	221.84	155.78	224.68	204.09
lundi	191.61	239.42	206.51	144.61	166.7	163.82

*Tableau3.2 : Débit moyen et Débit moyen (HPM, HPS)*

Dans ce tableau, nous avons remarqué que sur la voie sud – ouest, le plus grand débit moyen se trouve le lundi. Le débit moyen le plus faible se trouve le vendredi parce que c'est le jour de prière et à même la fin de semaine. Et pour la voie nord – est, le faible débit moyen, c'est toujours le vendredi pour les mêmes raisons que l'autre voie, et le plus grand débit moyen, c'est le dimanche à cause de la reprise du travail, la rentrée scolaire etc.

**Facteur de pointe**

JOURS	voie sud -ouest	voie nord-est
mardi	1.17	1.32
mercredi	1.41	1.62
jeudi	1.25	1.20
vendredi	1.95	1.52
samedi	1.42	1.45
dimanche	1.44	1.80
lundi	1.25	1.16

Tableau3.3 : Facteur de pointe

Le facteur de pointe le plus élevé sur la voie sud – ouest se trouve le vendredi et pour la voie nord – est c’est le dimanche.

**Pourcentage de poids lourds**

heure	mardi		mercredi		jeudi		vendredi		samedi		dimanche		lundi	
	Nord-est	Sud-ouest												
6h	7.61	1.48	5.08	8.79	1.25	4.68	1.35	2.1	6.62	5.12	2.5	1.74	6.43	5.77
7h	8.39	8.62	6.37	10.83	2.09	7.76	4.9	3.16	9.74	7.44	9.5	8.12	9.42	9.06
8h	8	9.84	6.48	11.75	5.24	8.38	9.98	6.96	9.74	8.51	8.58	8.73	9.68	9.85
9h	8.86	8.88	7.24	10.02	6.7	9.12	5.92	7.12	7.87	7.02	8.25	8.82	7.79	9.28
10h	6.86	8.53	6.91	8.07	7.54	6.8	4.41	3.79	9.19	9.75	9	8.7	6.91	7.02
11h	6.2	6.88	7.27	7.87	6.49	6.41	10	9.65	7.48	6.75	7.08	7.07	7.83	7.1
12h	7.22	7.66	6.48	8.38	7.75	5.67	9.92	7.27	7.79	5.66	7.41	8.12	7.92	7.2
13h	8.47	8.44	6.81	6.93	8.8	9.49	7.95	4.79	9.11	5.5	8.91	9.43	8.02	7.6
14h	8.39	8.79	8.21	7.66	6.28	10.41	4.39	8.06	8.57	6.01	8.5	9.25	8.62	7.5
15h	7.77	7.31	10.41	7.56	7.12	7.15	8.81	8.86	7.79	6.22	7.66	8.47	7.48	6.79
16h	6.67	7.57	9.18	7.36	8.17	8.87	9.91	8.38	7.32	6.33	6.16	6.02	7.16	4.98
17h	7.92	5.56	6.59	4.96	9.01	12.02	10.11	9.65	6.12	5.82	4.66	4.45	7.2	2.73
18h	6.35	4.61	5.83	2.42	6.2	8.63	9.4	7.41			2.66	2.53	5.64	1.2
19h	3.53	3.74	4.57	2.11	5.19	6.42	8.12	5.53			1.41	2.02	3.11	0
20h	2.66	2	2.27	2.02	5.24	4.55	2.3	3.95			1.32	1.22	2.02	0

Tableau 3.4 : pourcentage de poids lourds

---

Valeur maximal	12.02 %
Valeur minimal	0 %

Le pourcentage de poids lourds est compris entre 0 à 12%. Et le plus grand de pourcentage, on le trouve le jeudi dans les environ de 17h sur la voie sud – ouest. Et aussi sur cette même voie, qu'on trouve le plus bas de pourcentage, le lundi vers le 19h.

### 3.5 Conclusion

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés au fonctionnement du réseau urbain et aux mesures dites dynamiques de régulation. La mémoire présente une étude préliminaire sur l'analyse du trafic dont l'objectif est d'estimer les caractéristiques urbaines d'un tronçon dans une ville à moyenne agglomération. A Noter que ce travail est mené sur deux voie de la zone d'étude (sens sortant (nord-est), sens entrant (sud-ouest)). L'analyse de la circulation confirme le volume important des véhicules légers sur la section surtout dans les heures de pointe ce qui explique l'augmentation des situations de congestion.

Pour évaluer l'intensité exacte de la circulation, il serait important d'élargir cette analyse sur une période plus longue afin de déterminer tous les indicateurs correspondants pour une bonne gestion du trafic.

Pour obtenir un portrait complet de la circulation, les débits de poids lourds et de la motorisation à deux roues ne peuvent pas passé sous silence. En effet les véhicules lourds sont une composante majeure de la circulation avec l'absence d'autres moyens de transports (métro, tramway,...) et leur impact est plus important sur le comportement du trafic.

## Conclusion générale

---

Les éléments qui précèdent montrent les limites des méthodes exposées dans ce mémoire et circonscrivent assez bien leur champ d'utilisation : l'analyse de la congestion et la réalisation d'un certain nombre de calculs simples et approximatifs sur les temps d'attente, temps de parcours, longueurs de files d'attente, etc. Dans certains cas, ces calculs servent de préliminaires à des études plus poussées faisant appel à des outils plus complexes comme des logiciels de simulation ; ils permettent dans ce cadre de donner des premiers ordres de grandeur, ou de tester rapidement de multiples scénarios ou hypothèses afin de choisir ceux qui méritent un approfondissement. Dans d'autres cas, les calculs simplifiés peuvent suffire à préparer la mise en œuvre de mesures opérationnelles : calculer les conséquences d'une restriction de capacité liée à des travaux prévus, déterminer rapidement les conséquences d'un incident en cours, analyser un délestage...

Dans tous ces cas, et à condition que la limite de leur pertinence ne soit jamais perdue de vue, la simplicité des outils jointe à la possibilité de travailler avec des données elles-mêmes simples (données horaires, estimations...) fait de l'ensemble des méthodes exposées dans ce mémoire un outil efficace au service de l'exploitation du trafic.

---

# Bibliographie

---

## Bibliographie

---

- [1] **Espié S**, « *Approche multi-acteur dans la simulation de trafic automobile* ».In **Organisation et applications des SMA**. Chapitre 10. Mandiau, Grislin-Le Strugeon et Péninou (Eds.), Paris: Hermès. 2000.
- [2] Dictionnaire Hachette langue française. Hachette Educ (Eds.), 2003.
- [3] **Christine Buisson et Jean-Baptiste Lesort**, « *Comprendre le trafic routier Méthodes et calculs* », Édition du certu, paris, 2010.
- [4] **C.Buisson**, « *Analyse bibliographique et première classification des Algorithmes De simulation de l'écoulement du trafic routier* ». Recherche Transports Sécurité, Vol.53:35–48, 1996.
- [5] **A. Hegyi**, « *Model Predictive Control for Integrating Traffic control measure* ». TRAIL Thesis Series T2004/2, the Netherlands TRAIL Research School.2004.
- [6] **S. P. Hoogendoorn and P. H. L. Bovy**, « *State-of-the-art of vehicular traffic flow Modelling* » Journal of System and Control Engineering, Vol. 215, No. 4:283– 303, 2001.
- [7] **D.C.Gazis**, « *The origins of traffic theory* ». Operations Research, Vol. 50, Issue 1:69– 77, 2002.
- [8] **G. Costeseque**, « *Modélisation du trafic routier : passage du microscopique au Macroscopique* ». Master's thesis, Chaire abertis-Ecole des Ponts Paris Tech- IFSTTAR, 2012.
- [9] **S. Chanut**, « *Modélisation dynamique macroscopique de l'écoulement d'un trafic routier hétérogène poids lourds et véhicules légers* ». PhD thesis, École doctorale mécanique, énergétique, génie civil et acoustique (MEGA), 2005.
- [10] **S.Mammar**, « *Systèmes de transport intelligents : modélisation, Information et contrôle* ». Hermes Science - Lavoisier, 2007.
- [11] **Aimsun 6.1 - Users Manual**. TSS - *Transport Simulation Systems*, 2010.
- [12] **VISSIM 5.40 - User Manual**. PTV *Planning Transport Verkehr AG*, 2011.
- [13] **A. Kesting, M. Treiber, and D. Helbing**, « *General lane-changing model mobil for carfollowing models* ». Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1999(1):86–94, 2007.
- [14] **Emmanuel. B**, « *Modélisation dynamique de l'écoulement du trafic routier : du macroscopique au microscopique* ». Thèse doctorat, École doctorale MEGA, Lyon, 2003.
- [15] **LIGHTHILL M.J and WITHAM .G.B**, « *on kinetic waves. II. Theory of Traffic Flows on Long Crowded Roads* », Proc. Roy. Soc. London Ser. A, 229 (1955) pp. 317-345.
- [16] **RICHARDS.P.I**, « *Shock Waves on the Highway* ».Oper.Res., 4 (1956), pp. 42-51

## Bibliographie

---

- [17] D.R.Leonard, P. Power, N.B.Taylor, « *CONTRAM: structure of the Model* », Transportation Research Laboratory, Crow thorn TRL Report RR 178, 198
- [18] Ben-Akiva, Bierlaire, Burton, H.N. Koutsopoulos, ... , « *Network State Estimation and Prediction for Real-Time Transportation Mangement Applications* », Networks and Spatial Economics, Vol 1, No. 3/4, pp. 293-318,2001.
- [19] R. Jayakrishnan, H.S. Mahmassani, T.Y. Hu, «*An Evaluation Tool for Advanced Traffic Information and Management Systems in Urban Networks*», Transportation Research C, vol. 2C, pp. 129-147, 1994.
- [20] C. Gawron, « *Simulation-Based Traffic Assignment; Computing User Equilibria in Large Street Networks* », PhD thesis, University of Cologne, Cologne, 1998.
- [21] M. Mahut, « *A multi-lane extension of the Space-Time Queue Model of Traffic Dynamics*», presented at TRISTAN IV, Azores Islands, 2001.
- [22] Aurélien, C « *Modélisation de conflits dans l'algèbre des diodes - application à la régulation de trafic dans les carrefours* ». Laboratoire Système et Transport.Belfort, l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard. Thèse. Docteur en automatique: 172,2007.
- [23] Cohen, S. « *Ingénierie du Trafic Routier. Eléments de théorie du trafic et applications* », Presses de l'Ecole National des Ponts et Chaussées.1993.
- [24] Cohen, s .Danech, m, « *Initiation A L'ingénierie Du Trafic Routier* » support De cour janvier 2000.
- [25] J.G.Wardrop, « *Some theoretical aspects of road traffic research* » Proceedings of the Institute of Civil Engineers (ICE) 2(1): 325-378.1952.
- [26] Correia.A « *modélisation de conflits ans l'algèbre de dioides : application à la régulation de trafic dans les carrefours* ». Thèse de doctorat en automatique, université de Besançon, France, 2007
- [27] Webster, F. V. *Road Research Technical Paper 39*. London, UK, Road Research Laboratory.1958.
- [28] Robertson, D. I. «*TRANSYT: A traffic network study tool*». Crowthorne, England, Ministry of Transport.1969.
- [29] Miller, A. J. «*A computer control system for traffic network* ». The 2<sup>nd</sup> International Symposium on Theory of Road Traffic Flow, London.1963.
- [30] Horlroyd, J. et J. A. Hillier. « *The Glasgow Experiment: PLIDENT and After*». RRL Report384.1971.
- [31] Hunt, P. B. «*The SCOOT on-line traffic signal optimisation technique* ».Traffic Engineering & Control 23: 190-192.1982

## Bibliographie

---

- [32] **Gartner, N. H.** « *Demand-responsive decentralised urban traffic control* », US Department of Transportation DOT/RSPA/DPB- 50/81/24.1982.
- [33] **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.
- [34] **Morrish,D.W.**«*Area traffic in Bordeaux: acontrast with British practice* ».Traffic Engineering & Control21 (8): 433-437.1980.
- [35] **Bretherton, R. D.** « *SCOOT urban traffic control system: philosophy and evaluation*».IFAC Symposium on Control, Computers, and Communications in Transportation (CCCT), 1989.
- [36] **Sims, A. G. et K. W. Dobinson.** «*The Sydney coordinated adaptive traffic (SCAT) system philosophy and benefits*». IEEE Transactions on VehicularTechnology29 (2): 130-137, 1980.
- [37] **Samia smaili** « *Modélisation et commande d'un système de trafic multimodal* ».Thèse doctorat, Université d'Evry-Val d'Essonne, 2012.
- [38] **Marie-Christine** «*Régulation du trafic : Éléments sur les domaines de pertinences des principales mesures* » Rapport d'étude, Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements, Juin 2012.
- [39] **Abdallah el hage** « *approche de la congestion routière : méthode de calcule du temps gêné* » Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements, juillet 2009.
- [40] **Marie-Christine ESPOSITO, Christophe DESNOUAILLES et autre** «*Panorama des systèmes de recueil de données de trafic routier* » Rapport d'études, Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements, France, nov.2012.
- [41] **Kechida, S et Bouriachi** « *Analyse de l'écoulement du Trafic : Application à un tronçon urbain de la ville de Guelma, Algérie* ». Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie. Proceedings CIMSI 2014