

N° d'ordre :

# UNIVERSITÉ D'ARTOIS

## THÈSE COTUTELLE

Présentée en vue de  
d'obtenir le grade de

## DOCTEUR

Spécialité : Génie Informatique et Automatique

par

**Vesela DRYANKOVA**

DOCTORAT DELIVRE CONJOINTEMENT PAR L'UNIVERSITE D'ARTOIS ET  
L'UNIVERSITE TECHNIQUE DE SOFIA

Titre de la thèse

# Contribution à la commande du flux de trafic autoroutier

Soutenue le 12 Décembre 2013 devant le jury d'examen

**Président**

**Rapporteur**

*Maxime Wack, Maître de Conférences HDR,  
Université de Technologie de Belfort Montbéliard*

**Rapporteur**

*Todor Stoilov, Professeur, Académie des Sciences de Bulgarie*

**Membre**

*Gilles Goncalves, Professeur, Université d'Artois*

**Directeur de thèse**

*Daniel Jolly, Professeur, Université d'Artois*

**Directeur de thèse**

*Emil Nikolov, Professeur, Université Technique de Sofia*

**Codirecteur de thèse**

*Hassane Abouaïssa, Maître de conférence HDR, Université d'Artois*



## Remerciements

Cette thèse est le résultat de recherche au sein du Laboratoire de Génie Informatique et d'Automatique de l'Artois (LGI2A)-Faculté des Sciences Appliquées, Université d'Artois en cotutelle avec l'Ecole doctorale de la Filière Francophone de Génie Electrique et le département « Automatisation des procédés continus » de l'Université Technique de Sofia.

D'abord, je tiens à remercier mes directeurs de cette thèse, le Professeur Daniel Jolly du Laboratoire de Génie Informatique et d'Automatique de l'Artois et le Professeur Emil Nikolov, Doyen de la Filière d'Automatique à l'Université Technique de Sofia, pour m'avoir donné la possibilité de travailler dans les deux établissements, pour m'avoir encadré et confiés ce travail de recherche, ainsi que de découvrir des nouvelles connaissances dans le domaine du flux de trafic autoroutier.

Je veux particulièrement remercier Dr. Hassane Abouaïssa, Maître de Conférences HDR à l'Université d'Artois et co-directeur de ce travail de thèse, pour sa confiance, sa disponibilité et ses idées, ainsi que pour son aide et ses conseils précieux, pour ses commentaires, ses critiques et sa patience.

Je remercie Monsieur Maxime Wack, Maître de Conférences HDR à l'Université de Technologie de Belfort Montbéliard et Monsieur Todor Stoilov, Professeur à l'Académie des Sciences Bulgare, d'avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail de thèse.

Je tiens à remercier le Dr. Habib Haj-Salem, Directeur de Recherche HDR du laboratoire GRET-TIA, pour son aide précieuse durant la période de recherche de la thèse.

Mes remerciements vont aussi au Professeur Gilles Goncalves, Directeur du LGI2A à l'Université d'Artois d'avoir accepté de participer à ce jury, ainsi que pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et j'ai pu travailler avec l'ensemble des membres du LGI2A.

Je tiens à remercier tous mes amis du LGI2A, Khaoula Besbes-Nabli, Hind Nakouri, Samir Hachour, Hirsch Majid, Yuhan Guo, Yamine Bouzembrak, Shahin Gelareh, Ahmed Samet, Issam Nouaouri, Yoann Kubera et Dong Xue, pour la bonne humeur, les discussions et pour les bons, amusants et inoubliables moments à Béthune.

Je remercie Milka Uzunova, Docteur en Automatique, Antonia Shekerova, Doctorante de l'Université de Ioannina, Petia Angelova, Master en Génie Physique pour leurs conseils scientifiques et personnelles, pour leur aide leur support.

Mes remerciements sincères à l'administration de la Filière Francophone de l'Université Technique de Sofia, à Mlle Valentina Valova et Mme Magdalena Stankova, également à Mme Dorothee Topart de l'Université d'Artois.

Je remercie l'équipe de l'Institut français de Sofia et l'EGIDE pour avoir financé mes séjours en France.

Enfin, je tiens à remercier ma famille et tous mes proches amis pour avoir été à mes côtés, pour leurs conseils et leur encouragement.

à mes parents

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Gestion des systèmes de transport</b>	<b>3</b>
2.1	Introduction . . . . .	3
2.2	Systèmes de transport intelligents . . . . .	3
2.2.1	Définition . . . . .	3
2.2.2	Problématiques . . . . .	4
2.3	Actions et mesures pour la gestion dynamique des STI . . . . .	6
2.3.1	Généralités . . . . .	6
2.3.2	Contrôle d'accès . . . . .	10
2.4	Contrôle intégré . . . . .	21
2.5	Conclusion . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Nouveau algorithme du contrôle d'accès isolé</b>	<b>24</b>
3.1	Introduction . . . . .	24
3.2	Platitude différentielle et commande par mode glissant . . . . .	25
3.2.1	Concept de la platitude différentielle . . . . .	25
3.2.2	Commande par mode glissant . . . . .	31
3.3	Algorithme du contrôle d'accès . . . . .	36
3.3.1	Génération de trajectoire . . . . .	38
3.3.2	Suivi de trajectoire par mode glissant . . . . .	38
3.4	Simulations numériques . . . . .	39
3.4.1	Metanet : Outil de modélisation et de simulation . . . . .	40
3.4.2	Résultats de simulation . . . . .	42
3.4.3	Conclusion . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Étude en simulation de la régulation d'accès isolé</b>	<b>48</b>
4.1	Introduction . . . . .	48
4.2	Algorithme du contrôle d'accès isolé . . . . .	49
4.2.1	Bref rappel . . . . .	49
4.2.2	Implémentation sur site . . . . .	49
4.3	Simulations numériques . . . . .	50
4.4	Analyse quantitative . . . . .	55
4.4.1	Temps total passé <i>TTS</i> . . . . .	55
4.4.2	Distance parcourue . . . . .	59
4.4.3	Vitesse moyenne . . . . .	59
4.4.4	Temps de parcours . . . . .	59

4.4.5	Consommation d'énergie . . . . .	59
4.4.6	Émission de polluants . . . . .	59
4.5	Conslusion . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Conclusions</b>	<b>63</b>

# Table des figures

2.1	Congestion typique aux heures de pointe . . . . .	5
2.2	Accident sur une rampe d'accès . . . . .	5
2.3	Exemple de centre de contrôle autoroutier (source : <a href="http://www.svz-bw.de">http : //www.svz – bw.de</a> ) . . . . .	6
2.4	Panneaux à messages variables <a href="http://ozone.mxbt.com/">http : //ozone.mxbt.com/</a> . . . . .	7
2.5	Exemple illustratif de la vitesse critique . . . . .	8
2.6	Principe du contrôle d'accès . . . . .	10
2.7	Topologie de contrôle d'accès sur l'A6 Paris - Source EURAMP Project Sites . . . . .	11
2.8	Exemple de régulation statique . . . . .	12
2.9	Principe de la régulation Demande-Capacité . . . . .	12
2.10	Principe de la régulation Taux d'occupation . . . . .	13
2.11	Principe de l'algorithme ALINEA . . . . .	15
2.12	Schéma de la commande prédictive [27] . . . . .	19
2.13	Structure de la stratégie HERO . . . . .	20
2.14	Exemple de la commande intégrée par une limitation dynamique de la vitesse et le contrôle d'accès . . . . .	21
3.1	Exemple de correspondance de trajectoires . . . . .	27
3.2	Exemple de génération de trajectoire . . . . .	28
3.3	Principe de la commande par commutation au niveau de l'organe de commande . . . . .	32
3.4	Principe de la commande par commutation au niveau de la contre-réaction d'état . . . . .	33
3.5	Principe de la commande par commutation et ajout d'une commande équivalente . . . . .	33
3.6	Illustration du phénomène de réticence (chattering) . . . . .	35
3.7	Exemple d'une section autoroutière . . . . .	37
3.8	Représentation schématique d'une section autoroutière . . . . .	40
3.9	Topologie de la section autoroutière . . . . .	43
3.10	Demande à l'origine de la section principale . . . . .	44
3.11	Demande à l'origine des rampes d'accès . . . . .	44
3.12	Evolution dans le temps de la densité dans le segment 4 : Cas sans commande . . . . .	45
3.13	Evolution dans le temps de la densité dans le segment 4 : Cas avec commande . . . . .	45
3.14	Evolution dans le temps de la densité dans le segment 6 : Cas avec commande . . . . .	46
3.15	Surface de glissement . . . . .	46
4.1	Tronçon de l'autoroute A6W avec les trois rampes étudiées . . . . .	51
4.2	Demands aux origines . . . . .	52
4.3	Evolution dans le temps des densités : cas sans commande . . . . .	54
4.4	Evolution dans le temps des densités : cas avec commande . . . . .	56
4.5	Evolution dans le temps des vitesses moyennes : cas avec commande . . . . .	57
4.6	Evolution dans le temps du signal de commande : Cas de la rampe O-Grigny . . . . .	58

4.7	Exemple d'évolution de la file d'attente O-Grigny . . . . .	58
4.8	Distance parcourue : – sans commande, – avec commande . . . . .	61
4.9	Temps de trajet : – sans commande, – avec commande . . . . .	61

# Liste des tableaux

3.1	Exemples de diagramme fondamental . . . . .	41
3.2	Paramètres de simulation . . . . .	43
4.1	Principaux paramètres de simulation . . . . .	53
4.2	Résultats de l'évaluation des performances . . . . .	60

# Chapitre 1

## Introduction générale

Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse ont été menés dans le cadre d'une convention de cotutelle entre l'Université Technique de Sofia (Bulgarie) et l'Université d'Artois (France). Ils ont été effectués conjointement au sein du département « Automatisation des procédés continus », sous la direction du Professeur Emil Nikolov, et au Laboratoire de Génie Informatique et d'Automatique de l'Artois (LGI2A - E.A. 3926) sous la direction du Professeur Daniel Jolly. Ces travaux entrent dans le cadre de la gestion dynamique des systèmes de transport intelligents. Plus particulièrement, ils concernent la commande du trafic autoroutier et des **Voies Rapides Urbaines (VRU)** et notamment le contrôle d'accès dans le but d'apporter des solutions originales aux difficultés de circulation quotidiennes dues aux congestions, qu'elle soient récurrentes ou pas.

Il est important de souligner que le transport routier est le moyen de transport des biens et des personnes le plus important mais aussi le plus cher et c'est celui qui pose le plus problème dans la plupart des pays. Parmi les inconvénients les plus importants de ce moyen de locomotion, citons les congestions fréquentes, la pollution environnementale et un taux très élevé d'accidents [78].

La congestion du trafic est depuis plusieurs décennies le lot quotidien des usagers de la route que ce soit en milieu urbain, inter-urbain ou autoroutier. Plusieurs causes sont à l'origine de ce phénomène. En effet, l'étude menée par « *CIMbéton* » [34] confirme que si la moitié de la population mondiale habite en ville, les prévisions annoncent que vers les années 50 de ce siècle, plus des 2/3 de cette population (environ 9 milliards) résideront en ville. D'où la nécessité de disposer d'infrastructures durables, moins coûteuses en énergie et moins polluantes. Une des solutions pour résoudre ce type de problème est d'augmenter de la capacité des infrastructures existantes de la construction de nouvelles routes et enfin de la régulation des flux routiers.

Définissons tout d'abord la notion de congestion. Selon [54], [55], la congestion apparaît lorsqu'un nombre trop important considérable de véhicules essaye d'emprunter une infrastructure commune dont la capacité est limitée. Une autre définition proposée par [34], considère que la congestion d'une infrastructure est la condition dans laquelle une augmentation du trafic de véhicules provoque un ralentissement global de celui-ci. Ainsi, le terme congestion désigne une dégradation de la qualité de service quand le nombre d'usagers augmente. Un tel phénomène se caractérise par l'apparition de retards, de goulets d'étranglement, principalement durant les fortes demandes en trafic.

De nombreuses études menées en Europe et aux Etats-Unis d'Amérique, ont chiffré les coûts directs et indirects des congestions à plusieurs milliards d'euros. Ainsi, selon le livre blanc de la

commission Européenne, ces coûts ont atteints 1 % du PIB en 2010.

Selon d'autres études et chiffres officiels, la moitié du carburant utilisé dans l'Union Européenne est gaspillée dans les congestions. En 2004 aux Etats-Unis, 100 milliards de litres de carburant ont été gaspillés pour la même cause, soit 250 millions de tonnes de  $CO_2$  émises dans l'environnement [34].

Bien que la construction de nouvelles infrastructures<sup>1</sup>, semble être la solution la plus évidente et la plus simple, elle reste encore trop coûteuse, et est confrontée à la réticence des riverains.

Le seul moyen viable et relativement moins coûteux consiste à mettre en œuvre les avancées réelles dans les domaines de l'automatique, des techniques d'information et de communication afin d'assurer une gestion dynamique et en temps-réel des infrastructures existantes. L'objectif principal, par ailleurs démontré par plusieurs études sur le terrain qui montrent des gains considérables, est de lutter contre les congestions et leurs effets néfastes.

Nos travaux abordent donc ce problème de congestion en mettant l'accent, plus particulièrement sur le contrôle d'accès. Le mémoire est structuré comme suit :

Après avoir défini la notion de systèmes de transport intelligents, le chapitre 1, traite des problèmes rencontrés dans ces systèmes. Il présente aussi, d'une manière non exhaustive, les différentes actions et mesures dédiées à la gestion dynamique du trafic. Une attention particulière est portée au contrôle d'accès autoroutier et sur les VRU. Quelques stratégies parmi les plus implémentées sur le terrain sont analysées et discutées.

Le chapitre 2 est consacré à de brefs rappels sur les deux concepts utilisés dans notre stratégie de commande. Le premier repose sur la platitude différentielle, introduite il y a plus de 15 ans par M. Fliess et ses collaborateurs [16], [18], [70]. Le second traite de la commande par mode glissant d'ordre supérieur, introduite depuis plusieurs années sous forme de commande à structures variables [75]. L'utilisation conjointe de ces concepts permet de concevoir un algorithme de commande dédié au contrôle d'accès, efficace, facile à implémenter et est robuste aux différentes incertitudes du modèle ainsi qu'aux perturbations. La mise en place d'une stratégie de commande, impose de disposer d'un modèle de simulation permettant de reproduire les phénomènes du trafic, afin de valider les stratégies développées et d'évaluer ses performances. Dans cette optique, le chapitre 2 est consacré également à une classe des modèles dite « macroscopique ». Le modèle « METANET » qui est à la base de notre simulateur est aussi présenté et analysé.

Le chapitre 3 démontre à partir de simulations numériques effectuées avec des données réelles issues du terrain l'efficacité de l'approche proposée. L'objectif est de mesurer cette efficacité à partir des critères de performances utilisés par les exploitants routiers.

La dernière partie de ce mémoire analyse les travaux réalisés dans le domaine et dresse une liste non-exhaustive de nombreuses perspectives dans le domaine des systèmes de transport intelligents.

---

1. Les infrastructures routières recouvrent moins de 0.5 % des territoires nationaux [34].

# Chapitre 2

## Gestion des systèmes de transport

### 2.1 Introduction

Les systèmes de transport intelligents (STI)<sup>1</sup>, fort bien documentés dans [48], ont été introduits afin d'assurer une circulation sûre et sans incidents ainsi que d'optimiser l'utilisation des infrastructures routières et autoroutières. Les STI interviennent dans un contexte mondial de congestion du trafic (urbain, interurbain et autoroutier) d'une part et de développement des nouvelles technologies de l'information d'autre part, en particulier dans les domaines de modélisation, de simulation, de commande en temps-réel et des réseaux de télécommunications.

L'objectif de ce chapitre est de définir la notion des STI, les problématiques relatives à ces systèmes ainsi que les actions et mesures utilisées pour leur gestion dynamique.

### 2.2 Systèmes de transport intelligents

#### 2.2.1 Définition

Les systèmes de transport intelligents désignent les applications des nouvelles technologies de l'information et de la communication dans le domaine du transport (aérien, routier et maritime). Dans le domaine routier, les STI jouent un rôle important pour faire face aux problèmes de congestion, pour optimiser l'utilisation des infrastructures, ainsi que pour la diminution de la pollution environnementale due au nombre croissant de véhicules en circulation (Voir [81], pour une définition plus complète.).

Il est important de souligner que le développement des STI s'est amorcé durant les années soixante. Les années 1980 à 1995, ont vu une progression importante dans le domaine de l'information routière embarquée. Les problèmes d'interopérabilité, de billettique ainsi que l'autoroute automatisée ont commencé à être traités entre 1995 et 2000. Enfin, entre 2000 et 2005, on a assisté au développement de la multimodalité, de la mobilité durable et de la sécurité routière [81].

Durant toute cette période de développement des STI, l'objectif principal, entre autres, a été d'apporter des solutions viables aux problématiques nombreuses du trafic. L'une d'elle concerne les problèmes de congestion discutés dans le paragraphe suivant.

---

1. Intelligent Transportation Systems, ITS, en anglais.

Les STI ou système intelligents de transport couvrent l'ensemble des modes de transport urbains et interurbains ; néanmoins les points qui vont suivre se référeront le plus souvent à la route et à la circulation automobile. Il y a plusieurs raisons à cela [63] :

- Le domaine des transports est extrêmement vaste si l'on voulait traiter tous les modes et leurs interfaces ;
- Les transports aériens et ferroviaires ont une tradition déjà ancienne dans ce domaine et l'évolution se réalise de façon presque naturelle, encadrée par des règlements ou des accords internationaux ;

Nous avons donc privilégié cet aspect en essayant de passer en revue les principales technologies bénéficiant du numérique que nous avons regroupées :

- Télécommunication ;
- Recueil et traitement des données ;
- Modélisation et simulation ;
- Localisation des mobiles et navigation.

Quel que soit le mode de transport de personnes considéré, la mobilité n'a jamais été aussi élevée sur des distances aussi bien intercontinentales que périurbaines. De même, le développement et la mondialisation de l'économie conduisent à un accroissement spectaculaire des flux de marchandises. Mais le phénomène le plus marquant, bien qu'invisible pour les usagers, concerne la quantité toujours croissante de données qui accompagnent aussi bien les voyageurs que les marchandises et qui sont de plus intégrées dans les systèmes d'exploitation des diverses infrastructures. Les progrès des télécommunications et la miniaturisation des moyens de traitement de l'information, dont le prix baisse au fur et à mesure que leur puissance augmente, conduisent à embarquer dans les divers mobiles (les véhicules) de plus en plus d'électronique et d'informatique [63].

Les produits STI sont bien évidemment destinés à offrir des services aux conducteurs et usagers, ainsi qu'aux exploitants d'infrastructures. L'International Standardisation Organisation (ISO) a ainsi répertorié la liste des services dans les domaines de l'information relative aux systèmes de transport et des systèmes de contrôle.

## 2.2.2 Problématiques

La communauté scientifique a commencé à se mobiliser autour des années soixante pour lutter contre les effets néfastes des congestions. En effet, la congestion globale des infrastructures de transport représente un coût socio-économique très important en terme :

- de problèmes de santé et de stress,
- de diminution de la productivité dûe au temps perdu par les usagers dans les transports,
- d'augmentation du nombre d'accidents,
- d'accroissement de la pollution de l'air,
- de consommation de carburant et donc d'émission de gaz à effet de serre (**GES**).

Alors que la construction de nouvelles infrastructures ne peut être considérée comme une alternative viable pour résoudre les problèmes de congestions, les **STI** représentent la solution efficace pour améliorer la qualité de service des usagers.

Par ailleurs, la mise en œuvre des **STI** nécessite la compréhension des phénomènes qui régissent le trafic afin de mettre en place les techniques et les mesures adéquates pour une gestion dynamique efficace [55],[27].

La réunion ministrielle qui a eu lieu à Sofia du 30 au 31 mai 2007, dédiée à la réduction des

congestions<sup>2</sup> a permis de dresser un état des lieux des différentes causes des congestions. Ainsi, on peut dresser quelques perspectives de l'évolution du transport et ce grâce aux différents modes de transport. On peut constater que :

- Le trafic aérien et maritime conteneurisé, devraient plus que doubler au cours des 20 prochaines années. Le trafic routier, que ces deux flux nourrissent alourdira la pression qui s'exerce sur les infrastructures routières et ferroviaire.
- Le taux de motorisation privée et l'usage de la voiture continueront à progresser partout. Comme dans de nombreux endroits la capacité ne s'accroît pas aussi vite que la demande, l'avenir est à l'augmentation et, en l'absence d'actions de politiques efficaces, à la très forte aggravation de la congestion. Ceci ne peut que miner la qualité de vie et risque d'arrêter l'évolution des échanges qui a dynamisé la croissance économique au cours de la dernière décennie.



FIGURE 2.1 – Congestion typique aux heures de pointe



FIGURE 2.2 – Accident sur une rampe d'accès

L'un des défis majeurs des **STI** est celui de pouvoir concilier l'augmentation effrénée du nombre des véhicules<sup>3</sup> et les exigences d'une circulation fluide, plus sûre, sans accidents avec une meilleure qualité de services aux usagers ainsi qu'une diminution drastique de la pollution. En effet, il s'agit d'accommoder l'utilisation optimale des infrastructures existantes pour faire face aux problèmes récurrents des congestions<sup>4</sup>.

---

2. La réunion portait sur les différents modes de transport. Elle souligne clairement, vue l'interaction entre les différents mode de ces transports, que la congestion d'un mode de transport se répercute nécessairement sur les autres modes de transport.

3. Par véhicules, on sous entend les véhicules personnels, les poids lourds, . . . , etc.

4. La congestion peut se décliner en deux grandes catégories : récurrentes, typiques aux heures de pointes, et non-récurrentes dues aux accidents, incidents, obstacles et travaux (voir e.g. Figures 2.1 et 2.2, pour une illustration de ces

La congestion du trafic peut apparaître généralement, lorsqu'un très grand nombre de véhicules souhaite emprunter une infrastructure routière caractérisée par une capacité limitée [38].

## 2.3 Actions et mesures pour la gestion dynamique des STI

### 2.3.1 Généralités

Dans l'objectif d'une gestion optimale des STI, plusieurs actions et mesures dites « *automatiques* » sont mises en œuvre en tenant compte des conditions réelles de la circulation afin d'atténuer les phénomènes de congestions [36]. L'ensemble de ces actions est géré par un centre de contrôle illustré dans la Figure 2.3.



FIGURE 2.3 – Exemple de centre de contrôle autoroutier (source : [http : //www.svz – bw.de](http://www.svz-bw.de))

Le centre de contrôle représente le cerveau du système de gestion du trafic autoroutier, urbain ou dans les VRU<sup>5</sup> [5], [53]. Il est composé d'un ensemble d'équipements permettant d'assurer les fonctions suivantes :

- La connaissance du trafic.
- La gestion et le contrôle du trafic.
- La gestion de la demande.
- La gestion des incidents

La connaissance du trafic est réalisée grâce aux systèmes de recueil de données. Généralement, ces données concernent le volume (ou débit) du trafic exprimé en nombre de véhicules par heure (véh/h), le taux d'occupation en (%) et la vitesse moyenne en (km/h). Le recueil de données peut-être effectué en temps-réel pour alimenter les systèmes de gestion du trafic. Il peut aussi être réalisé en temps différé afin d'éclairer les politiques publiques et de disposer de statistiques sur l'évolution du trafic afin de mettre en place des prévisions à court et à moyen termes [54] (Voir aussi le site [www.transport-intelligent.net](http://www.transport-intelligent.net), pour un état de l'art plus détaillé sur la gestion dynamique du trafic).

Le recueil des données est une étape indispensable pour l'organisation et la gestion des trafics. Notons que le recueil de données s'effectue à l'aide d'un ensemble de capteurs qui peuvent être classés en :

- capteurs intrusifs, tels que ceux à boucles inductives,

---

deux catégories de congestions (source : [http : //roadrulesblog.wordpress.com](http://roadrulesblog.wordpress.com).

5. Voies Rapides Urbaines

- capteurs non-intrusifs, utilisant l'effet Doppler (capteurs hyperfréquences),
- capteurs embarqués où les données sont fournies par les usagers. Il existe aussi des capteurs tels que les satellites et les véhicules traceurs, ...

Les caméras vidéo sont plus chères, même si les prix baissent régulièrement. Elles peuvent couvrir des zones étendues (de l'ordre de 300 à 400 m, dans les deux sens) et peuvent être installées sur des mats, des portiques ou des ouvrages franchissant la chaussée. Elles sont associées à des systèmes d'analyse d'images permettant de réaliser des comptages ou du suivi de véhicules. Pour que le système soit fiable il faut que la caméra reste en position fixe plusieurs minutes, ce qui empêche d'utiliser ces caméras pour la surveillance [63].

La gestion du trafic concernent les actions assurées par le centre de contrôle détaillées ci-dessous.

- La Détection Automatique d'Incident (**DAI**),
- La Surveillance du trafic,
- L'information utile aux usagers,
- La limitation dynamique de vitesse grâce aux Panneaux à Message Variables (**PMV**),
- Le routage et l'affectation dynamique par **PMV** (Figure 2.4)
- Le contrôle d'accès autoroutier et péri-urbain.

Ces technologies alliées aux capteurs, ont permis la constitution de TMS<sup>6</sup> géants dont les missions diffèrent peu, quels que soient les villes ou pays concernés. A Paris, le PC de SIRIUS<sup>7</sup> reçoit l'ensemble des données recueillies sur les voies rapides, en assure le traitement en vue d'une part de la diffusion d'information par PMV et d'autre part pour la Détection Automatique d'Incident (DAI) et le contrôle d'accès autoroutier.



FIGURE 2.4 – Panneaux à messages variables [http : //ozone.mxbt.com/](http://ozone.mxbt.com/)

L'information des usagers des transports publics, connaît un développement notable avec les affichages des temps d'attente aux stations et une meilleure régulation, grâce à la localisation précise et permanente des véhicules qui participent également à la mise en sécurité des zones à risque. Les usagers souhaitent disposer d'informations fiables sur les conditions de trafic, avant leur départ pour choisir leur itinéraire ou un autre mode de transport, ou pendant leur déplacement pour éviter les difficultés et éventuellement modifier leur parcours. La prévision des temps de parcours à très court terme est destiné à améliorer la qualité de l'information diffusée sur les panneaux à

6. Traffic Management Centers

7. Système d'Information pour un Réseau Intelligent aux USagers

messages variables ou sur tout autre service d'information en temps réel. Malgré le calcul actuel de temps de parcours et l'actualisation de ces calculs chaque minute, les modifications rapides des conditions de circulation sont prises en compte avec un retard par le système [63].

Le paiement électronique sans contact aux péages autoroutiers (réalisations de Singapour, Toronto et Melbourne, Italie, France) ou dans les transports publics utilisent des développements avancés de transmission courte portée et de miniaturisation des composants. Les équipements à bord des véhicules automobiles en moyens de navigation, de localisation et d'information, qui se comptent en millions d'unités au Japon, commencent à se faire remarquer en Europe sur une part significative des véhicules moyen et haut de gamme. En France, les équipements de la route, notamment pour le recueil des données de circulation et de météorologie, ont fait l'objet d'investissements importants des pouvoirs public et des sociétés d'autoroutes : les résultats sont visibles sur Internet, qu'il s'agisse des informations sur les conditions de circulation en région Ile de France ou sur les temps de parcours sur autoroute. Il est même possible de voir des images vidéo en temps réel de certains points du réseau autoroutier [63].

La surveillance et la **DAI** représentent des champs d'investigation importants dans les STI. En effet, la surveillance nécessite un temps de traitement très court, un coût bas ainsi qu'une fiabilité optimale [14]. Ces exigences se basent sur les technologies de traitement d'image pour offrir une variété de systèmes et de méthodes pour les STI en terme de plateforme pour la DAI.

La Voie Spécialisée Partagée (VSP) est gérée dynamiquement car elle n'est ouverte à la circulation que lorsque la section courante de l'autoroute est congestionnée (vitesse mesurée inférieure à  $50\text{km/h}$ ) c'est-à-dire essentiellement aux heures de pointe du matin. En temps normal cette voie a une fonction de bande d'arrêt d'urgence et la circulation y est interdite. L'ouverture de la voie est également soumise à la vérification de l'absence d'un éventuel obstacle. En cas d'événement particulier ou de l'arrêt d'un véhicule la VSP, la DAI désactive la circulation des bus sur cette voie pour lui redonner une fonction de bande d'arrêt d'urgence [[http : //www.transport – intelligent.net](http://www.transport-intelligent.net)].

La limitation dynamique de vitesse est une autre action d'exploitation du trafic. Les conducteurs sont informés par l'intermédiaire de PMV de la vitesse limite actuelle à respecter [48]. Les arguments de sécurité sont sans doute mieux écoutés, et on peut espérer que les régulations de vitesse ou d'intervalle actuellement étudiés dans les tunnels seront mieux suivis par les conducteurs [63].

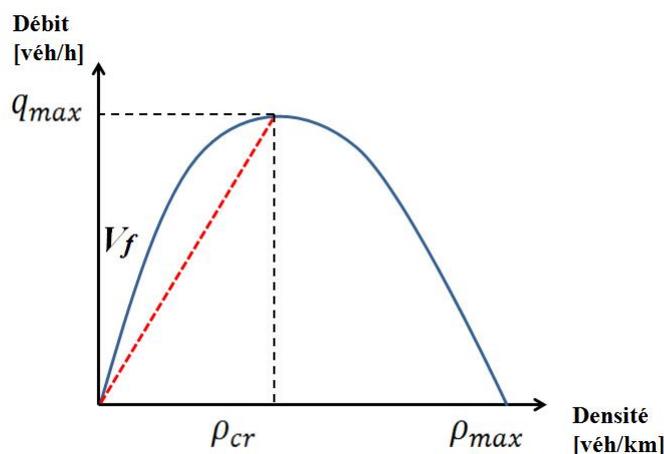


FIGURE 2.5 – Exemple illustratif de la vitesse critique

La limitation dynamique de vitesse est généralement utilisée selon deux points de vue [26]. Le premier, traité dans [1], [11], [29], [73], met l'accent sur l'effet d'homogénéisation du trafic. Le

principe consiste à réduire la différence de vitesse entre les véhicules afin d'assurer une circulation sûre avec un débit élevé. Cette approche d'homogénéisation (Figure 2.5) utilise la vitesse limite proche mais inférieure à la vitesse critique<sup>8</sup>. Le second, proposé par [8], [44], [45], se focalise plus sur la prévention de la chute de capacité. Plus exactement, il s'agit d'empêcher que le trafic n'atteigne des densités très élevées, ce qui permet d'assurer des vitesses inférieures à la vitesse critique. Il est important de noter que les approches de la limitation dynamique de la vitesse basées sur l'homogénéisation ont un effet négligeable sur le trafic alors que la seconde approche permet aussi d'absorber les congestions existantes.

Le routage et l'affectation dynamique est une mesure qui permet de résoudre les problèmes de congestion non-récurrente. Il permet de proposer aux usagers des choix d'itinéraires selon l'état du trafic afin de minimiser le temps de trajet. Le terme du routage dynamique consiste à proposer aux usagers de la route des itinéraires alternatifs selon les différentes conditions de circulation. Ainsi le guidage peut recommander différents itinéraires à différents moments de la journée selon les conditions réelles de circulation [79]. Le routage dynamique peut influencer le comportement individuel des conducteurs, en fonction de leur origine et destination, ou de leur propre sélection d'itinéraire [79].

La régulation du flux du trafic permet de prévenir ou de maîtriser les effets des situations prévisibles ou accidentelles sur l'écoulement des flux en termes de capacité, de temps de parcours et de confort. La première action pour limiter les perturbations ou pour éviter les congestions est d'essayer de maintenir la demande de circulation en dessous de la capacité. De même des modulations de péage ont montré des effets très positifs pour faire connaître de nouveaux itinéraires lors des départs en vacances d'hiver, ou pour inciter à éviter les heures de pointes en retour de week-end. Sur les autoroutes et les voies rapides urbaines, l'idée d'un péage de régulation a été expérimentée dans quelques villes d'Europe. L'essentiel de la régulation se fait implicitement par la connaissance qu'ont les usagers des difficultés quotidiennes sur les routes et dans les transports en commun. L'annonce des temps de parcours, des congestions ou des accidents permet de préciser cette connaissance et contribue à l'équilibre du réseau routier.

L'ensemble des actions dédié à la gestion dynamique du trafic a pour objectif d'assurer une meilleure qualité de service aux usagers. Néanmoins, notons que de telles mesures sont plus de nature « *informative*<sup>9</sup> ».

L'utilisation des nouvelles technologies de l'information et de la communication apporte une aide importante à la résolution des problèmes de transport. Pour cette raison le rôle de STI dans la gestion de trafic est d'assurer, en utilisant les nouvelles technologies, une optimisation des ressources existantes et la sécurité des usagers [63].

L'objectif des gestionnaires des voies rapides est de maintenir le trafic le plus longtemps possible au voisinage de la capacité, en préservant la confiance des conducteurs et en évitant les congestions trop fortes. Il faut surveiller constamment et interpréter les petites variations de la circulation et de la météo. Pour prévenir et pour traiter les moindres accidents avant qu'ils ne s'aggravent, il faut établir un contact permanent avec les usagers pour qu'ils pratiquent une conduite apaisée, pour éviter ou pour limiter les réactions brusques de circulation, lorsqu'un accident ou une congestion se forme. Il faut maintenir au meilleur niveau l'organisation, la qualité et la coordination des différentes équipes de contrôle et d'intervention, de communication, de surveillance et de régulation. Les systèmes intelligents de transport ou les services de télématique routière apportent

---

8. La vitesse critique est celle correspondante au débit maximal.

9. Par informative, on sous-entend qu'elle ne sont pas obligatoire. Si on considère le routage dynamique, par exemple, il est réalisé grâce aux PMV, ce qui signifie que les usagers ne sont pas obligés de suivre les indications fournies par ce type d'actionneurs.

de nouveaux moyens de communication, d'échange et de traitement des données. En général les systèmes intelligents de transport offrent de nouvelles possibilités de traitement des données pour les services d'information et de guidage souvent payant. Parmi les actions les plus directes et les plus efficaces, et qui sont relativement à moindre coût, citons le contrôle d'accès autoroutiers et la gestion de la circulation sur les VRU [55], [41]. Le paragraphe suivant détaille ce principe de régulation du trafic, et décrit quelques stratégies les plus implémentées sur le terrain par les exploitants.

### 2.3.2 Contrôle d'accès

Le développement du contrôle d'accès remonte aux années soixante du siècle dernier et les travaux de [80]. Depuis, plusieurs approches ont été proposées. Citons à titre d'exemple les travaux développés par [82], [74], [77], [7], [69]. L'action de la régulation d'accès consiste à limiter le nombre de véhicules entrant sur une voie rapide de façon à ne pas dépasser sa capacité maximale. Les véhicules sont retenus un certain temps sur les bretelles d'accès, de telle sorte que le débit de saturation ne soit pas atteint sur l'ouvrage. Celui-ci écoule alors le flux de circulation à son débit maximum. Le système de régulation du trafic a pour objectif d'adapter le réglage des feux tricolores aux conditions réelles de la circulation et d'assurer la sécurité de tous les usagers [64]. Plusieurs expériences ont été réalisées sur le boulevard périphérique parisien en collaboration avec l'INRETS (actuellement IFSTTAR)<sup>10</sup>. Mais, sur cet ouvrage, la faible longueur des bretelles d'accès ne permet pas un stockage suffisant de véhicules, ce qui entraîne une détérioration rapide de la circulation sur la voie urbaine.

#### Principe du contrôle d'accès

Afin d'illustrer le principe de ce type de régulation, considérons l'exemple d'une section autoroutière simple avec une bretelle d'entrée (voir Figure 2.6). Dans cette figure,  $q_e$ ,  $q_s$  et  $q_r$  représentent respectivement, le débit d'entrée, de sortie et de la rampe en (véh/h).  $d$  est la demande à l'origine de la rampe d'accès.  $\rho_s$  en (véh/km/voie)<sup>11</sup> et  $v_s$  (km/h), sont la densité et la vitesse de sortie.

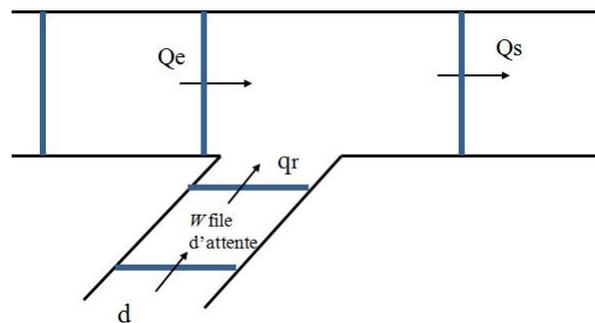


FIGURE 2.6 – Principe du contrôle d'accès

Le contrôle d'accès consiste à agir sur le débit de la rampe afin de maintenir la densité  $\rho_s$  dans la section principale au-dessus d'une valeur critique  $\rho_c$ , et ce grâce au feu de signalisation situé

10. Acronyme de « Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité » ; et IFSTTAR pour « Institut Français des Sciences et Technologies de Transport, de l'Aménagement et des Réseaux »

11. Dans la pratique, on utilise le taux d'occupation  $TO_s$  en %, traduit ensuite, pour les simulations, en densité du trafic grâce à l'expression suivante :  $TO_s = \frac{\rho_s}{\rho_m} 100$ .

au niveau du convergent (c.f. Figure 2.7). Il est important de souligner que dans le cas d'une forte demande, le contrôle d'accès peut conduire à la formation d'une file d'attente  $\omega$ . Le taux du débit, noté  $r$  avec  $r \in \{r_{min}, r_{max}\}$  est ensuite traduit en terme de durée du vert.



FIGURE 2.7 – Topologie de contrôle d'accès sur l'A6 Paris - Source EURAMP Project Sites

Le contrôle d'accès peut être implémenté selon deux stratégies [41], [48] :

1. Stratégie à feux fixes, dans ce cas, la durée du vert est basée sur l'estimation de la demande moyenne au niveau de la bretelle d'entrée, admissible sur la section principale et non génératrice de perturbation. Ce type de stratégie est réalisé hors-ligne en se basant sur les historiques des données.
2. Stratégie adaptative, où le débit de la rampe est calculé en temps réel. Les données utilisées sont celles fournies par les différents capteurs installés sur la section principale (généralement en aval de la rampe) et sur les bretelles régulées.

Soulignons aussi que le contrôle d'accès peut être soit isolé soit coordonné. Dans le premier cas, le but est de réguler chaque accès localement indépendamment des autres accès. Dans le second, l'objectif est de réguler plusieurs rampes en exploitant les données mesurées sur l'ensemble de ces accès [10]. Par la suite, nous nous intéresserons aux différents algorithmes et stratégies du contrôle d'accès.

### Algorithmes du contrôle d'accès

D'un point de vue régulation locale, on utilise les mesures effectuées à proximité de la bretelle d'entrée. L'objectif est que le contrôleur réagit dès l'apparition des congestions locales sans prendre en compte l'état global du trafic sur l'ensemble du réseau. Parmi les stratégies les plus élémentaires citons celle basée sur le « *contrôle d'accès statique* » (voir e.g. Figure 2.8). Remarquons que dans ce cas, aucune installation de feux de signalisation n'est nécessaire.

L'objectif est d'acheminer le trafic au point du convergent (à l'entrée de l'accès) sur une seule voie afin de minimiser les conflits d'insertion souvent à l'origine de fortes perturbations et d'accidents sur la section principale [20]. Un tel type de contrôle d'accès statique ne permet pas de prendre en compte les conditions réelles de la circulation. L'avantage qu'il présente est qu'il est facile à implémenter. On le trouve par exemple sur l'ensemble des accès du boulevard périphérique de Paris.

Un autre type de régulation dit « *dynamique* » consiste en la mise en oeuvre d'un ensemble d'instrumentations telles que les stations de mesures, les feux de signalisation. Ces derniers, sont action-



FIGURE 2.8 – Exemple de régulation statique

nés sur la base des données en temps-réel. On parle ainsi de stratégies réactives dont le paragraphe suivant propose un état des lieux des algorithmes couramment utilisés dans la pratique.

### Algorithme demande capacité (DC)

L'algorithme Demande-Capacité (DC), très répandu aux Etats-Unis, possède la particularité d'être une stratégie « boucle ouverte », relativement simple, mais qui nécessite la présence de trois capteurs (un au niveau de la rampe et les deux autres, placés en amont et en aval de cette rampe) pour la mesure des débits et du taux d'occupation [51] (Figure 2.9).

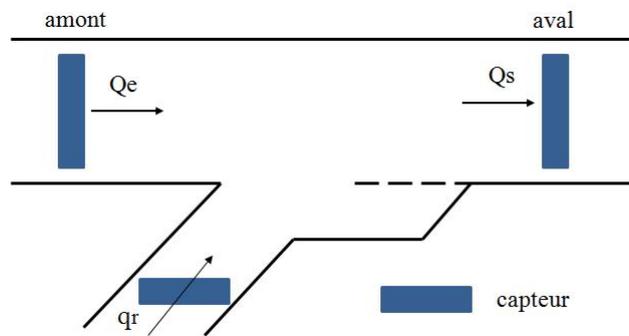


FIGURE 2.9 – Principe de la régulation Demande-Capacité

La stratégie DC, calcule en temps réel le débit  $q_r$ , nécessaire pour atteindre la capacité dans la section principale  $Q_{cap}$  : On a alors l'expression suivante pour décrire cet algorithme :

$$r(k) = \begin{cases} Q_{cap} - Q_e(k-1) & \text{si } TO_e(k) \leq TO_{cr} \\ r_{min} & \text{alors} \end{cases} \quad (2.1)$$

où  $k = 1, 2, \dots, n$ ,  $k$  est l'indice temporel discret,

- $r(k)$  est le débit de rampe (en  $vh/h$ ) qui sera mis en œuvre au cours de la nouvelle période  $k$ ,
- $Q_e(k-1)$  est le dernier débit en amont sur l'autoroute (en  $vh/h$ ),
- $TO_e(k)$  est le dernier taux d'occupation mesuré en amont (en %),

- $Q_{cap}$  est la capacité de l'autoroute en aval,
- $r_{min}$  est le flux admissible minimum de rampe,
- $TO_{cr}$  est le taux d'occupation critique (où le débit devient maximum).

La stratégie DC tente d'ajouter la dernière mesure de débit en amont  $Q_e(k)$  autant que le flux de la rampe  $r(k)$  (2.1) nécessaire pour atteindre la capacité d'autoroute en aval. Si l'occupation en amont mesurée  $TO_e(k)$  devient surcritique, le flux de la rampe  $r(k)$  est réduit par le débit minimum  $r_{min}$ . La stratégie est sensible aux diverses perturbations (des véhicules lent, des ondes de choc etc.) [61].

### Algorithme taux d'occupation

Très semblable à l'algorithme DC, cette stratégie très utilisée principalement, à Chicago et à Los Angeles, est basée sur le principe du calcul de  $q_r$  afin de compléter le débit d'entrée afin d'atteindre la capacité  $Q_c$  sur la section principale [51]. Cependant, cet algorithme utilise, à l'inverse de celui de la DC, les mesures du taux d'occupation, ce qui nécessite un calibrage du débit  $q_r$  en fonction du taux d'occupation d'entrée  $TO_e$  (Figure 2.10).

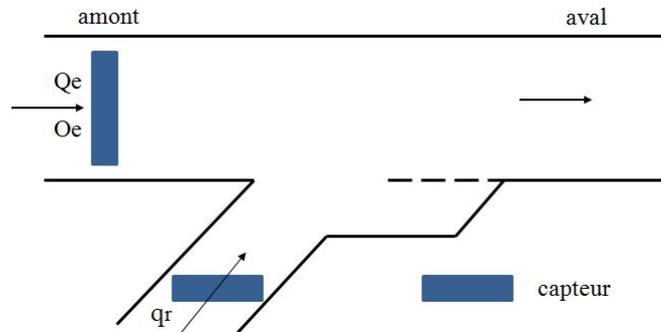


FIGURE 2.10 – Principe de la régulation Taux d'occupation

La stratégie taux d'occupation s'exprime ainsi sous la forme :

$$r(k) = Q_{cap} - Q_{en} \cdot TO_e(k-1) \quad (2.2)$$

où

$$Q_{en} = \frac{v_f \cdot TO_e}{g} \quad (2.3)$$

Soulignons que l'étude effectuée par Haj-Salem dans [48], démontre que l'ensemble des stratégies adaptatives cherche à compléter la demande à l'origine de la section principale  $q_e$  par le débit de la rampe  $q_r$  afin d'atteindre le débit maximum  $Q_c$  en aval de cette section.

Dans les cas des deux algorithmes décrits ci-dessus, l'effet de  $q_e$  qui est une entrée exogène et donc indépendante de tout contrôle, appelée aussi « perturbation », sur l'état de la sortie n'est pas pris en compte. Ceci implique que les résultats vis-à-vis de la valeur désirée ou consigne, ne sont pas satisfaisants. En d'autres termes, il n'existe aucune garantie d'atteindre la valeur désirée. Ainsi, dans le domaine de la régulation d'accès, il s'avère qu'une commande en boucle ouverte n'est pas suffisante pour atteindre les objectifs fixés. En effet, pour un système aussi complexe que celui du trafic, par ailleurs, décrit par des équations aux dérivées partielles, une commande en « boucle fermée », s'avère plus adéquate. Dans cette optique, la littérature sur le contrôle d'accès grossit

continuellement et plusieurs stratégies issues des avancées en automatique ont été conçues ou proposées.

Dans ce contexte, citons les approches basées sur les réseaux de neurones [28]. Ce type d'algorithme ne nécessite pas de disposer directement d'un modèle de trafic. L'apprentissage passe par la création d'un exemple de base.

D'autres algorithmes font appel aux systèmes experts. Ils reposent sur un ensemble de règles de décision qui décrivent le comportement des opérateurs réels ou virtuels sans utilisation de modèles analytiques. Cependant, le manque de bases théoriques et la nature non linéaire du trafic ainsi que les contraintes imposées aux actions de la commande, rendent l'extraction des règles de décisions très ardue et nécessitent un temps de développement très important.

Citons aussi d'autres approches rencontrées dans la littérature telles que l'algorithme linéaire quadratique [32] et ceux basés sur les techniques d'optimisation. [35], ont proposé une commande par retour d'état. De leur côté [25], [27], ont développé le contrôle d'accès en utilisant la commande prédictive. Soulignons enfin que bien que ces méthodes soient très robustes leur implémentation sur le terrain par les exploitants reste, à notre connaissance, très peu abordée.

Par la suite, nous nous intéressons à la stratégie ALINEA<sup>12</sup> due à [57], [41]. Celle-ci a été largement implémentée en France ainsi que dans d'autres pays.

### Algorithme ALINEA

ALINEA (2.4) est un algorithme dédié au contrôle d'accès isolé qui a été développé à l'INRETS en 1988 (actuellement IFSTTAR) [20], [22], [23], [57]. Il utilise un simple **intégrateur** afin de calculer le taux du débit de la rampe  $r$ , autorisé à entrer dans la section principale. Ce taux, considéré comme variable de commande est obtenu par l'expression suivante (voir Figure 2.11) :

$$r(k) = \begin{cases} r(k-1) + K_I [TO_{cr} - TO(k)] & \text{si } TO(k) \leq TO_{cr} \\ r_{min} & \text{alors} \end{cases} \quad (2.4)$$

où :

- $TO(k)$  représente le taux d'occupation en (%) de la section principale, mesuré à l'instant  $kT$ , à partir de la station située juste en aval de la rampe d'accès.
- $TO_{cr}$  en (%) représente le taux d'occupation désiré (consigne). Généralement, sa valeur est inférieure ou égale au taux d'occupation critique et est obtenu par calibrage hors ligne du diagramme fondamental de la station de mesure en aval.
- $r(k-1)$  représente le taux de débit durant l'intervalle  $[(k-1)T, kT]$ .
- $r(k) \in \{r_{min}, r_{max}\}$ <sup>13</sup> est le taux de débit pour l'intervalle  $[(k)T, (k+1)T]$ .
- $K_I$  est le gain qui est une constante positive. Plus sa valeur est faible, plus la commande est en retard par rapport à l'instant de l'apparition de la congestion. Une grande valeur de  $K_I$  conduit la commande vers un comportement du type « *Bing-Bang* ». Le réglage de ce gain s'effectue alors sur le terrain. Néanmoins, selon [57], sa valeur est généralement égale à 70.
- $T$  pas de temps égal à la durée du cycle  $C$ .

Le débit  $q_r$  autorisé à entrer dans la section principale est alors :

$$q_r = r \cdot \hat{q}_r \quad (2.5)$$

12. Acronyme d'Asservissement LINéaire d'Entrée Autoroutière.

13. Dans le cas où la rampe n'est pas contrôlée,  $r = 1$  [41].

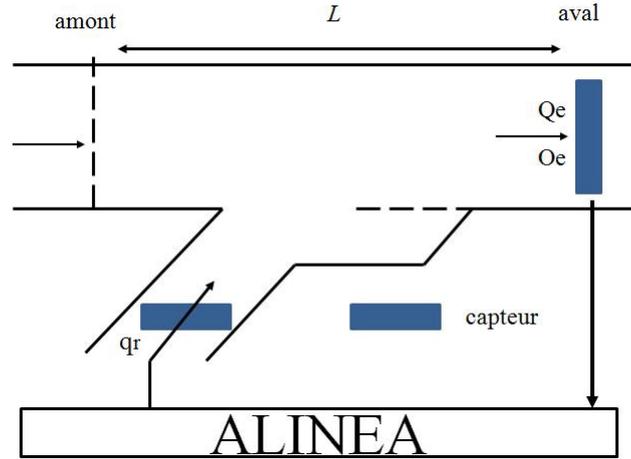


FIGURE 2.11 – Principe de l’algorithme ALINEA

$$\hat{q}_r(t) = \min(\hat{q}_{r,1}, \hat{q}_{r,2}) \quad (2.6)$$

$$\hat{q}_{r,1} = d_0(t) + \frac{w(t)}{T} \quad (2.7)$$

$T$  est le pas de temps.

$$\hat{q}_{r,2} = Q_{sat} \min\left(1, \frac{\rho_{max} - \rho(t)}{\rho_{max} - \rho_{cr}}\right) \quad (2.8)$$

$Q_{sat}$  représente la capacité de la rampe d’accès ( $veh/h$ ) dans les conditions fluides de circulation.  $w$  (2.7) est la longueur de la file d’attente sur la bretelle d’entrée.

Il est important de souligner que la commande générée est ensuite traduite en terme de durée de vert  $D_v$  durant le cycle  $C$  (4.6) :

$$D_v = \frac{r}{Q_{sat}} C \quad (2.9)$$

$Q_{sat}$  est généralement calculée à partir d’une moyenne des débits de l’accès durant les trois derniers cycles. Cette hypothèse n’est basée sur aucune justification mathématique mais plutôt sur des observations empiriques et des expériences du terrain. Le calcul de  $Q_{sat}$ , intimement lié au problème de la file d’attente doit faire l’objet d’une étude plus approfondie. Pour cette raison en pratique on prend  $Q_{sat} = 1800 veh/h$ . Bien qu’ALINEA a été implémenté dans plusieurs pays en Europe, les développements récents ont révélé un certain nombre de problèmes non couverts par ALINEA ou d’autres stratégies par ailleurs [48]. Parmi ces inconvénients qui doivent être traités, citons :

- L’utilisation des mesures en amont au lieu de celles en aval.
- Utilisation des mesures du débit au lieu de celles du taux d’occupation.
- Adaptation en temps-réel des valeurs désirées dont l’objectif de maximiser le débit en aval de l’infrastructure.
- Régulation efficace de la file d’attente afin d’éviter l’effet de débordement sur les voies adjacentes.

Afin de résoudre ces différentes insuffisances, [72] ont proposé une version basée sur des mesures en amont. Néanmoins, la régulation isolée reste encore insuffisante pour lutter contre les congestions. Par la suite, ALINEA a été enrichie par l'ajout d'un terme proportionnel au régulateur ce qui a conduit au contrôleur « PI-ALINEA ».

Une autre variante d'ALINEA a été proposée par Middelham [53]. Celle-ci utilise les mesures de la vitesse en amont  $v_e$  au lieu du taux d'occupation en aval. L'algorithme, nommé **V-ALINEA** (2.10), s'écrit alors sous la forme suivante :

$$r(k) = r(k-1) + K_R(v_{cr} - v_e(k-1)) \quad (2.10)$$

où  $v_{cr}$  représente la vitesse critique pour laquelle le débit est maximal.  $K_R$  est le gain du régulateur. L'un des inconvénients majeurs de cette stratégie réside dans le fait qu'elle dépend de la vitesse critique qui change en fonction de l'état du trafic. Son calibrage qui doit donc être effectué en temps-réel est très difficile.

En 2003, [72], a été développées une série de nouvelles versions d'ALINEA :

- FL-ALINEA (2.11) est une version d'ALINEA basée sur les mesures du débit au lieu du taux d'occupation. Cependant, l'une des insuffisances de cette stratégie est qu'il est difficile de distinguer si le trafic est en mode congestionné ou fluide. En effet, selon le diagramme fondamental, une même valeur du débit correspond à deux valeurs du taux d'occupation. L'algorithme dans ce cas s'écrit :

$$r(k) = \begin{cases} r(k-1) + K_I(Q_d - Q_s) & \text{Si } TO_s \leq TO_{cr} \\ r_{min} & \text{Sinon} \end{cases} \quad (2.11)$$

- UP-ALINEA<sup>14</sup> utilise les mesures du taux d'occupation en amont de la rampe contrôlée et qui permet d'estimer en temps réel, le taux d'occupation de sortie, en fonction aussi des débits d'entrées (de la section principale  $q_e$  et de la rampe  $q_r$ ) :

$$T\hat{O}_s(k) = TO_e(k) \left( 1 + \frac{q_r(k)}{Q_e(k)} \right) \frac{\lambda_e}{\lambda_s} \quad (2.12)$$

Dans l'expression (2.12),  $\lambda_e$  et  $\lambda_s$ , représentent respectivement, le nombre de voies en amont et en aval de la section principale. Dans ce cas, l'algorithme est donné par l'équation suivante (2.13) :

$$r(k) = r(k-1) + K_I(TO_{cr} - T\hat{O}_s(k-1)) \quad (2.13)$$

- AD-ALINEA permet d'estimer l'occupation critique  $T\hat{O}_{cr}$  en utilisant des mesures en temps réel de  $q_s(k-1)$  et  $TO_s(k-1)$  en aval de la rampe pour maximiser le flux de sortie  $Q_s$ . Cette stratégie de contrôle est nommée adaptative si elle comporte un dispositif qui adapte des paramètres spécifiques internes sur la base des mesures en temps réel.
- UF-ALINEA<sup>15</sup> est basée sur le flux en amont de la rampe d'accès (2.14).

$$r(k) = \begin{cases} r(k-1) + K_F(Q_d - \hat{Q}_s(k-1)) & \text{si } T\hat{O}_s(k-1) \leq TO_{cr} \\ r_{min} & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.14)$$

où  $K_F$  est exactement égale à 1.

---

14. UPstream ALINEA

15. Upstream - Flow Based ALINEA

Cette stratégie comprend deux mesures en aval de  $Q_s(k)$  et  $TO_s(k)$  qui doivent être estimées par l'utilisation de mesures en amont.

- X-ALINEA/Q est basée sur le contrôle de la file d'attente. Cette stratégie est une combinaison de toutes les stratégies présentées ci-dessous avec un contrôle efficace de la file d'attente de la rampe. La stratégie a un effet secondaire qui doit être abordée. Il s'agit de la formation de la file d'attente sur la rampe, en raison du fait que tous les véhicules qui entrent dans la rampe sont autorisés à entrer sur l'autoroute sous certaines conditions. Si la file d'attente (3.48) dépasse une certaine longueur, elle va interférer avec la circulation sur l'autoroute.

$$r(k) = r(k-1) - \frac{1}{T} [w - w(k)] + d(k-1) \quad (2.15)$$

Pour résoudre ce problème, il est nécessaire de placer un capteur à l'entrée de la rampe et d'effectuer le contrôle lorsque la boucle d'occupation dépasse un seuil (par exemple de 50%). Cette stratégie est utile dans le cas où tout l'espace de la rampe d'accès est utilisé.

### Commande par retour d'état

Dans la littérature il existe d'autres type de contrôle d'accès. Une de ces commandes est basée sur la technique de linéarisation par retour d'état pour des systèmes non linéaires. L'objectif du contrôle par retour d'état [35] (1.14) est d'annuler la différence entre la valeur de l'occupation et la valeur de la consigne. La dynamique est donnée par (2.16).

$$r(k) = K(TO_{cr} - TO(k)) + Q_s(k) - Q_e(k) \quad (2.16)$$

En raison des difficultés de mesure, la densité de trafic (2.17) est remplacée par l'occupation des véhicules (2.18).

$$\frac{d}{dt}\rho = \dot{\rho} = \frac{1}{L} (Q_e(k) - Q_s(k) + r(k)) \quad (2.17)$$

$$\rho = \alpha \cdot TO \text{ où } \alpha = \frac{\kappa \cdot \mu}{\lambda} \quad (2.18)$$

Après certaines transformations le système devient (2.19)

$$TO(k) = \frac{1}{\alpha L} (Q_e(k) - Q_s(k) + r(k)) \quad (2.19)$$

$\kappa$  est une constante,  $\mu$  est le nombre de voies sur une section d'autoroute, et  $\lambda$  est la longueur du véhicule. La loi de contrôle du système en utilisant la linéarisation par retour d'état est (2.20).

$$r(k) = -K(TO_{cr} - TO(k)) \frac{T}{\alpha L} + Q_s(k) - Q_e(k) \quad (2.20)$$

Le problème de la commande consiste à trouver une entrée optimale qui minimise (2.21).

$$J(k) = \int_0^{t_f} \left[ (r - r_{min})^r (r - r_{max}) + w \sum_{i=1}^n (\rho(k) - \rho_{cr})^2 \right] dt \quad (2.21)$$

En général ce contrôleur est conçu en linéarisant la dynamique non linéaire du système autour d'un point d'équilibre [35]. La conception principale du contrôle ne fournit que des résultats locaux. Pour obtenir des résultats globaux, des techniques non linéaires deviennent nécessaires [35].

## Contrôle d'accès coordonné

Par ailleurs, la complexité du trafic, ainsi que la grande échelle des réseaux étudiés imposent de prendre en compte les mesures de plusieurs rampes. Dans cette optique, les techniques de coordination apparaissent les mieux adaptées pour résoudre les problèmes de congestion. L'objectif principal de la mise en œuvre des stratégies coordonnées est d'optimiser globalement la capacité d'une portion importante de la voie rapide en ajustant simultanément les débits issus de plusieurs rampes d'accès. Généralement ces stratégies prennent en compte l'ensemble des conditions instantanées du trafic sur le réseau et les congestions non récurrentes [6]. Dépendant de la situation, les stratégies coordonnées doivent posséder les caractéristiques suivantes [62] :

- il faut coordonner les actions locales de contrôle d'accès d'une manière appropriée,
- les algorithmes doivent être basés sur le principe de la commande par retour d'état afin de réduire la sensibilité aux perturbations inattendues,
- il faut approcher l'efficacité des systèmes de contrôle optimal sophistiqués,
- il doit être générique (directement applicable à tout le réseau autoroutier) sans avoir besoin de calibration des paramètres.

La stratégie de contrôle optimal est une extension du calcul des variations. C'est une méthode d'optimisation mathématique [41], [40] qui traite le problème de la recherche d'une solution qui permet d'optimiser un critère. Le problème de commande comprend une fonction de coût qui dépend de l'état du système et de la variable de commande. Le contrôle optimal repose sur un ensemble d'équations différentielles décrivant les trajectoires des variables de contrôle qui minimisent ou maximisent un critère de performance, éventuellement sous des contraintes [81]. Le contrôle optimal a une structure en boucle ouverte, ce qui signifie que les perturbations (les demandes de trafic) doivent être complètement et exactement connues avant la simulation. Le modèle de trafic doit être le plus exact possible afin de garantir une précision suffisante des résultats des simulations [26]. Dans le domaine de la commande du trafic autoroutier, cette stratégie devrait explicitement prendre en compte [61] les critères suivants :

- l'état du trafic sur l'autoroute et les rampes d'accès,
- la prévision de la demande sur un horizon de temps suffisamment long,
- les contraintes d'accès,
- la dynamique non linéaire de flux de trafic, y compris la capacité limitée de l'infrastructure
- les incidents dans le réseau

Basée sur cette information, la stratégie de contrôle doit fournir des valeurs fixées pour le réseau global sur un horizon de temps futur de manière à [61] :

- respecter toutes les contraintes actuelles
- minimiser le critère de temps total de parcours du réseau y compris les rampes.

## Stratégie METALINE

La commande coordonnée repose sur les mesures des taux d'occupation tout le long de la section principale de l'axe autoroutier régulé afin de calculer le débit d'entrée de chaque rampe contrôlée. Dans ce contexte, le contrôle d'accès coordonné a donné naissance à des applications pratiques telles que celles proposées par [3], [55], [56], avec des plateformes telles que METALINE. L'algorithme de base s'écrit :

$$r(k) = r(k-1) - K_1 (To(k) - To(k-1)) + K_2 (TO_{cr} - TO(k)) \quad (2.22)$$

où :

- $r = [r_1, r_2, \dots, r_m]^T$  est le vecteur des  $m$  rampes d'accès contrôlées,
- $To = [To_1, To_2, \dots, To_n]^T$ , le vecteur des  $n$  taux d'occupations mesurées,
- $TO = [TO_1, TO_2, \dots, TO_m]^T$ , représente le sous ensemble  $To$  incluant les  $m$  taux d'occupations pour lesquelles les valeurs désirées  $TO_{cr} = [TO_{cr_1}, TO_{cr_2}, \dots, TO_{cr_m}]^T$  peuvent être données.
- $K_1$  et  $K_2$  sont les matrices des gains des régulateurs

Alors qu'ALINEA n'exige aucun effort de conception, à part la lourde tâche de calibrage, METALINE nécessite la mise en œuvre de procédures plus sophistiquées, généralement basées sur la commande LQ.

## Commande prédictive

La commande prédictive (MPC)<sup>16</sup> est une méthode de contrôle optimal appliquée dans le cadre d'un horizon glissant. Le contrôle optimal est appliqué, afin de coordonner ou d'intégrer des mesures de contrôle de circulation. MPC fonctionne en boucle fermée ce qui signifie que l'état de trafic et les demandes actuelles sont régulièrement renvoyée au contrôleur qui peut prendre en compte les perturbations (les erreurs de prédiction de la demande) et corriger les erreurs de prédiction résultant de l'inadéquation du modèle. Il est facile à mettre en œuvre, parce que le modèle de prédiction peut être modifié ou remplacé en cours de fonctionnement [26].

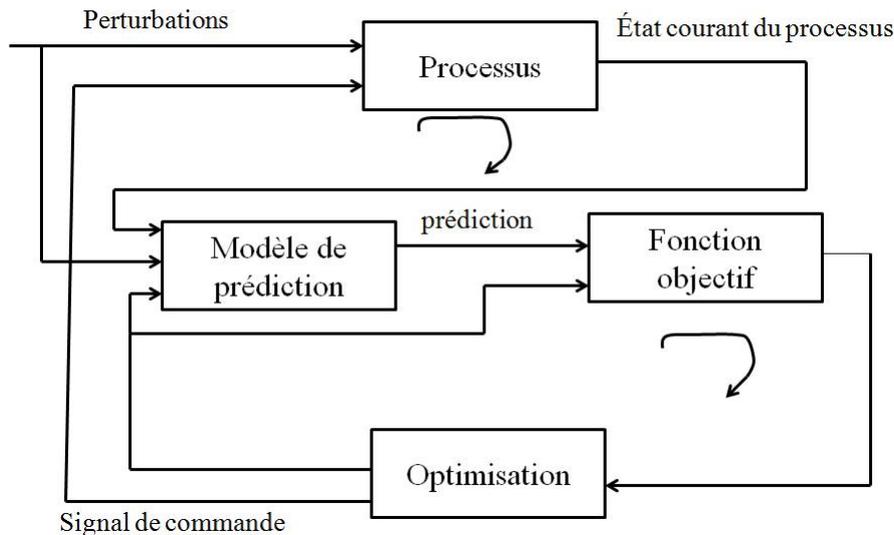


FIGURE 2.12 – Schéma de la commande prédictive [27]

La commande prédictive (Figure 2.12) [27], [26] est une technique de commande généralement utilisée pour commander des systèmes complexes. Cette commande temps réel fait partie des techniques de commande à modèle interne qui permet d'anticiper le futur comportement du procédé [81].

Les inconvénients de ce type de commande de flux de trafic sont résumées ci-dessous [27] :

- la méthodologie de calcul devient très complexe si l'horizon de contrôle est long ou le nombre des entrées est grand ;
- il faut augmenter le temps d'échantillonnage du régulateur ;
- il faut choisir un bon point de départ et un modèle des perturbations bien précis ;

16. ang : Model Predictif Control

- il est difficile de prouver la stabilité en boucle fermée

L'objectif de la commande est de trouver le signal de commande qui réduit au minimum la fonction de coût sur une période donnée de prévision. Cette commande peut être élaborée en contrôle d'accès isolé ou coordonné. La fonction de coût devrait donner une indication pour l'exécution du système. Pour calculer le signal de commande, l'approche de la commande prédictive emploie un modèle pour prévoir le comportement du trafic [27].

En général l'action de contrôle est basée sur les conséquences prévisibles de l'action de contrôle prévue. Pour que la prédiction soit exacte, il est nécessaire d'avoir un modèle précis mais aussi d'avoir une bonne connaissance de la perturbation.

### Stratégie OASIS

La stratégie OASIS est une application des techniques d'optimisation non linéaires. L'objectif de cette stratégie est d'élaborer des commandes simultanées et coordonnées pour plusieurs stratégies concurrentes - un guidage des usagers sur le réseau, une régulation des vitesses et une régulation des carrefours.

L'architecture d'OASIS consiste en un module de prévision des demandes aux origines, un module d'optimisation des commandes, incluant un modèle de simulation non linéaire de trafic METACOR et un module d'adaptation des commandes optimales. Cette stratégie est du type anticipatif, car elle utilise une technique basée sur un horizon glissant [48], [Haj Salem, 2010].

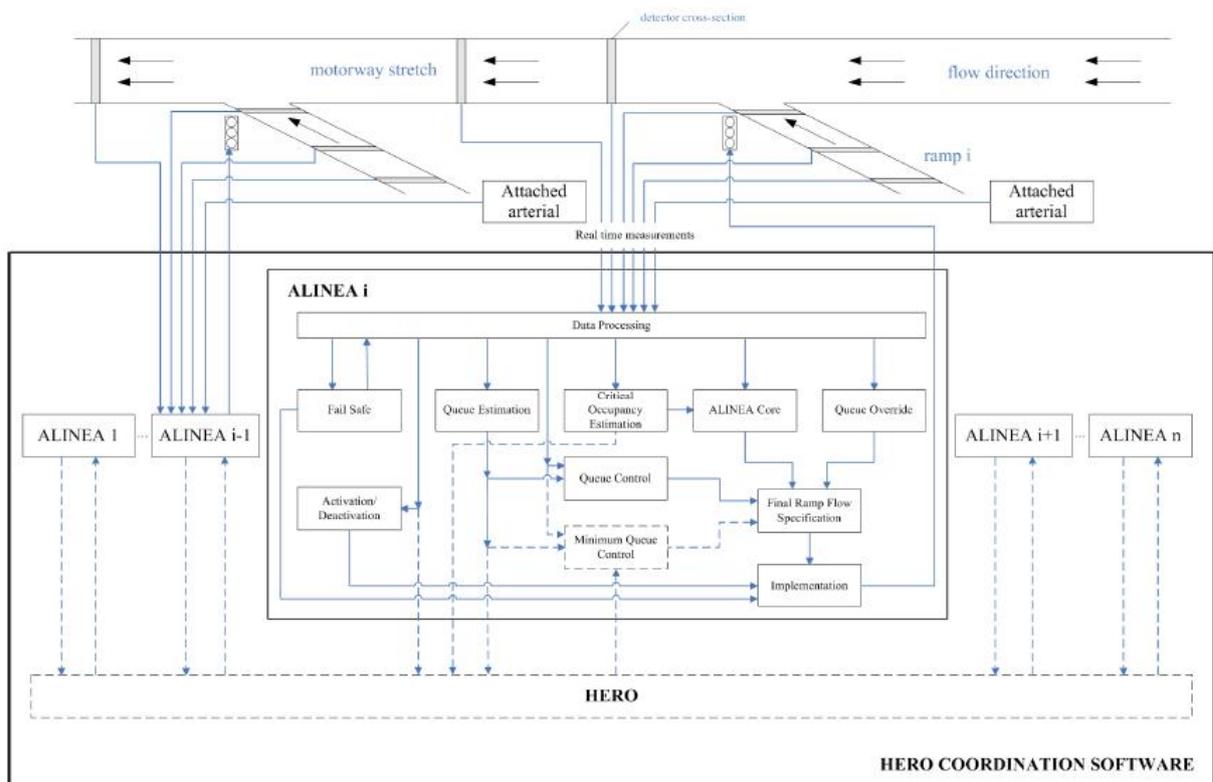


FIGURE 2.13 – Structure de la stratégie HERO

## Stratégie HERO

D'autres méthodes basées sur des heuristiques sont aussi utilisées comme c'est le cas avec la récente stratégie « HERO ».

En effet, la stratégie « HERO » (HEuristic Ramp metering coOrdination) est un schéma de coordination totalement réactif (facilement accessible pour les mesures temps réel) et ne recourt à aucun calcul temps réel des modèles ni de prédiction des perturbations externes. HERO est version étendue de l'algorithme ALINEA (incluant des heuristiques). Cette nouvelle stratégie vise à maximiser le débit en fixant le taux d'occupation critique comme consigne.

Une plateforme générique a été développée afin d'implémenter le mécanisme de coordination HERO, pour l'ensemble d'un réseau autoroutier en Australie [62]. La figure 2.13 montre un exemple de structure de la stratégie HERO.

## 2.4 Contrôle intégré

Les déplacements urbains et interurbains des personnes et des biens, l'accroissement du nombre des véhicules et des piétons aux intersections devient le premier véritable problème de circulation routière ayant nécessité la mise en œuvre d'une gestion du réseau routier. Ce problème a été résolu par l'installation d'agents de circulation et de feux de signalisation permettant de réguler les différents flux et ainsi d'éviter les collisions. Avec l'augmentation de la demande, les feux de signalisation ont un impact sur les performances du trafic. Ceci a conduit au développement de stratégies de contrôle des feux de plus en plus sophistiquées ayant pour objectif d'optimiser le réseau. En raison des congestions sur les artères principales et sur les autoroutes, les usagers tentent de réduire leurs temps de parcours en expérimentant des itinéraires alternatifs qui relient leurs origines et destinations respectives [48].

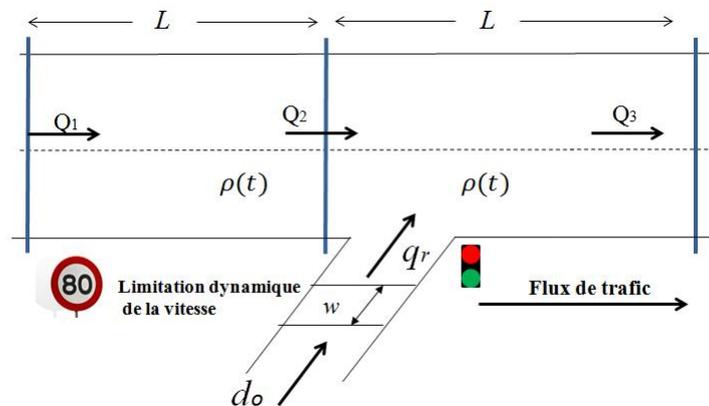


FIGURE 2.14 – Exemple de la commande intégrée par une limitation dynamique de la vitesse et le contrôle d'accès

Les variations de la demande, les événements exceptionnels, les incidents, les travaux sur la route peuvent modifier la capacité du réseau. Pour cette raison, des systèmes d'information, de guidage et de recommandation sont de plus en plus utilisés pour aider les conducteurs dans leur décision de choix d'itinéraire. La transmission d'information se fait par l'intermédiaire des panneaux à messages variables ou sur l'équipement embarqué dans le véhicule. La limitation variable (adaptative) de vitesse est une autre action d'exploitation du trafic typiquement adoptée sur les

autoroutes. La limitation de vitesse peut homogénéiser le trafic et empêcher des accidents dus aux ondes de choc dans le cas de congestion. Les files d'attente créées par le contrôle d'accès peuvent interférer et perturber le trafic sur le réseau de surface. L'information et le guidage motivent des conducteurs à changer leurs itinéraires habituels en fonction des conditions de circulation présentes. Ceci peut créer une surcharge de la circulation sur les itinéraires alternatifs explicitement ou implicitement recommandés [48]. Un système de contrôle de trafic est développé pour mettre en oeuvre des solutions pour réduire les congestions, pour augmenter l'efficacité et l'exploitation du réseau de transport d'une manière globale [2], [48], [61], [38], [60]. Le problème lié à l'analyse des interactions de différents type d'actions d'exploitation et la conception de stratégies de contrôle qui tiennent compte de toutes les actions activées sur un réseau sont connus sous le nom de contrôle intégré du trafic. Il faut noter que toutes les approches d'intégrations n'ont été testées qu'en simulations. Les autoroutes sont plutôt peu disposées à mettre en application ces stratégies en raison de leur complexité, et ce malgré les résultats des études en simulations qui indiquent toutes les améliorations significatives des conditions du trafic. Le contrôle intégré (Figure 2.14) comprend plusieurs actions de contrôles, y compris le signal de commande, le contrôle d'accès, le contrôle d'autoroute à l'autoroute, le contrôle par des panneaux à messages variables, les recommandations d'itinéraires, le guidage autoroutier [48].

## 2.5 Conclusion

Les travaux présentés dans ce chapitre ont permis de mettre l'accent sur les systèmes de transport intelligents, leur définition ainsi que les problèmes rencontrés. Fort est de constater que par leur caractère complexe, ils représentent un challenge en perpétuel développement, et à notre connaissance, peu abordé par la communauté d'automatique.

L'analyse fournie dans ce chapitre permet de souligner un ensemble d'enjeux financier, de santé et de sécurité due principalement aux problèmes de congestions du trafic. Ceci impose de mettre en oeuvre un certain nombre de mesures et d'actions efficaces pour la commande du trafic urbain, interurbain et autoroutier.

Dans ce contexte, plusieurs travaux ont été développés afin d'atteindre ces objectifs. Parmi les approches proposées, le contrôle d'accès autoroutier et dans les VRU apparaît comme le plus direct et relativement le moins coûteux à mettre en oeuvre. Dans cette optique, ce chapitre a permis de décrire un état de l'art sur les approches les plus populaires et les plus utilisées par les exploitants. Ainsi, les deux approches ; « Demande-Capacité » et « Taux d'Occupation » très populaires aux Etats-Unis ont été détaillées et analysées. Ce qui permet de conclure que de telles stratégies, par leur conception basée sur une régulation en boucle ouverte, sont très sensibles aux petites fluctuations et aussi aux différentes perturbations inhérentes au contexte temps-réel.

Parmi les approches basées sur une commande en boucle fermée, ALINEA semble être la mieux adaptée. Cependant, bien qu'elle soit implémentée dans la plupart des pays Européen, cette stratégie est basée sur un simple intégrateur alors que le trafic est un système non linéaire, décrit par des équations aux dérivées partielles. De plus, les modèles macroscopiques utilisés sont généralement très difficiles à calibrer.

Devant les difficultés de mise en oeuvre des lois de commande dues, entre autres, aux modèles complexes et incertains, on propose dans la suite de ce manuscrit une autre approche du contrôle

d'accès. En effet, les incertitudes des modèles peuvent être compensées par l'utilisation de la commande par mode glissant. On démontre par la suite que sa combinaison avec la platitude différentielle permet d'obtenir des résultats très satisfaisant.

Le chapitre suivant permet donc d'introduire ces deux concepts ainsi que leur utilisation pour le contrôle d'accès autoroutier et dans les VRU.

# Chapitre 3

## Nouveau algorithme du contrôle d'accès isolé

### 3.1 Introduction

Le chapitre précédent a permis de dresser un état de l'art des problématiques des systèmes de transport intelligents. Il a été l'occasion de mettre l'accent sur l'importance de la commande du trafic en général, et le contrôle d'accès en particulier. L'objectif principal est de résoudre les problèmes des congestions récurrentes, typiques aux heures de pointes et aux grands départs en vacances.

Plusieurs études ont démontrées que la commande du trafic reste la seule solution efficace et relativement à moindre coût comparée à la construction de nouvelles infrastructures, pour faire face aux congestions. L'analyse des différentes stratégies dédiées au contrôle d'accès a permis, par ailleurs, de souligner plusieurs insuffisances des algorithmes mis en œuvre. Rappelons par exemple, l'algorithme « Demande/Capacité » ou celui basé sur le taux d'occupation. Ces deux stratégies sont conçues sur techniques boucles ouvertes, et restent donc très sensibles aux perturbations [55].

Néanmoins, d'autres études menées dans le domaine ont démontrées que les algorithmes basés sur les techniques boucles fermées apportent des solutions très satisfaisantes lors de leurs implémentations sur le terrain [53], [6], [59].

Il est important de souligner que le caractère non linéaire du flux de trafic, décrit par ailleurs, à l'aide des équations aux dérivées partielles, pose encore des problèmes de linéarisation et donc de conception de lois de commande efficaces. Rappelons aussi, comme indiqué dans [58], que ces modèles<sup>1</sup> sont principalement basés sur des hypothèses et des observations issues du terrain. La seule loi physique qui soit vraie est celle décrivant la conservation des véhicules. Ceci pose de nombreux problèmes liés, entre autres aux incertitudes des modèles et au calibrage des différents paramètres mis en œuvre.

Les travaux présentés dans ce chapitre, tentent de s'affranchir de ces problèmes d'incertitudes des modèles et propose l'introduction du concept de la commande par mode glissant d'ordre supérieur (CMGOS) pour le contrôle d'accès autoroutier et sur les VRU. On démontre aussi que son association avec le platitude différentielle permet d'apporter des solutions efficaces et plus performantes

---

1. Principalement, les modèles maroscopiques, par ailleurs les mieux adaptés pour les actions de commande.

que celles implémentées sur le terrain.

La première partie de ce chapitre, rappelle les principes de ces deux concepts de commande et leur application au contrôle d'accès isolé. La seconde partie, décrit l'outil de simulation « METANET » utilisé par la suite pour la validation et l'évaluation de performances de l'approche proposée. La troisième partie est dédié à une étude comparative avec l'algorithme ALINEA<sup>2</sup>. Quelques discussions et analyses sont fournies dans la conclusion de ce chapitre.

## 3.2 Platitude différentielle et commande par mode glissant

La commande par platitude, introduite par M. Fliess et ses collaborateurs depuis plus de quinze ans, [17], [19], est une technique réputée par sa puissance et sa simplicité pour la planification et le suivi de trajectoires, et ce sans intégration d'équations différentielles. Néanmoins, bien qu'elle soit très appliquée dans de nombreux domaines de l'industrie, son introduction dans le domaine du trafic a été mis en œuvre, pour la première fois par [31].

Par ailleurs, la commande par mode glissant, mieux appropriée pour les systèmes incertains, a vu le jour durant les années 70 [75]. Cependant, son association avec la platitude différentielle n'a été réalisée qu'au début des années 2000 [71], [49]. Soulignons aussi que l'application de cette association dans le domaine du trafic a été introduite en 2008, en utilisant le concept du mode glissant de premier ordre [30]. Due aux problèmes de fortes oscillations, nous avons démontrés que l'approche de la CMGOS, apporte une solution plus robuste pour faire face à ces insuffisances.

Par la suite, nous allons détailler le principe de la platitude différentielle, ainsi que celui de la CMGOS.

### 3.2.1 Concept de la platitude différentielle

Le concept de la platitude différentielle est basé sur le formalisme de l'algèbre différentielle, d'où le terme de « *systèmes plats* », et est partagée par de nombreuses applications industrielles, et surtout bien enseignée en Allemagne particulièrement, a été introduite par M. Fliess et ses collaborateurs depuis les années 90, [17]. Notons que l'algèbre différentielle, discipline mathématique, a pour objectif de généraliser les méthodes de l'algèbre commutative à l'étude des systèmes d'équations différentielles non linéaires polynômiales. Elle est par ailleurs, basée sur les travaux de Ritt et Kolchin [66], [37].

La motivation première de la platitude différentielle, depuis son introduction dans le domaine de l'automatique par M. Fliess, était de traiter les problèmes d'inversion entrées-sorties des systèmes non linéaires, [15]. Cependant, M. Fliess a démontré son utilité pour l'étude des propriétés structurales telles que l'observabilité, la linéarisation, le découplage, etc.

Par la suite, on se focalise principalement sur la définition de la platitude différentielle ainsi qu'à quelques unes de ces propriétés. Les outils mathématiques, à la base de ce concept, notamment, de l'algèbre différentielle, tels que les notions de groupe, de corps et d'extension de corps ne sont pas abordés dans ce chapitre<sup>3</sup>.

---

2. Le choix de cet algorithme comme référence de comparaison est justifié par le fait qu'à notre connaissance, c'est celui qui soit implémenté sur la plupart des sites européens.

3. Voir [9], [42], [37], [66], pour les détails théoriques, par ailleurs, fort intéressants.

## Définition

On considère le système non linéaire suivant, exprimé dans l'espace d'état :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u); & x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m \\ z = g(x, u); & z \in \mathbb{R}^p \end{cases} \quad (3.1)$$

où  $n \geq m$  et  $f$  est un champ de vecteur analytique de dimension appropriée avec  $\text{rang} \frac{\partial f}{\partial u} = m$ , et  $g$ , une fonction analytique.

Le système décrit par l'équation (3.1) est dit différentiellement plat, s'il existe une sortie notée  $y = (y_1, \dots, y_m)$  de la forme :

$$y(t) = \Phi(x, u, \dot{u}, \dots, u^{(l)}) \quad (3.2)$$

telle que les variables d'état, de sortie et de commande,  $x$ ,  $z$ , et  $u$ , respectivement, peuvent être exprimées en fonction de cette sortie plate  $y$  et d'un nombre de ses dérivées dans le temps :

$$\begin{cases} x = \Phi_1(y, \dot{y}, \ddot{y}, \dots, y^{(r)}) \\ u = \Phi_2(y, \dot{y}, \ddot{y}, \dots, y^{(r+1)}) \\ z = \Phi_3(y, \dot{y}, \ddot{y}, \dots, y^{(r)}) \end{cases} \quad (3.3)$$

avec  $r$ , un entier positif.

Dans ce cas, à toute trajectoire de référence arbitraire  $t \mapsto y$  suffisamment dérivable, correspond une trajectoire :

$$t \mapsto \begin{pmatrix} x(t) \\ u(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x = \Phi_1(y, \dot{y}, \ddot{y}, \dots, y^{(r)}) \\ u = \Phi_2(y, \dot{y}, \ddot{y}, \dots, y^{(r+1)}) \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

qui vérifie identiquement les équations du système.

Inversement, à toute trajectoire  $t \mapsto (x(t), u(t))$ , suffisamment dérivable et vérifiant les équations du système, correspond une trajectoire  $t \mapsto y(t) = \Psi(x, u, \dot{u}, \ddot{u}, \dots, u^{(l)})$ .

Soulignons que la correspondance des trajectoires (voir Figure 3.1, où  $\Omega$  est un « isomorphisme de Lie-Bäcklund ») est effectuée sans intégration d'aucune équation différentielle du système [43], [47].

Comme souligné dans plusieurs travaux (voir [19], [67], par exemple.), la platitude différentielle permet d'apporter des solutions simples à des problèmes de génération et de planification de trajectoires explicites. En effet, puisque le comportement d'un système différentiellement plat est déterminé par les sorties plates, on peut donc planifier les trajectoires dans l'espace de sortie et les relier ensuite aux entrées appropriées. Ainsi, à partir des trajectoires de  $y$ , on peut en déduire immédiatement celles de l'état  $x$  et de l'entrée  $u$ , par projections dans l'espace d'état avec une relation algébrique, [16], [70],[68].

Bien que la sortie plate est généralement « fictive », de nombreux systèmes industriels possèdent des sorties plates qui ont un sens et une interprétation physique. Il est important de souligner que les sorties plates peuvent ne pas être définies pour toutes les valeurs de l'état. Ainsi, un système

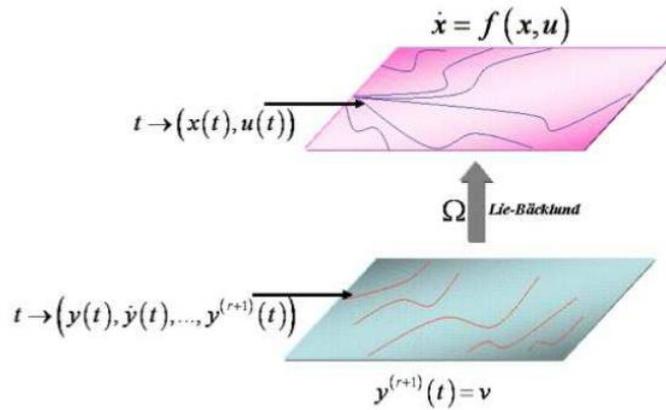


FIGURE 3.1 – Exemple de correspondance de trajectoires

peut être plat sur un intervalle ouvert. Réciproquement, l'expression de l'état  $x$  en fonction de la sortie plate et de ses dérivées dans le temps, peut n'être que locale [31] [70].

La notion de la platitude présentée dans le paragraphe 3.2.1 a été définie pour des systèmes représentés par des variables d'état explicites. Cependant, cette définition est aussi valide pour toute représentation d'état exprimée sous la forme :

$$\Phi \left( x, \dot{x}, \ddot{x}, \dots, x^{(n)}, u, \dot{u}, \ddot{u}, \dots, u^{(m)} \right) = 0 \quad (3.5)$$

### Quelques propriétés de la platitude différentielle

1. La définition présentée ci-dessus, valable pour les systèmes continus, peut-être facilement appliquée aux systèmes discrets. On remplace alors la dérivation continue par une avance.
2. Le nombre de sorties plates est égal au nombre de variables indépendantes de commande.
3. Lorsque la sortie plate  $y$  dépend de  $u, \dot{u}, \ddot{u}, \dots, u^{(\delta)}$ , on parle alors de  $\delta$ -platitude.

### Relation entre platitude et commandabilité

La platitude différentielle et la commandabilité sont deux notions qui sont étroitement liées. [19], ont démontrés que tout système plat est commandable. Cependant, l'inverse n'est pas vrai. Autrement dit, un système commandable n'est pas nécessairement plat.

Considérons une système linéaire stationnaire de dimension finie exprimé par :

$$\dot{x}(t) = Ax + Bu ; \quad x \in \mathbb{R}^n \quad \text{et} \quad u \in \mathbb{R}^m \quad (3.6)$$

Le système (3.6) est commandable, si et seulement si, il vérifie le critère de Kalman suivant :

$$\text{rang} [B \mid AB \mid \dots \mid A^{n-1}B] = n \quad (3.7)$$

Le système (3.6), peut être exprimé sous la forme canonique, dite de, « Brunovsky » à l'aide d'un changement de coordonnées et un bouclage par retour d'état statique. On obtient alors l'expression suivante :

$$\begin{cases} z_1^{\gamma_1} = v_1 \\ z_2^{\gamma_2} = v_2 \\ \vdots \\ z_m^{\gamma_m} = v_m \end{cases} \quad (3.8)$$

$v_i, i = 1, 2, \dots, v_m$  sont les variables de commande.  $\gamma_i, i = 1, 2, \dots, m$  sont les indices de commandabilité appelés aussi « indices de Kronecker ». L'ensemble  $z = \{z_1, z_2, \dots, z_m\}$ , représente le vecteur des sorties plates. A partir de cette transformation, [19] ont démontrés le théorème suivant : Un système linéaire est plat si et seulement si il est commandable.

### Génération de trajectoires par platitude différentielle

La génération de trajectoires

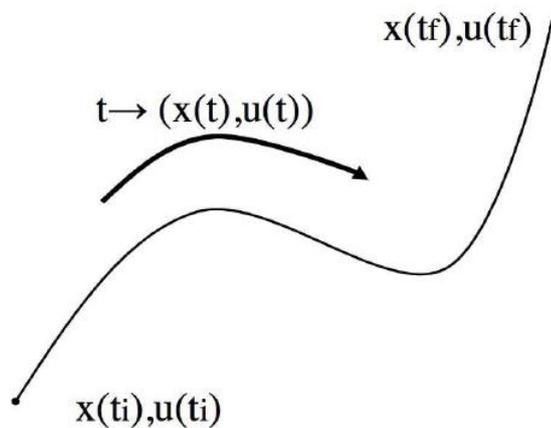


FIGURE 3.2 – Exemple de génération de trajectoire

Néanmoins, il est important de souligner qu'en général, il n'est pas facile de trouver des trajectoires pour un système donné. Par exemple, une application, notée,  $t \mapsto (x(t), u(t))$  n'est pas nécessairement une solution de l'équation (3.1). Autrement dit, elle ne satisfait pas l'expression suivante :

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t))$$

Toute fois, dès que l'on connaît une sortie plate d'un système, toutes les trajectoires de l'état  $x$  et  $u$ , peuvent être générées sous la forme définie par l'équation (3.4). Puisque l'ensemble des variables du système est exprimé en fonction de la sortie plate et de ces dérivées, cela signifie que les équations différentielles du systèmes sont identiquement vérifiées [47].

Dans ce cas, la génération de trajectoires dont les conditions initiales et finales sont connues à l'avance, revient à calculer la trajectoire de la sortie plate correspondante. Cela évite ainsi d'intégrer les équations différentielles représentant le système. Plus clairement, si on suppose que les vraibles  $x$  et  $u$  sont définies par (3.1), et puisque les conditions initiales et finales de ces variables sont connues, alors, grâce à la surjectivité de  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$  permet d'obtenir les valeurs des conditions initiales et finales de  $(y, \dot{y}, \ddot{y}, \dots, y^{(r+1)})$ . Pour cela, il suffit de trouver une trajectoire de référence

$t \mapsto y(t)$  dérivable au moins  $r + 1$  fois, qui satisfait ces conditions initiales et finales puisque  $x$  et  $u$  s'obtiennent à partir de  $y$  et de ses dérivées jusqu'à l'ordre  $r + 1$  grâce aux expressions de (3.1).

Puisque la trajectoire  $t \mapsto y(t)$ , ne doit vérifier aucune équation différentielle, la méthode généralement utilisée pour la construire est celle basée sur l'interpolation polynômiale. Notons, comme indiqué dans [68], [70], que les coefficients du polynôme d'interpolation sont obtenus, connaissant les valeurs des conditions initiales et finales,  $t = t_i$  et  $t = t_f$ , respectivement, de  $y$ , grâce à la résolution d'un système d'équations linéaires [47].

Généralement, si à l'instant  $t = 0$  et  $t = t_f$ , on dispose de  $\zeta$  conditions sur les dérivées de la sortie plate jusqu'à l'ordre  $\zeta$ , alors il faut un polynôme de degré  $\zeta - 1$  pour les satisfaire.

*Exemple 1.1.* On considère le cas où pour calculer la commande  $u$ , il soit nécessaire de disposer des dérivées de la sortie plate  $y$  jusqu'à l'ordre 4. Supposons que  $u$  doit être continue aux instants initial et final,  $t = 0$  et  $t = t_f$ , respectivement. On obtient alors, 8 conditions sur les dérivées de  $y$  jusqu'à l'ordre 3 et pour les satisfaire, il faut un polynôme de degré  $8 - 1 = 7$ . Soit :

$$y^*(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 + a_6t^6 + a_7t^7 \quad (3.9)$$

Remarquons que la valeur de  $a_0$  s'obtienne immédiatement de la valeur de  $y^*(0)$ . Par ailleurs, les conditions sur les dérivées ;  $\dot{y}^* = 0$ ,  $\ddot{y}^* = 0$  et  $y^{(3)} = 0$  impliquent que  $a_1 = a_2 = a_3 = 0$ . Les coefficients,  $a_4$ ,  $a_5$ ,  $a_6$  et  $a_7$  sont calculés grâce au système d'équations linéaires suivant :

$$\begin{cases} y^*(t_f) - y^*(0) = & a_4t_f^4 + a_5t_f^5 + a_6t_f^6 + a_7t_f^7 \\ 0 = & 4a_4t_f^3 + 5a_5t_f^4 + 6a_6t_f^5 + 7a_7t_f^6 \\ 0 = & 12a_4t_f^2 + 20a_5t_f^3 + 30a_6t_f^4 + 42a_7t_f^5 \\ 0 = & 24a_4t_f + 60a_5t_f^2 + 120a_6t_f^3 + 210a_7t_f^4 \end{cases} \quad (3.10)$$

Posons  $\alpha_{i-4} = \frac{a_i t_f^i}{y^*(t_f) - y^*(0)}$  ;  $i = 4, \dots, 7$ , le polynôme devient donc :

$$y^*(t) = y^*(0) + (y^*(t_f) - y^*(0)) \frac{t^4}{t_f^4} \left( \alpha_0 + \alpha_1 \frac{t}{t_f} + \alpha_2 \frac{t^2}{t_f^2} + \alpha_3 \frac{t^3}{t_f^3} \right) \quad (3.11)$$

La résolution du système d'équations linéaires (3.12), qui ne dépend plus des conditions initiales et finales, permet de calculer les coefficients  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  et  $\alpha_3$ .

$$\begin{cases} 1 = & \alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \\ 0 = & 4\alpha_0 + 5\alpha_1 + 6\alpha_2 + 7\alpha_3 \\ 0 = & 12\alpha_0 + 20\alpha_1 + 30\alpha_2 + 42\alpha_3 \\ 0 = & 24\alpha_0 + 60\alpha_1 + 120\alpha_2 + 210\alpha_3 \end{cases} \implies \begin{cases} \alpha_0 = 35 & \alpha_1 = -84 \\ \alpha_2 = 70 & \alpha_3 = -20 \end{cases} \quad (3.12)$$

Soulignons que ce calcul de coefficients est effectué une fois pour toute et peut, donc, être réutilisé pour d'autres problèmes de planification de trajectoires.

## Suivi de trajectoires

Le suivi de trajectoires appelé aussi, « *commande en boucle fermée* », consiste à ajouter à la boucle ouverte, un terme de correction afin que le système atteigne asymptotiquement la trajectoire

de référence spécifiée.

Le suivi de trajectoires, peut être assuré par ce qu'on appelle « *bouclage endogène* ». Notons,  $e_i = y_i - y_i^*$ , ( $i = 1, \dots, m$ ), l'erreur entre la sortie plate  $y$  et la trajectoire de référence  $y^*$ . On peut alors construire un bouclage dynamique endogène tel que le système peut-être écrit sous la forme :

$$v = y^{(r+1)} \quad (3.13)$$

Si, par la suite on pose

$$v^* = (y^*)^{(r+1)} \quad (3.14)$$

l'équation de l'erreur devient :

$$e^{r+1} = v - v^* \quad (3.15)$$

Il suffit alors de poser composante par composante :

$$v_i = v_i^* + \sum_{j=0}^r K_{i,j} e_i^{(j)}; \quad i = 1, \dots, m \quad (3.16)$$

$K_{i,j}$  représentent les gains choisis de façon à ce que les  $m$  polynômes  $s^{r+1} - \sum_{j=0}^r K_{i,j} s^{(j)}$  possèdent toutes des racines à partie réelle strictement négative. Dans ce cas, l'erreur  $e$  converge exponentiellement vers 0.

$$e_i^{(r+1)} = - \sum_{j=0}^r K_{i,j} e_i^{(j)}; \quad i = 1, \dots, m$$

De cette manière, la sortie plate  $y$  ainsi que toutes ses dérivées jusqu'à l'ordre  $r+1$  convergent exponentiellement vers leurs valeurs de références  $y^*, \dots, (y^*)^{(r+1)}$ . Enfin, en utilisant les expressions de l'équation suivante (3.17) :

$$\begin{cases} x = \Phi_1(y, \dot{y}, \ddot{y}, \dots, y^{(r)}) \\ u = \Phi_2(y, \dot{y}, \ddot{y}, \dots, y^{(r+1)}) \end{cases} \quad (3.17)$$

on en déduit que toutes les variables d'état  $x$  et de la commande  $u$  du système d'origine convergent, également, localement et exponentiellement vers leurs trajectoires de références [19].

Comme indiqué dans [67], il est important de souligner que souvent, on confond, à tort, la platitude différentielle et la linéarisation par retour d'état dynamique. Il est vrai que tout système plat peut-être linéarisé par retour d'état dynamique (sous certaines conditions de régularité, qui sont souvent satisfaites). Cependant, la platitude est une propriété du système et ceci n'implique pas que l'on souhaite d'abord transformer le système, via un retour d'état dynamique et des changements de coordonnées, en un système linéaire [50].

Nous avons, dans le paragraphe 3.2.1, définie brièvement, le concept de la platitude différentielle. Ceci nous a permis de mettre l'accent sur quelques propriétés importantes de ce formalisme ainsi que les notions principales de planification et suivi de trajectoires. Pour le suivi de trajectoires, nous avons expliqués rapidement le principe de bouclage endogène. Cependant, pour les systèmes incertains pour lesquels les modèles de description sont mal connus ou contiennent des erreurs, comme c'est le cas des systèmes du flux de trafic, un bouclage par mode glissant s'avère

intéressant à exploiter [71]. Le paragraphe suivant définit la notion de la commande par mode glissant ainsi que l'algorithme utilisé par la suite de nos travaux. Il est important souligner que nous nous focalisons principalement sur la commande par mode glissant d'ordre supérieur.

### 3.2.2 Commande par mode glissant

Les premiers travaux sur la commande par mode glissant **SMG**, appelée aussi commande à structure variable, remontent aux années soixante et ont été développés dans l'ancienne U.R.S.S. La genèse de ce type de commande est due aux travaux du mathématicien Fillipov [13] sur la résolution des équations différentielles dont le second membre est discontinu. Cependant, la véritable utilisation de cette technique de commande remonte aux travaux Itkis [33] et d'Utkin [75].

Le principe de la CMG, largement utilisée dans le cas de la commande des systèmes linéaires et non linéaires, est de contraindre le système commandé à atteindre une surface, dite de glissement, prédéfinie et d'y rester même en présence de perturbations. Le comportement dynamique obtenu, appelé « régime glissant », est définie par les paramètres de cette surface.

L'intérêt croissant de cette technique se justifie par sa simplicité de conception et sa robustesse. De plus, la CMG est caractérisée par les avantages suivants :

- insensibilité aux variations des paramètres du système et aux perturbations extérieures,
- insensibilité aux erreurs de modélisation,
- adaptation du comportement dynamique du système par le choix approprié de la fonction de commutation,
- robustesse face aux perturbations qui peuvent intervenir d'une manière colinéaire avec l'entrée<sup>4</sup>.
- robustesse aux erreurs de modélisation, . . .

Cependant, bien qu'elle soit très utilisée, la CMS souffrait d'un inconvénient majeur des oscillations liées aux commutations de la commande. Ces oscillations à haute fréquence apparaissent au voisinage de la surface de glissement<sup>5</sup>. De plus, elles peuvent exciter les dynamiques non modélisées ce qui peut conduire à des instabilités. Ce qui justifie les nombreux travaux visant à proposer des algorithmes de CMG afin de supprimer ou du moins atténuer ces phénomènes [65], [46]. Dans ce paragraphe, nous nous focalisons sur les différentes structures de base des systèmes à structure variable ainsi que sur le principe de la CMG.

#### Systèmes à structure variable

Selon [76], [4], on distingue trois configurations de base pour la synthèse de la commande par mode de glissement pour les systèmes à structure variable :

1. Structure par commutation au niveau de l'organe de commande,
2. Structure faisant intervenir la commutation au niveau de la contre-réaction d'état,
3. Structure par commutation au niveau de l'organe de commande et ajout d'une commande équivalente<sup>6</sup>.

---

4. Condition de recouvrement (matching condition en anglais)

5. Ces phénomènes sont connus sous le nom de réticence (Chattering, en anglais).

6. C'est cette structure qui est retenue par la suite pour la synthèse de la commande utilisant conjointement la platitude différentielle et la CMG d'ordre supérieur.

La première structure qui est aussi la plus simple et la plus classique, correspond à un fonctionnement type « *tout ou rien* » [76].

Considérons l'état  $x$  du système  $\mathfrak{S}$ . Soit  $s(x)$  la surface de glissement. Selon la position de cette surface, la commande  $u$  de commutation est exprimée par (Figure 3.3) :

$$u = \begin{cases} u_{max} & \text{Si } s(x) > 0 \\ u_{min} & \text{Si } s(x) < 0 \end{cases} \quad (3.18)$$

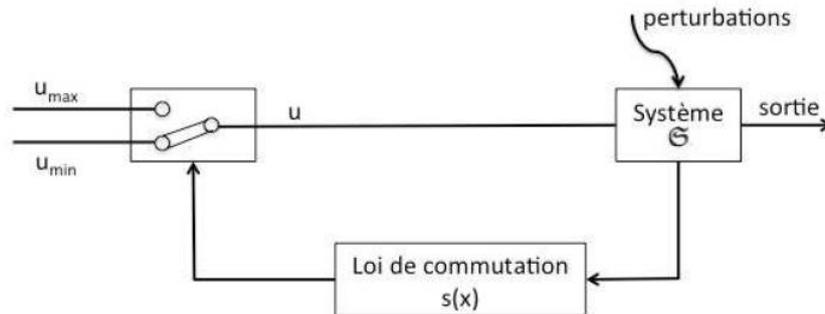


FIGURE 3.3 – Principe de la commande par commutation au niveau de l'organe de commande

La seconde structure, illustrée dans la Figure 3.4, représente la structure qui sollicite moins la commande. Elle est basée sur la commande par contre réaction d'état classique où le réglage dynamique du système est assuré grâce aux gains de réglage. Ainsi, la non linéarité provient de la commutation entre les gains et donc on crée une commutation au niveau de la dynamique du système lui-même [76]. Selon la position du commutateur, le vecteur d'état  $x$  est mis en contre-réaction d'état selon les valeurs de  $K_1$  et  $K_2$ , ce qui se traduit par la loi de commutation  $s(x)$  suivante :

$$u = \begin{cases} -K_1^T(x) & \text{Si } s(x) > 0 \\ -K_2^T(x) & \text{Si } s(x) < 0 \end{cases} \quad (3.19)$$

Notons que le comportement du système  $\mathfrak{S}$  est définie par  $s(x) = 0$ .

La troisième configuration porte sur la structure par commutation au niveau de l'organe de commande et ajout d'une commande équivalente (voir Figure 3.5). Simple à réaliser, cette structure a été utilisée dans plusieurs applications industrielles [4]. L'avantage principal de l'ajout de la commande équivalente est de pouvoir prépositionner l'état futur du système qui est la valeur désirée en régime permanent. De plus, il permet de réduire les phénomènes de réticences (chattering).

La commande obtenue s'écrit donc :

$$u = \begin{cases} u_{eq} + u_d & \text{Si } s(x) > 0 \\ u_{eq} - u_d & \text{Si } s(x) < 0 \end{cases} \quad (3.20)$$

Dans cette équation (3.20), le terme  $u_d$ , de commutation, assure principalement la convergence des trajectoires vers l'état désiré et son maintien.

C'est donc cette dernière structure que nous utilisons par la suite, conjointement avec la platitude différentielle pour la conception de l'algorithme dédié au contrôle d'accès. Mais, tout d'abord, nous rappelons, dans le paragraphe suivant, les grandes lignes de la commande par mode glissant.

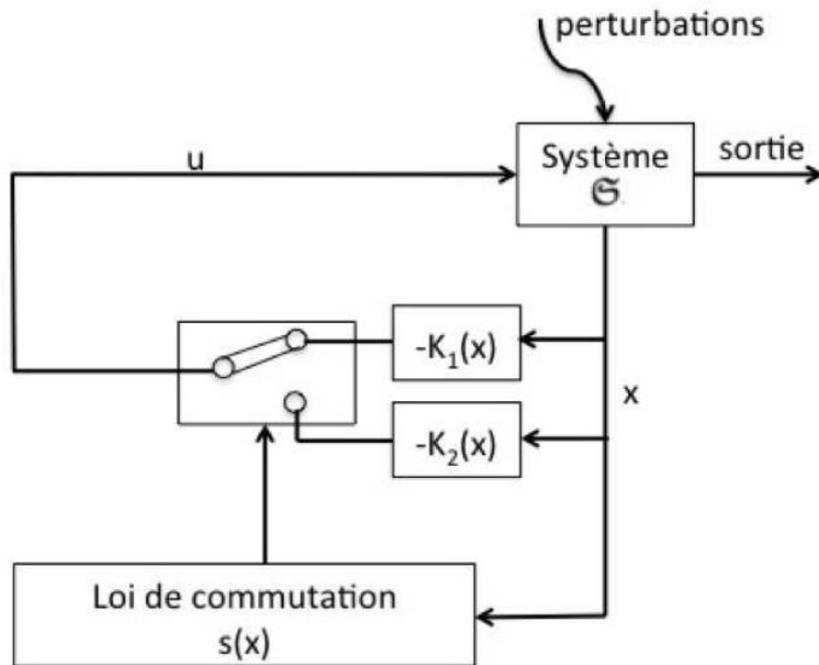


FIGURE 3.4 – Principe de la commande par commutation au niveau de la contre-réaction d'état

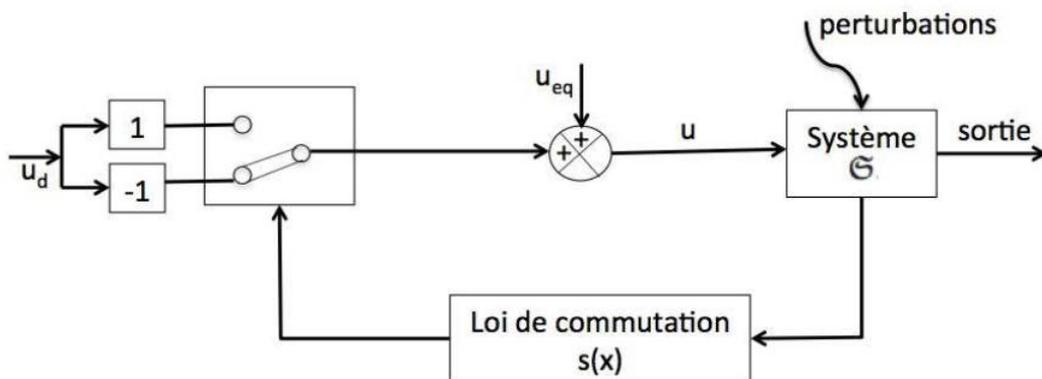


FIGURE 3.5 – Principe de la commande par commutation et ajout d'une commande équivalente

## Principe de la commande par mode glissant

L'objectif de la commande par mode glissant (**CMG**) est de forcer le système à converger vers une surface prédéfinie, appelée « *surface de glissement* », en fonction des objectifs de la commande, fixant ainsi la dynamique en boucle fermée, puis de synthétiser une commande discontinue (dite mode de glissement), permettant aux trajectoires du système d'atteindre et de rester sur cette surface.

### Définition du régime de glissement

Considérons la classe de systèmes non linéaires affines décrite par l'expression suivante :

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (3.21)$$

où  $x \in \mathbf{R}^n$  est le vecteur d'état,  $u \in \mathbf{R}^m$  le vecteur qui contient à la fois le terme de commande et de discontinuité.  $f$  et  $g$  sont des champs de vecteurs suffisamment différentiables dans  $\mathbf{R}$ .

A l'origine, les premiers régulateurs basés sur ce type de modèles ont été des simples relais [76], faciles à mettre en œuvre. Ils représentent la genèse de la commande à structure variable. Par la suite, de nombreux travaux ont proposés des améliorations considérables en considérant que le comportement du système est décrit par deux équations différentielles distinctes, suivant que l'évolution du système se trouve dans une région supérieure ou inférieure à une surface appelée « surface de glissement ou de commutation ». Cette surface notée  $s(x, t)$  est une fonction continue, sépare l'espace d'état en deux parties disjointes :  $s(x, t) > 0$  et  $s(x, t) < 0$ .

La commande  $u$  dite à structure variable, change la structure du système en fonction des différentes commandes dans chacune des parties de l'espace d'état du système. On a alors :

$$u = \begin{cases} u^+(x) & \text{Si } s(x, t) > 0 \\ u^-(x) & \text{Si } s(x, t) < 0 \end{cases} \quad (3.22)$$

$u^+ \neq u^-$  sont des fonctions continues.

L'objectif de cette commande est de forcer les trajectoires du système à atteindre la surface de glissement  $s$  et d'y rester au voisinage et ce en dépit de la présence de perturbations. On parle alors de surface de glissement attractive. Le régime de glissement existe si :

$$\lim_{s \rightarrow 0^+} \dot{s} < 0 \quad \text{et} \quad \lim_{s \rightarrow 0^-} \dot{s} > 0 \quad (3.23)$$

La condition (3.23) est équivalente à celle décrite dans l'expression (3.24)

$$s\dot{s} < 0 \quad (3.24)$$

Soulignons que cette condition sert à obtenir les gains utilisés pour la commande. Notons aussi, que la commande  $u$  n'est pas définie pour  $s = 0$ , ce qui implique que les trajectoires du système ne sont pas définies sur cette surface. Enfin, la surface de glissement peut être linéaire ou non linéaire. Sa construction doit être assurée que le système ait une dynamique désirée. Généralement le choix de cette surface est fait avec un degré relatif égal à 1, c-à-d, que la dérivée de  $s$  par rapport au temps fait apparaître la commande  $u$  explicitement.

## Synthèse de la commande par mode glissant

Nous avons souligné précédemment, que la structure par commutation au niveau de l'organe de commande et ajout d'une commande équivalente est composée d'une commande continue  $u_{eq}$ , et d'une autre discontinue, notée  $u_d$ . On obtient alors :

$$u = u_{eq} + u_d \quad (3.25)$$

$u_d$  peut être assimilé à un terme de haute fréquence alors que  $u_{eq}$ , celui de basse fréquence. Pour  $u_d$ , la forme générale la plus utilisée est définie par :

$$u_d = -K \text{sign}(s) \quad (3.26)$$

où  $K$  est une constante positive et  $\text{sign}$  représente la fonction signe classique définie comme suit :

$$\text{sign}(s) = \begin{cases} +1 & \text{Si } s > 0 \\ 0 & \text{Si } s = 0 \\ -1 & \text{Si } s < 0 \end{cases} \quad (3.27)$$

Le terme (3.26), force les dynamiques du système à converger vers la surface de glissement tout en assurant l'insensibilité du système vis-à-vis des perturbations et des incertitudes. Ainsi, en présence d'incertitudes par exemple, le système ne glisse pas parfaitement sur la surface mais il la quitte. Cependant, le terme discontinue est chargé de l'y ramener car la surface est attractive. Ce qui justifie la robustesse de la CMG.

L'un des inconvénients majeur de la CMG, notamment du premier ordre concerne le phénomène de réticence ou chattering. Il se caractérise par de fortes oscillations autour de la surface de glissement Figure 3.6

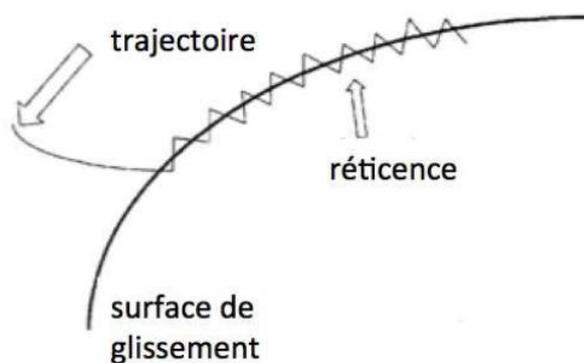


FIGURE 3.6 – Illustration du phénomène de réticence (chattering)

Plusieurs travaux (voir e.g. [65] et ses bibliographies), ont été développés pour alléger ou éliminer ses phénomènes. Dans nos travaux, nous utilisons la CMG d'ordre supérieur.

## Commande par glissant d'ordre supérieur (CMGOS)

La commande par mode glissant d'ordre supérieur (**CMGOS**), est en fait un mouvement sur l'ensemble des discontinuités d'un système dynamique dans le sens de Filippov [65]. Une telle

approche a été développée par [46]. L'objectif est d'éliminer les phénomènes de réticences tout en gardant les propriétés principales de la CMG d'ordre 1. Elle est caractérisée par le fait que la commande discontinue agit sur l'ordre supérieur des dérivées temporelles de la variable de glissement, au lieu d'agir, comme c'est le cas de la CMG d'ordre 1, sur la première dérivée. L'ordre du mode de glissement est celui des premières dérivées de la variable de glissement.

**Definition 3.2.1** [46] :

Soit le système non linéaire définie par l'équation (3.21). L'ensemble :

$$S^r = \{x \mid s(x,t) = \dot{s}(x,t) = \dots = s^{r-1}(x,t) = 0\} \quad (3.28)$$

appelé « ensemble de glissement d'ordre  $r$  », est non vide ; les trajectoires sur  $S^r$  sont appelées « régime glissant d'ordre  $r$  » par rapport à la variable de glissement  $s$ .

**Definition 3.2.2** La commande par mode glissant d'ordre  $r$  permet la stabilisation à zéro en un temps fini de la variable de glissement  $s$  et de ses  $r - 1$  dérivées dans le temps, en définissant une fonction de commande discontinue convenable.

Parmi les algorithmes dédiés à la CMGOS et plus particulièrement d'ordre 2 citons celui qui est appelé « *Algorithm with a prescribed convergence law*<sup>7</sup> ».

Cet algorithme a été développé pour les systèmes avec un degré relatif égal à 1, afin d'éliminer les phénomènes de réticences dans le système à structure variable.

La loi de commande  $u$  est définie grâce aux expressions suivantes :

$$u = u_1 + u_2 \quad (3.29)$$

avec :

$$\dot{u}_1 = \begin{cases} -u & \text{Si } |u| > 1 \\ -\lambda_s \text{sign}(s - g(s)) & \text{Si } |u| \leq 1 \end{cases}$$

$$g(s) = -\gamma |s|^\rho \text{sign}(s)$$

où  $\gamma$  et  $\lambda_s$  sont des constantes positive. Le choix de  $\rho = \frac{1}{2}$ , assure un mode de glissement d'ordre 2. Dans les deux sections précédentes, nous avons définies les deux concepts nécessaires pour le développement du nouveau algorithme du contrôle d'accès. Cet algorithme est détaillé dans la section suivante.

### 3.3 Algorithme du contrôle d'accès

Le premier chapitre, a été l'occasion de définir le principe du contrôle d'accès (CA) autoroutier et sur les VRU. Il a permis aussi de démontrer l'efficacité de cette mesure de commande pour réduire ou éliminer les congestions. Cependant, les algorithmes utilisés se heurtent souvent aux problèmes délicats de linéarisation des modèles macroscopiques, qui par nature sont basés sur des équations aux dérivées partielles. De plus, comme souligné plus haut, ces modèles sont très approximatifs, la seule loi valide et celle de la conservation des véhicules. Notre objectif donc est d'apporter une nouvelle solution en tirant profit de la combinaison de la platitude différentielle et la CMGOS. Le premier concept permet la génération de trajectoires (commande en boucle ouverte)

7. C'est cet algorithme qui est utilisé par la suite de nos travaux.

d'une manière sophistiquée et simple sans intégration d'équation différentielle. Le second, assure la convergence et le suivi de ces trajectoires en tenant compte des incertitudes inhérentes aux modèles macroscopiques.

Afin d'illustrer notre nouvelle approche, considérons la section autoroutière de longueur  $L$ , illustrée dans la Figure 3.7.

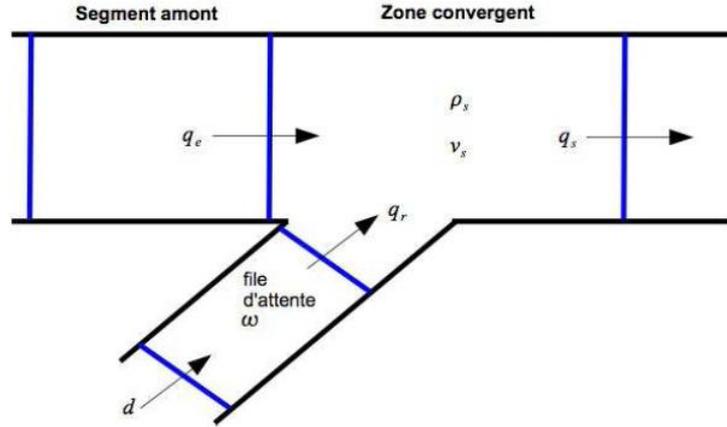


FIGURE 3.7 – Exemple d'une section autoroutière

Rappelons que l'objectif du CA est d'agir sur le débit d'entrée de la rampe d'accès afin de maintenir la densité  $\rho_s$  en  $veh/km$  (taux d'occupation, dans la pratique), au alentours d'une valeur critique, notée  $\rho_c$ .

Dans ce qui suit, on se base principalement sur l'équation de conservation discrétisée dans l'espace<sup>8</sup>.

$$\dot{\rho}_s(t) = \frac{1}{L\lambda} [q_e(t) - q_s(t) + q_r(t)] \quad (3.30)$$

où,  $\lambda$  est le nombre de voies dans la section autoroutière.  $q_e$ ,  $q_s$  et  $q_r$  représentent, le débit d'entrée, de sortie et de la rampe, respectivement et sont mesurés en nombre de véhicules par heure.

Le débit de sortie  $q_s$  est relié aux autres variables du trafic (densité et vitesse  $v_s(t)$ ) par la relation suivante :

$$q_s(t) = \rho_s(t)v_s(t)\lambda \quad (3.31)$$

Ces deux expressions (3.30) et (3.31) sont complétées par la relation suivante dite « *Diagramme fondamentale* » qui permet de définir les zones fluide et congestionnée afin de décider de l'opportunité de mettre en œuvre la commande<sup>9</sup>.

$$V_e(\rho_s) = v_f \exp \left[ -\frac{1}{\alpha} \left( \frac{\rho_s}{\rho_c} \right)^\alpha \right] \quad (3.32)$$

8. Le modèle de simulation « *METANET* » [39], utilisé sera détaillé plus loin.

9. Bien qu'il existe plusieurs variantes de diagrammes fondamentaux, nous avons choisis celui due à May [52], car il s'approche plus de la réalité du terrain.

$V_e$  représente la vitesse à l'équilibre,  $v_f$  est la vitesse libre, c'est-à-dire, la vitesse maximale à laquelle les conducteurs se déplacent sans gênes.  $\alpha$  paramètre du modèle.

Les travaux de [31], ont démontrés que le système décrit par l'équation (3.30) est plat. La sortie plate est  $y = \rho_s$ . On peut donc, facilement, exprimer la commande noté  $r(t)$  par :

$$\begin{cases} y(t) = \rho_s(t) \\ r(t) = L\dot{y}(t) + y(t)v_s(t) - q_e(t); q_s(t) = y(t)v_s(t) \end{cases} \quad (3.33)$$

L'équation de la variable d'état permet de choisir la trajectoire souhaitable pour la densité (la sortie plate), l'expression de la variable de commande permet d'ajouter des contraintes additionnelles à cette trajectoire. On a ainsi toutes les propriétés du système qui sont exprimées par une telle paramétrisation.

### 3.3.1 Génération de trajectoire

L'équation (3.33), correspond à une commande boucle ouverte. Pour définir la planification de trajectoire, on choisit une trajectoire de référence  $y^*$  construite à partir des conditions initiales et finales en utilisant une interpolation polynomiale dans le temps, qui est la mieux adaptée puisqu'elle ne nécessite pas un grand effort de calcul dans un environnement en temps réel [70]. Ainsi, à partir des conditions initiales et finales de la densité  $y(t_i) = y_i$ ,  $\dot{y}(t_i) = 0$  et  $y(t_f) = y_f$ ,  $\dot{y}(t_f) = 0$ , une trajectoire de la densité de référence peut être par exemple :

$$y^*(t) = \begin{cases} y_i & \text{si } t < t_i \\ y_i + (y_f - y_i)\sigma(t, t_i, t_f) & \text{si } t_i \leq t \leq t_f \\ y_f & \text{si } t > t_f \end{cases} \quad (3.34)$$

où  $\sigma(t, t_i, t_f)$  est une fonction polynomiale dont les coefficients sont calculés selon la procédure de l'exemple 1.1 :

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < t_i \\ 3 \left( \frac{t-t_i}{t_f-t_i} \right)^2 - 2 \left( \frac{t-t_i}{t_f-t_i} \right)^3 & \text{si } t_i \leq t \leq t_f \\ 1 & \text{si } t > t_f \end{cases} \quad (3.35)$$

La commande nominale en l'absence de perturbations et d'erreurs de modélisation est donc :

$$r^*(t) = L\dot{y}^* + q_s(t) - q_e(t) \quad (3.36)$$

### 3.3.2 Suivi de trajectoire par mode glissant

Les stratégies de commande par retour d'état endogène spécifiées sur la base d'un comportement de la sortie linéarisée, ne sont généralement pas robustes vis-à-vis des perturbations externes non modélisées et des incertitudes sur le système étudié [49].

Par la suite, on utilise un contrôleur par mode glissant d'ordre supérieur afin de réguler  $y$  asymptotiquement vers la position d'équilibre souhaitée (trajectoire désirée). A partir de l'expression de  $r$ , l'équation du système peut s'écrire :

$$\dot{y} = \xi \quad (3.37)$$

où  $\xi$  représente la commande auxiliaire.

Le comportement dynamique du système est déterminé par la condition suivante sur la surface de glissement :

$$s(y) = 0 \quad (3.38)$$

L'objectif de la commande consiste à maintenir la densité du trafic à une valeur désirée (typiquement, cette valeur est définie autour de celle de la densité critique). La surface de glissement est définie par :

$$s(y) = \rho(t) - \rho^*(t) = y(t) - y^*(t) \quad (3.39)$$

La dérivée première de  $s$  est :

$$\dot{s}(y) = \dot{y} = \frac{1}{L} [q_e - yv + r] \quad (3.40)$$

Remarquons dans la variable de commande  $r$  apparait dès cette première dérivé. On peut donc développer une contrôleur d'ordre 2 par exemple. Dans ce cas, la commande discontinue de  $u$  est déplacée à la dérivée première  $\dot{u}$ . Ce qui permet une élimination totale des phénomènes de réticences. La loi de commande obtenue dans ce cas est :

$$\xi = -\lambda_s \text{sign} \left( \dot{s} + \gamma |s|^{1/2} \text{sign}(s) \right) \quad (3.41)$$

Ce qui permet d'obtenir l'algorithme du contrôle d'accès suivant :

$$r(t) = L \left[ -\lambda_s \text{sign} \left( \dot{s} + \gamma |s|^{1/2} \text{sign}(s) \right) \right] + yv - q_e \quad (3.42)$$

L'équation (3.42) représente la commande par mode glissant d'ordre supérieur basée sur la platitude différentielle pour le contrôle d'accès isolé. La commande obtenue est tronquée comme suit :

$$r(t) = \begin{cases} U_{max} & \text{si } s(y) \geq 0 \\ U_{min} & \text{si } s(y) \leq 0 \end{cases} \quad (3.43)$$

### 3.4 Simulations numériques

Bien qu'il existe une variété importante de modèles de simulation qui se distinguent, entre autres, par leur degré de détails, les modèles macroscopiques sont de loin les mieux adaptés pour représenter les différents phénomènes qui régissent le trafic. Dans ce contexte, nous nous sommes focalisés sur le l'outil « *METANET* » [41]. Ce choix est justifié par son utilisation dans la plupart des applications dédiées à la modélisation, la commande et l'évaluation des performances des systèmes du trafic routier. Avant de présenter les résultats des simulations, le paragraphe suivant décrit les caractéristiques de cet outil.

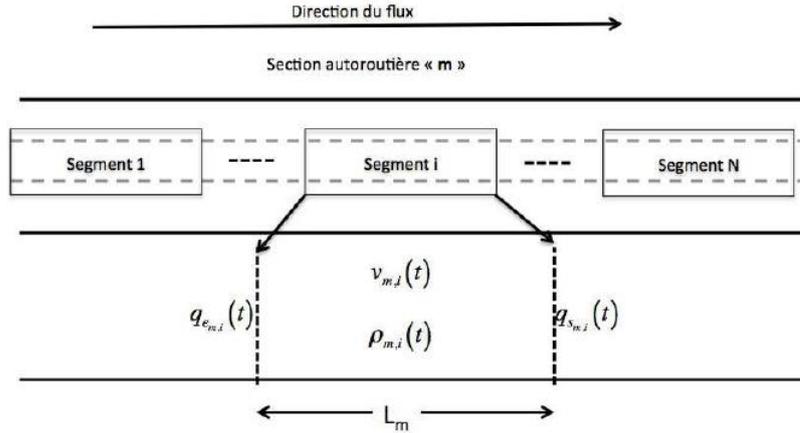


FIGURE 3.8 – Représentation schématique d'une section autoroutière

### 3.4.1 Metanet : Outil de modélisation et de simulation

Afin d'illustrer le principe de fonctionnement de METANET, considérons la section autoroutière suivante Figure 3.8.

Metanet représente un réseau sous forme d'un graphe orienté composé de liens (indiqués par l'indice  $m$ ) correspondants aux sections autoroutières. Chaque lien possède des caractéristiques uniformes (i.e., sans rampes d'entrée ni de sortie et aucun changement majeur dans sa géométrie). Les changements dans les caractéristiques du lien ou dans la géométrie de la route (apparition d'une rampe d'entrée ou de sortie) sont identifiés par l'introduction d'un nœud. Chaque lien (section)  $m$  est divisé en  $N_m$  segments (indiqués par l'indice  $i$ ) de longueur  $L_m$ .

L'évolution du trafic dans le réseau est décrite par les équations suivantes :

- Le débit de sortie  $q_{m,i}$  (en veh/h), de chaque segment  $i$  est égal au produit de la densité  $\rho_{m,i}$  (en veh/km), de la vitesse moyenne  $v_{m,i}$  (en km/h) et du nombre de voies  $\lambda_m$  :

$$q_{m,i} = \rho_{m,i} v_{m,i} \lambda_m \quad (3.44)$$

- La densité d'un segment évolue selon le principe de conservation des véhicules :

$$\dot{\rho}_{m,i} = \frac{1}{L_m \lambda_m} [q_{m,i-1} - q_{m,i}] \quad (3.45)$$

Alors que les deux équations (3.44), (3.45) sont basées sur des principes physiques et sont donc, exactes, les équations qui décrivent les dynamiques de la vitesse et la relation entre la densité et la vitesse désirée sont basées sur des heuristiques. La vitesse moyenne à l'instant  $t$  est exprimée par :

$$\dot{v}_{m,i} = \underbrace{\frac{1}{\tau} [V_e(\rho_{m,i}) - v_{m,i}(t)]}_{\text{relaxation}} + \underbrace{\frac{1}{L_m} v_{m,i}(t) [v_{m,i-1} - v_{m,i}(t)]}_{\text{convexion}} - \underbrace{\frac{v}{\tau L_m} \frac{\rho_{m,i+1} - \rho_{m,i}}{\rho_{m,i} + \kappa}}_{\text{anticipation}} \quad (3.46)$$

Cette équation (3.46) représente la somme des termes suivants :

- Le terme de relaxation qui exprime le fait que les conducteurs cherchent à atteindre leurs vitesses désirées. Il est donc fonction de la vitesse à l'équilibre exprimée par  $V_e(\rho_{m,i})$ ,
- Le terme de convection dont le rôle est d'exprimer les changements de la vitesse (accroissement/décroissement) en fonction de l'afflux des véhicules en amont,

- Enfin, le terme d’anticipation qui représente le fait que la vitesse des véhicules est affectée par la densité en aval du segment considéré.

Parmi les expressions de la vitesse à l’équilibre, on trouve celle proposée par [52]

$$V_e(\rho_{m,i}) = v_{f,i} \exp \left[ -\frac{1}{\alpha} \left( \frac{\rho_i}{\rho_{c,i}} \right)^\alpha \right] \quad (3.47)$$

$\tau$ ,  $v$ ,  $\mu$ ,  $a$  sont des paramètres du modèle.  $v_{f,m}$  est la vitesse libre et  $\rho_{c,m}$ , la densité critique. L’expression (3.47), peut-être remplacée par n’importe quelle équation du diagramme fondamental (voir le tableau 3.1).

TABLE 3.1 – Exemples de diagramme fondamental

Auteur	Diagramme fondamental
Chandler	$Q_e(\rho) = q_{max} \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_{max}} \right)$
Drake	$Q_e(\rho) = v_f \rho \exp \left( -\frac{1}{2} \left( \frac{\rho}{\rho_c} \right) \right)$
Drew	$Q_e(\rho) = v_f \rho \left( 1 - \sqrt{\frac{\rho}{\rho_{max}}} \right)$
Edie	$Q_e(\rho) = v_f \rho \exp \left( -\frac{\rho}{\rho_{max}} \right)$
Greenberg	$Q_e(\rho) = v_c \rho \ln \left( \frac{\rho_{max}}{\rho} \right)$
Greenshields	$Q_e(\rho) = v_f \rho \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_{max}} \right)$
May	$Q_e(\rho) = v_f \rho \exp \left( -\frac{1}{\alpha} \left( \frac{\rho}{\rho_c} \right)^\alpha \right)$

Les origines sont modélisées par un simple modèle de files d’attentes. La longueur  $\omega$  de la file d’attente est donnée par l’expression suivante :

$$\dot{\omega}_o = d_o - q_o \quad (3.48)$$

$d_o$ <sup>10</sup> et  $q_o$  représentent respectivement, la demande à l’origine et le flux de sortie de l’origine. Afin de prendre en compte la chute de la vitesse causée par le phénomène d’insertion des véhicules, s’il existe une rampe d’accès on ajoute à l’équation de la vitesse (3.46), le terme suivant :

$$-\frac{\delta q_o v_{m,1}}{L_m \lambda_m (\rho_{m,1} + \mu)} \quad (3.49)$$

$\delta$  est un paramètre du modèle. De plus, pour tenir compte de la réduction de la vitesse due au changement (diminution) du nombre de voies, on ajoute à (3.46) l’expression suivante :

$$-\frac{\phi \Delta \lambda \rho_{m,N_m} v_{m,N_m}^2}{L_m \lambda_m \rho_{c,m}} \quad (3.50)$$

$\Delta \lambda = \lambda_m - \lambda_{m+1}$  et  $\phi$  est un paramètre du modèle.

Le débit de sortie de l’origine dépend des conditions de circulation sur la section principale et, pour une rampe d’accès contrôlée, du taux  $r(t)$ ,  $r(t) \in [r_{min}, 1]$ <sup>11</sup>. En particulier le débit de sortie  $q_o$  est :

10. On considère que la demande est indépendante de toute action de commande dans le réseau.

11. Si la rampe n’est pas contrôlée,  $r(t) = 1$ .

$$q_o(t) = r(t)\hat{q}_o(t) \quad (3.51)$$

$$\hat{q}_o(t) = \min(\hat{q}_{o,1}, \hat{q}_{o,2}) \quad (3.52)$$

$$\hat{q}_{o,1} = d_0(t) + \frac{\omega(t)}{T} \quad (3.53)$$

$T$  est le pas de simulation.

$$\hat{q}_{o,2} = Q_{sat} \min \left( r, \frac{\rho_{max,m} - \rho_m(t)}{\rho_{m,1}(t) - \rho_{c,m}} \right) \quad (3.54)$$

$Q_{sat}$  représente la capacité de la rampe d'accès en (veh/h).

Afin de connecter les différents liens (sections), à chaque changement des paramètres de la section ou dès l'apparition d'une jonction ou d'une bifurcation, on ajoute un nœud entre les liens. Ce nœud fournit au lien entrant la densité aval, et au lien sortant la vitesse en amont. Le débit entrant dans le nœud  $n$  est distribué aux différents liens de sortie selon les expressions suivantes :

$$Q_n = \sum_{\eta \in I_n} q_{\eta, N_\eta} \quad (3.55)$$

$$q_{m,o} = \beta_n^m Q_n \quad (3.56)$$

$Q_n$  est le débit total entrant au nœud à l'instant  $t$ ,  $I_n$  est l'ensemble des liens entrants du nœud  $n$ .  $\beta_n^m$ , la fraction du débit total à travers le nœud  $n$  qui sort via le lien  $m$ .  $q_{m,o}$  est le débit sortant du nœud  $n$  via le lien  $m$ .

Lorsqu'un nœud  $n$  possède plusieurs liens de sortie, la densité virtuelle en aval  $\rho_{m, N_{m+1}}$  du lien entrant est donnée par l'expression suivante :

$$\rho_{m, N_{m+1}} = \frac{\sum_{\eta \in O_n} \rho_{\eta,1}^2}{\sum_{\eta \in O_n} \rho_{\eta,1}} \quad (3.57)$$

$O_n$  étant l'ensemble des liens sortants du nœud  $n$ .

Pour plusieurs liens entrants, la vitesse virtuelle en amont  $v_{m,o}$  du lien sortant est donnée par :

$$v_{m,o} = \frac{\sum_{\eta \in I_n} v_{\eta, N_\eta} q_{\eta, N_\eta}}{\sum_{\eta \in I_n} q_{\eta, N_\eta}} \quad (3.58)$$

Nous avons rappeler les grandes lignes de l'outil METANET. Le paragraphe suivant propose donc de tester la pertinence de notre algorithme grâce à des données empiriques.

### 3.4.2 Résultats de simulation

Considérons, pour les validations numériques, l'exemple d'une section autoroutière homogène à trois voies, d'une longueur égale de 10.5 Km, Figure 3.9 [12].

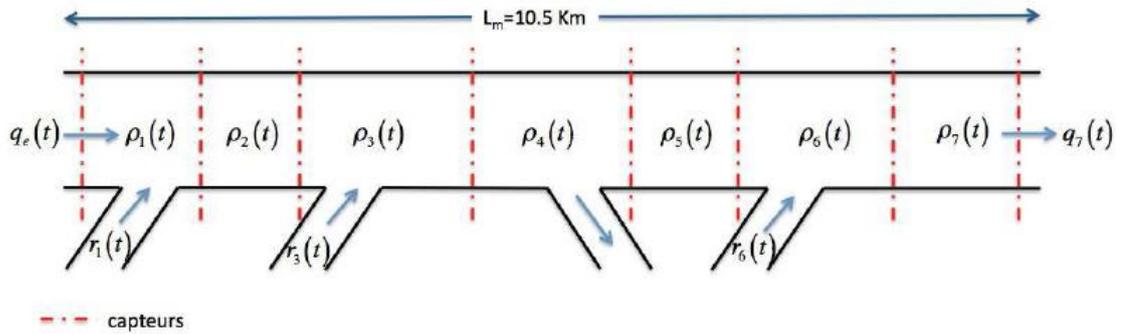


FIGURE 3.9 – Topologie de la section autoroutière

TABLE 3.2 – Paramètres de simulation

$\tau$	18 s
$\mu$	40 veh/km/lane
$\nu$	60 km <sup>2</sup> /h
$\rho_c$	33.5 veh/km/lane
$\rho_{max}$	180veh/km/lane
$\nu_f$	102 km/h
$\alpha$	1.66

La section étudiée comporte 3 rampes d'entrées et une rampe de sortie. Comme souligné plus haut, l'outil utilisé pour les simulations est METANET avec les valeurs des paramètres suivants (voir Table 3.2) et le diagramme fondamental de May (3.47) :

Par ailleurs, les demandes aux origines sont représentées dans les figures (Figure 3.10, Figure 3.11). Le débit de la rampe de sortie est fixé à 400 veh/h. De plus, les débits des rampes d'entrées sont tronqués entre une valeur maximale de 2000 veh/h et minimale de 200 veh/h. On suppose aussi que les densités initiales sont égales à 10veh/km/voie, ce qui signifie que la section autoroutière est fluide initialement. L'évolution du trafic est simulé pendant une durée de 5 h.

Dans le cas sans commande, les figures (3.12) montrent l'évolution dans le temps, des deux variables principales du trafic - la densité . On remarque ainsi que l'augmentation du débit à l'origine des rampes conduits à des congestions dans les segments d'insertion des trois rampes d'accès. Ce fait est visualisée par une augmentation des densités au-delà de la valeur critique.

### 3.4.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité la combinaison de commande par mode glissant d'ordre supérieur avec la conception de la platitude différentielle pour résoudre le problème du contrôle d'accès. L'algorithme de contrôle est basé sur l'inversion du système en utilisant le concept de la platitude, qui ne nécessite pas de l'intégration des équations différentielles. Ce paramètre a été en ensuite utilisé pour la génération de trajectoires de référence de la densité de trafic. Pour poursuivre et pour stabiliser en temps réel tous les déviations de trajectoires prescrites a été appliquée la commande par mode glissant d'ordre supérieur. La combinaison de la platitude différentielle avec la technique de CMGOS est considérée comme un contrôle important pour les systèmes non

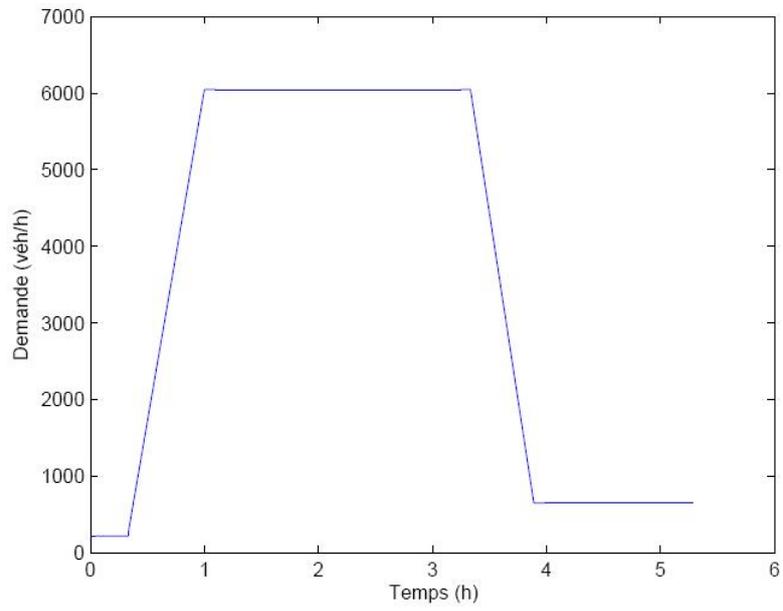


FIGURE 3.10 – Deamande à l’origine de la section principale

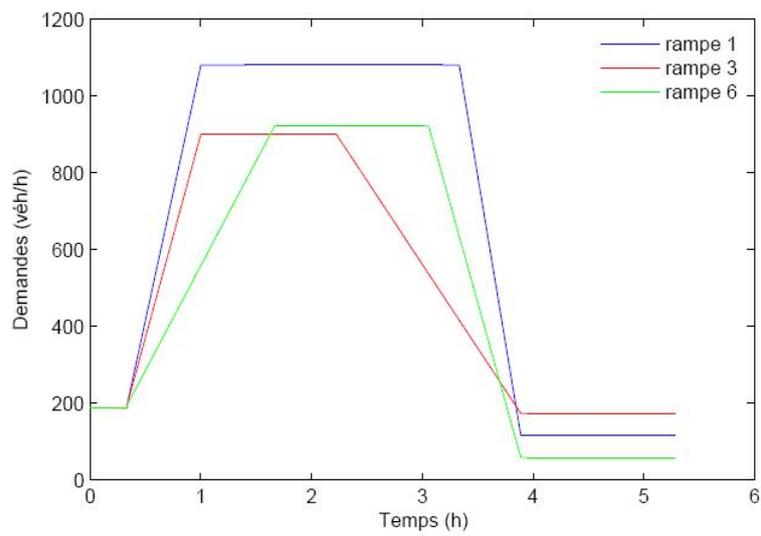


FIGURE 3.11 – Demande à l’origine des rampes d’accès

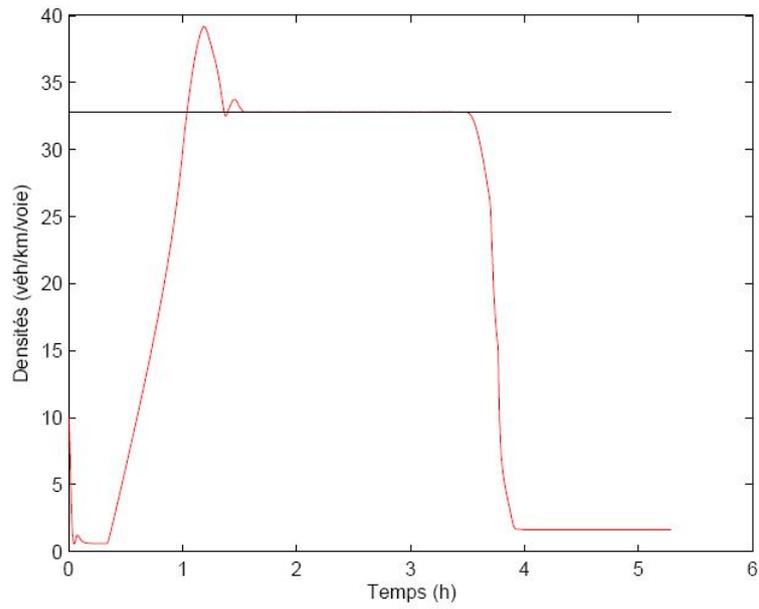


FIGURE 3.12 – Evolution dans le temps de la densité dans le segment 4 : Cas sans commande

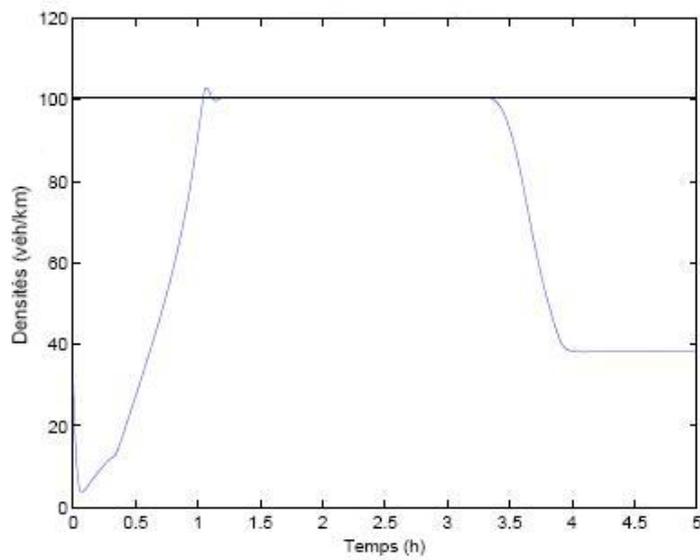


FIGURE 3.13 – Evolution dans le temps de la densité dans le segment 4 : Cas avec commande

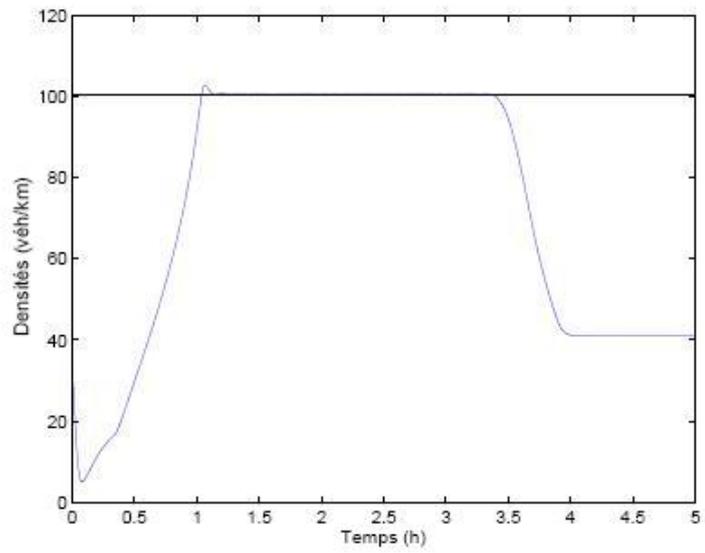


FIGURE 3.14 – Evolution dans le temps de la densité dans le segment 6 : Cas avec commande

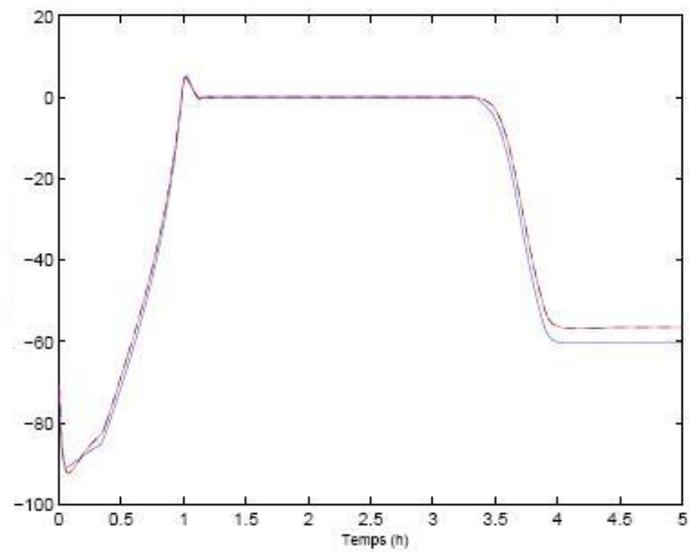


FIGURE 3.15 – Surface de glissement

linéaires. Les résultats des simulations, réalisées à partir des données empiriques, montrent la pertinence de l'approche proposée. Également nous avons introduit la nécessité et l'importance de la modélisation du flux de trafic. Les modèles de trafic sont importants dans la recherche du trafic pour pouvoir faire la prévision du flux de trafic, la détection des accidents et le contrôle du trafic. Le choix d'un modèle de trafic devrait être basé sur des considérations de son efficacité et sa précision. Chaque modèle doit être capable de reproduire correctement la cinématique du flux et les phénomènes qui se produisent sur l'autoroute. En effet, les modèles permettent d'introduire la diversité de comportements des usagers sur le trafic autoroutier. Après nous avons examiné le modèle macroscopique METANET car ce modèle est mieux adaptés à la mise en œuvre des systèmes de contrôle du flux de trafic autoroutier. Dans le chapitre suivant nous allons appliquer la Commande par Mode Glissant d'Ordre Supérieur pour le contrôle d'accès isolé en utilisant des données réelles.

# Chapitre 4

## Étude en simulation de la régulation d'accès isolé

### 4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté le nouvel algorithme dédié au contrôle d'accès isolé. Une telle stratégie tire profit de la puissance des deux concepts que sont ; la platitude différentielle et la commande par mode glissant d'ordre supérieur. En effet, le premier concept permet la génération de trajectoires (commande en boucle ouverte) et ce sans intégration d'équation différentielle. Le second assure le suivi de trajectoire (commande en boucle fermée) et est robuste par rapport aux perturbations et aux incertitudes des modèles, notamment les modèles macroscopiques de second ordre. Rappelons de ces modèles que seule l'équation de conservation est vraie. Les autres expressions, celle de la vitesse et les différents diagrammes fondamentaux, par exemple, sont basées sur des observations et des considérations empiriques [58]

Les résultats des simulations numériques avec des données empiriques ont montré la pertinence de cette approche.

L'objectif principal de ce chapitre consiste à mener une étude en simulation de l'algorithme de commande proposé avec des données réelles. De plus, une analyse qualitative est proposée permettant de quantifier les gains obtenus lors de la mise en œuvre d'un tel algorithme.

Après avoir rappelé l'algorithme de commande en mettant l'accent sur les aspects implémentation, la première partie de ce chapitre décrit le site choisi. La seconde partie présente les résultats des simulations numériques. La troisième partie est dédiée à l'analyse qualitative. Une telle analyse est basée sur les critères dévaluation suivants et qui sont utilisés par les exploitants des autoroutes les VRU :

1. Temps Total passé (**TTS**) exprimé en (véh\*h)
2. Distance Parcourue (**DP**) en (véh\*km)
3. Vitesse moyenne ( $V_{moy}$ )
4. Temps de parcours (**TP**)
5. Consommation d'énergie (carburants)
6. Emission de polluants : Monoxyde de carbone (**CO**) et d'Hydrocarbure (**HC**)

Il est important de noter que d'autres critères concernant les coûts socio-économiques et les gains en termes de développement et d'identification doivent aussi être pris en considération. Ces critères permettent de comparer les différentes stratégies de déplacement [6].

## 4.2 Algorithme du contrôle d'accès isolé

### 4.2.1 Bref rappel

Reprenant l'exemple simple de la section autoroutière illustré dans la figure 3.7, du chapitre précédent. Rappelons aussi que l'objectif du contrôle d'accès (CA) isolé est d'agir localement sur le débit de la rampe afin de maintenir la densité dans la voie principale aux alentours d'une valeur critique notée  $\rho^* \leq \rho_c$ . La commande, notée  $r(t)$ , obtenue grâce au nouvel algorithme s'écrit alors :

$$r(t) = L \left[ -\lambda_s \text{sign} \left( \dot{s} + \gamma |s|^{1/2} \text{sign}(s) \right) \right] + yv - q_e \quad (4.1)$$

$y(t) = \rho_s(t)$  représente la sortie plate. La commande  $r(t)$  est tronquée entre deux valeurs ; maximale et minimale. On définit ainsi le débit autorisé  $q_r(t)$  par la relation suivante :

$$q_r(t) = r \hat{q}_r(t) \quad (4.2)$$

$$\hat{q}_r(t) = \min(\hat{q}_{r,1}, \hat{q}_{r,2}) \quad (4.3)$$

$$\hat{q}_{r,1} = d_0(t) + \frac{\omega(t)}{T} \quad (4.4)$$

$T$  est le pas de simulation.

$$\hat{q}_{r,2} = Q_{sat} \min \left( r, \frac{\rho_{max,m} - \rho_m(t)}{\rho_{m,1}(t) - \rho_{c,m}} \right) \quad (4.5)$$

$Q_{sat}$  représente la capacité de la rampe d'accès en (veh/h) appelé aussi début de saturation.

### 4.2.2 Implémentation sur site

Pour l'implémentation sur site et la réalisation pratique du CA, on utilise un feu de signalisation situé, généralement à quelques mètres de l'entrée dans la section d'insertion. Ainsi, le débit autorisé à entrer dans la voie principale est traduit en une durée de feu vert, notée  $g$ . La relation entre cette durée et le débit  $q_r(t)$  est exprimée par :

$$g = \frac{q_r}{Q_{sat}} C \quad (4.6)$$

$C$  représente le cycle du feu. Dans la pratique, on choisit un débit de saturation constant :  $Q_{sat} = 1800 \text{ veh/km}$ .

Les contraintes liées à la législation impose des durées de  $C$  bien définies. En France par exemple, et en fonctionnement normal, cette durée du cycle est choisi généralement égale à 40 s. La durée du vert maximum est égale à 35 s et celle du rouge minimum est de 5 s. Le choix de cette durée, utilisée par les exploitants, est justifié par le fait qu'elle minimise les arrêts sur les bretelles

d'entrées. Ainsi, les usagers avancent constamment dans la file d'attente jusqu'au feu de signalisation [20]. Dans le cadre de l'évaluation quantitative des résultats, il s'avère nécessaire d'ajuster le rapport cyclique minimal ( $U_{min} = \frac{g_{min}}{C}$ ).

La réglementation imposant une durée du rouge minimum de 5 s, ceci implique que la durée du vert et d'orange maximum est de 35 s. La valeur de  $C$  étant fixée à 40, on obtient ainsi un rapport cyclique maximum  $U_{max} = 0.875$ . Les valeurs de  $U_{min}$  et de  $U_{max}$  sont considérées comme des contraintes de fonctionnement pour la commande. Pour résumer, l'étude en simulation est réalisée en tenant compte des contraintes suivantes :

- $C = 40$  s : durée du cycle,
  - $g_{max} = 35$  s avec 30 s pour la durée du vert et 5 s pour l'orange. Donc  $U_{max} = 0.875$ ,
  - $g_{min} = 15$  s avec 10 s pour le vert et 5 s pour l'orange, ce qui donne une valeur  $U_{min} = 0.373$
- Par ailleurs, deux autres contraintes doivent être prises en compte :

1. Si  $U_{CMGS} > U_{max}$  alors  $U_{CMGS} = 1$ , ce qui correspond à l'escamotage du rouge et dans ce cas la durée du feu vert est égale à celle du cycle
2. Dans le cas de l'activation de la contrainte de la longueur de la file d'attente,  $U_{CMGS} = 1$  [20].

$U_{CMGS}$  représente la contrainte pour la commande par mode glissant d'ordre supérieur

### 4.3 Simulations numériques

Les simulations numériques sont effectuées sur des données réelles<sup>1</sup>. Le site étudié est une partie de l'autoroute A6W (Figure 4.1).

L'autoroute A6W est située dans la partie sud de l'Île de France. Elle est gérée par la Direction Interdépartementale des Routes d'Île de France **DIRIF**. la A6W est considérée comme le site le plus critique du réseau autoroutier d'Île de France [24]. La longueur de cette section est d'environ 20km et inclue cinq rampes d'accès et trois rampes de sorties. Dans notre étude, nous nous sommes focalisés sur une section de 8km avec les trois rampes d'accès suivantes (cf Figure 4.1) :

1. O-RisOrangis
2. O-Grigny
3. O-Viry

La voie principale du tronçon étudié est composée de trois voies. Les stations (**RAD**)<sup>2</sup> sont des détecteurs électromagnétiques. Elle sont installées à environ 500m les unes des autres. Elles permettent donc de collecter les données relatives au taux d'occupation (TO) (en %),<sup>3</sup> et au débit  $q$  en véh/h. D'autres stations (en double boucles) situées tous les 3 ou 4 km permettent de fournir les mesures des vitesses moyennes [24]. Les mesures de vitesses ainsi que le taux d'occupation permettent d'estimer la longueur des véhicules et donc de calculer la vitesse moyenne sur les boucles simples environnantes. Elles offrent aussi la possibilité d'estimer le taux des poids lourds dans la

---

1. Ces données ont été aimablement fournies par Dr. Habib Haj-Salem, Directeur de Recherche HDR au sein du laboratoire Génie des Réseaux de Transports Terrestres et Informatique Avancées (**GRETTIA** de Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (**IFSTTAR**). Je tiens donc à lui exprimer toute ma gratitude et mes remerciements pour son aide précieuse.

2. Recueil Automatique des Données.

3. Pour les simulations, le TO est traduit en terme de densité en véh/km.

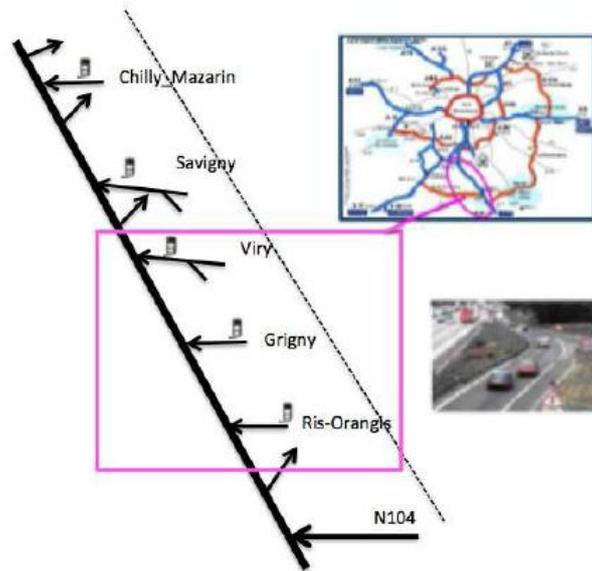


FIGURE 4.1 – Tronçon de l'autoroute A6W avec les trois rampes étudiées

section considérée.

La supervision de l'ensemble des stations RAD est assurée par un module appelé **KIR**<sup>4</sup> qui assure la classification des données collectées et la restauration de celles manquantes.

Les données utilisées sont extraites de la base de données du système d'exploitation (SIRIUS)<sup>5</sup> de la DiRIF. Elles correspondent à celles récoltées le mardi 16 mars 2010 sur une période de 24 heures. Ces données consistent en des mesures de la valeur moyenne du débit, de la vitesse moyenne et du taux d'occupation fournis toutes les 6 minutes.

Pour les rampes d'accès, deux stations sont installées. La première est située au voisinage de la rampe derrière le feu de signalisation. Elle est utilisée comme actionneur traduisant les calculs d'algorithme du contrôle d'accès. La seconde station est située à la fin de la bretelle afin de désactiver la commande dans le cas où celle-ci est saturée. L'activation de cette station est tactique afin d'éviter le débordement des véhicules dans la rampe sur les voies adjacentes.

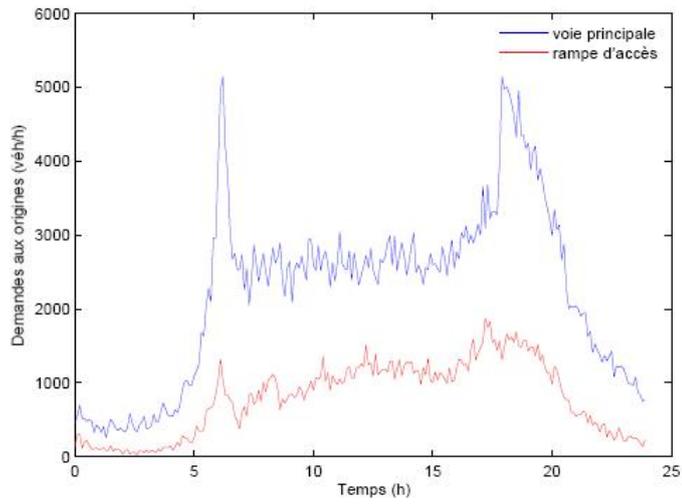
A l'instant des simulations effectuées dans le chapitre précédent, l'outil utilisé est celui basé sur METANET. Il est important de noter que la première étape nécessaire avant toute simulation consiste à calibrer le modèle utilisé avec les données réelles. Le tableau 4.1 fournit les principales valeurs utilisées. Soulignons enfin que le diagramme fondamental utilisé est celui de May.

$\alpha$  étant un paramètre du diagramme fondamental.  $v_f$  et  $\rho_c$  représentent la vitesse libre et la densité critique, respectivement.

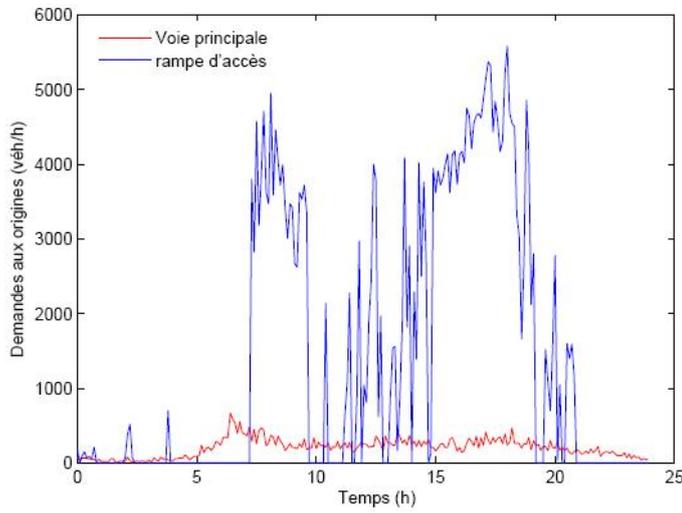
Les figures 4.2 représentent le profil des différentes demandes aux origines (voie principale et rampe d'accès, respectivement). Notons que ces données sont fortement bruitées et qu'aucun filtrage n'a été effectué.

4. Outil dédié à la qualification des données.

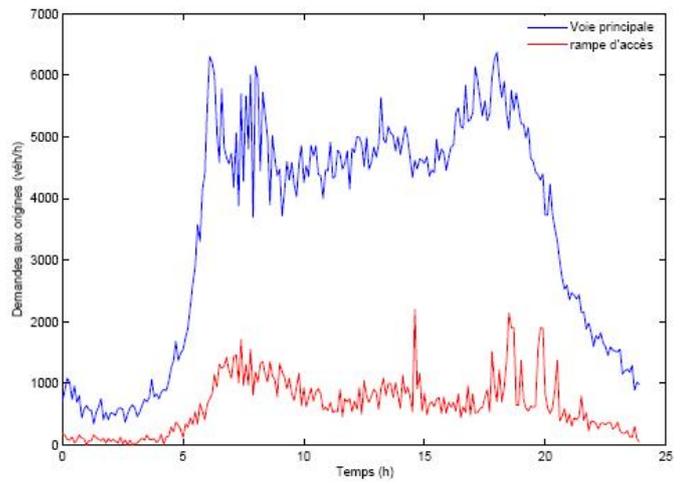
5. Système d'Information pour un Réseau Intelligent aux Usagers



(a) RisOrangis



(b) O-Grigny



(c) O-Viry

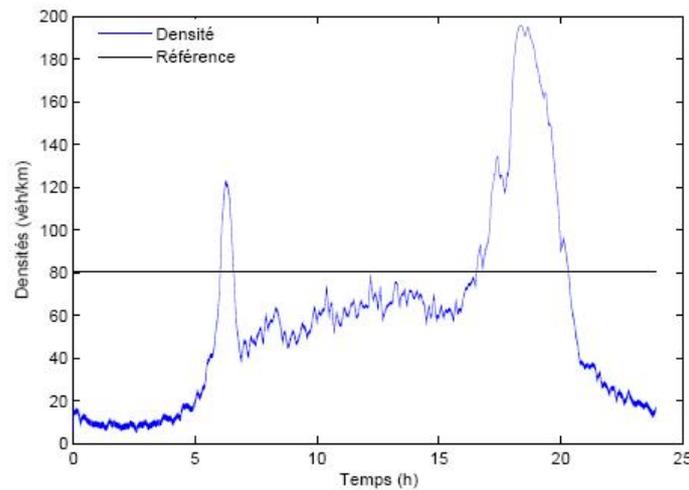
FIGURE 4.2 – Demandes aux origines

TABLE 4.1 – Principaux paramètres de simulation

Rampes d'accès	Longueur (m)	$v_f(km/h)$	$\rho_c(veh/km)$	$\alpha$
O-N441-RisOrangis	600	101.164	26.827	2.11
O-Grigny	1410	119.931	21.6960	2.8510
O-Viry	750	117.708	42.49	1.1934

L'analyse des données montre des pics de demandes et donc l'apparition des congestions typiquement durant les heures de pointes, approximativement, entre 7h et 9h30 et entre 5h30 et 20h. Ceci est confirmé par l'évolution dans le temps, des différentes densités (voir, Figures 4.3) dans le cas où aucune commande n'est mise en œuvre.

L'implémentation du nouvel algorithme de commande permet d'améliorer les performances du trafic en assurant une utilisation optimale de l'infrastructure considérée. Ainsi, comme le montre les Figures 4.4, le régulateur permet de maintenir les différentes densités autour des valeurs critiques. Ceci se traduit aussi par une augmentation significative des différentes vitesses (voir Figures 4.5), pour l'évolution des vitesses sur RisOrangis et Grigny par exemple<sup>6</sup>.



(a) RisOrangis

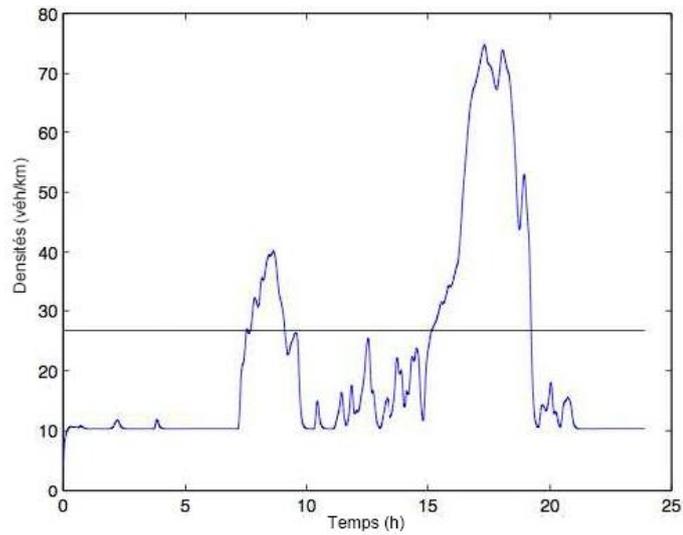
D'un point de vue signal de commande, la figure 4.6, montre l'évolution dans le temps du signal de la commande au niveau de la rampe de Grigny.

Soulignons enfin que la mise en œuvre de la régulation d'accès conduit à la formation de file d'attente au niveau de la rampe (voir Figure 4.7).

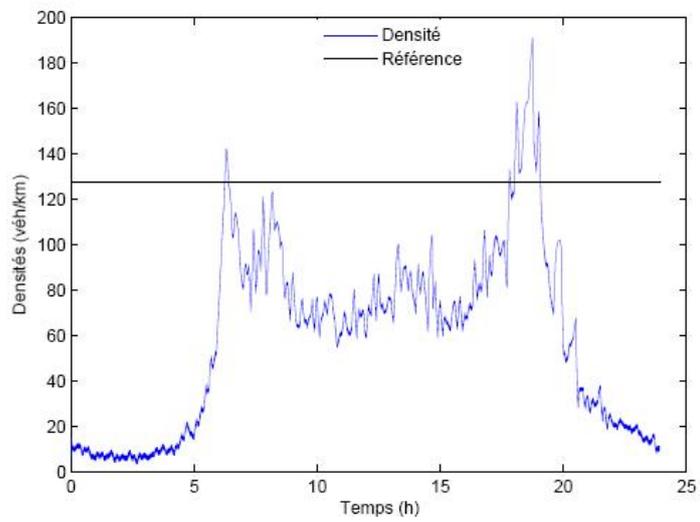
Dans le cas où la file d'attente dépasse la capacité de la rampe, il y a risque de débordement sur les voies adjacentes. Deux solutions sont alors possibles. La première consiste à relâcher la commande (mettre les feux de signalisation au vert pour vider la bretelle). La seconde repose sur la mise en place d'un second régulateur dédié à la commande de la file. Le signal de sortie sera alors défini par le maximum entre les deux taux de débit autorisé :

$$R = \max[r, r_{file}] \quad (4.7)$$

6. par soucis de simplification et pour ne pas alourdir le texte par trop de figures, qui confirment les performances de l'algorithme, nous ne présentons que quelques résultats.

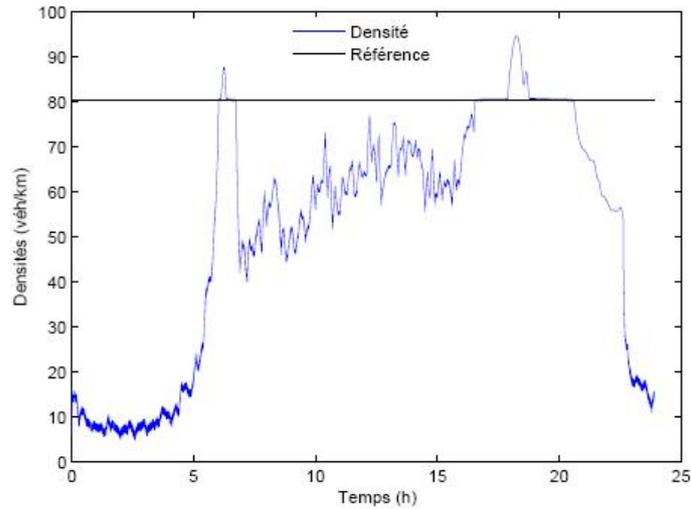


(b) O-Grigny : densité par véhicule et par voie



(c) O-Viry

FIGURE 4.3 – Evolution dans le temps des densités : cas sans commande



(a) RisOrangis

où,  $r_{file}$  représente le signal de commande de la file d'attente.

## 4.4 Analyse quantitative

L'analyse quantitative repose sur un ensemble de critères dédiés à l'évaluation de performances des stratégies de commande du trafic. Soulignons que ces critères sont ceux, couramment, utilisés par les exploitants des infrastructures autoroutières et VRU. Ils se déclinent en :

- Temps total passé  $TTS$
- Distance parcourue  $DP$
- Vitesse moyenne  $V_{moy}$
- Temps de parcours  $TP$
- Cartographie des congestions
- La consommation d'énergie (de carburants)
- Émission de polluants : Monoxyde de carbone (CO) et Hydrocarbure (HC)

Il est important de noter que d'autres critères relatifs aux coûts socio-économiques ainsi qu'aux gains en termes de temps de développement et d'identification sont à prendre en considération.

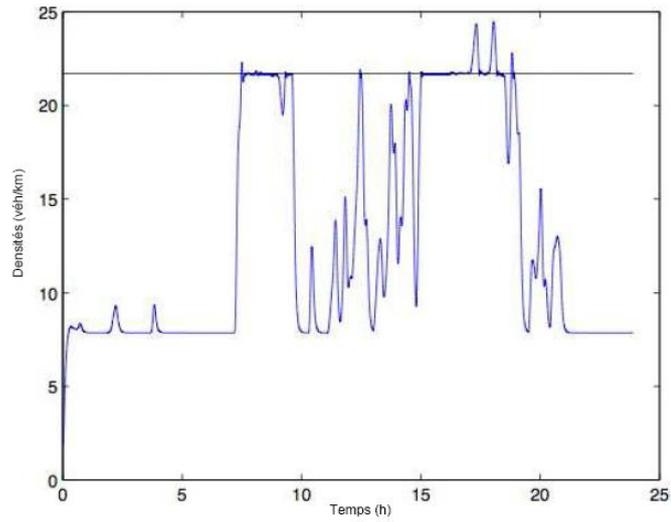
### 4.4.1 Temps total passé $TTS$

Exprimé en  $(veh * h)$ , il représente le temps total passé par l'ensemble des véhicules dans le système. Il inclut le temps passé sur l'autoroute et celui des rampes d'accès. Le TTS est donné par :

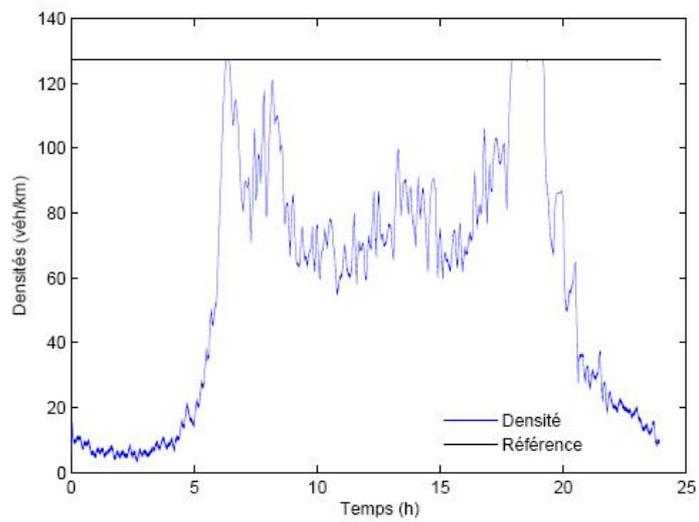
$$TTS = T \sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^N L_i \rho_i(k) \quad (4.8)$$

$\rho_i(k)$  (véh/km), étant la densité du segment  $i$ . où :

- $\rho_i(k)$  : densité du segment  $i$
- $L_i$  : longueur du segment  $i$
- $N$  : nombre total des segments

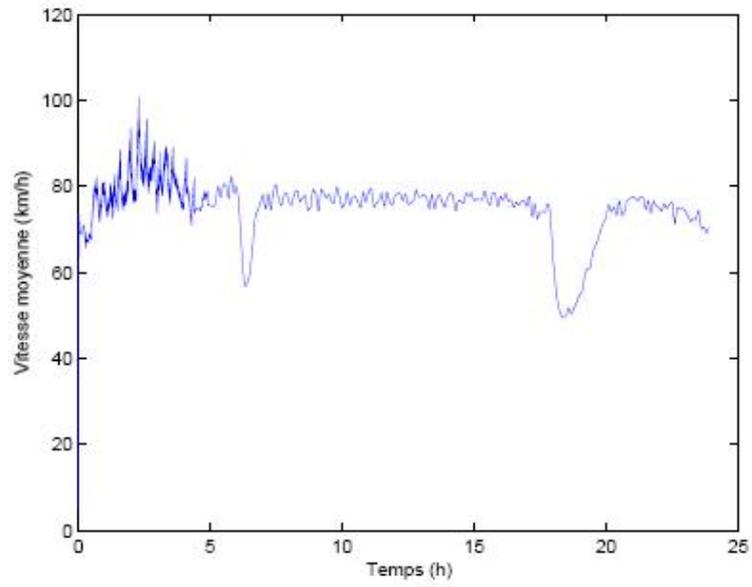


(b) O-Grigny : densité par véhicule et par voie

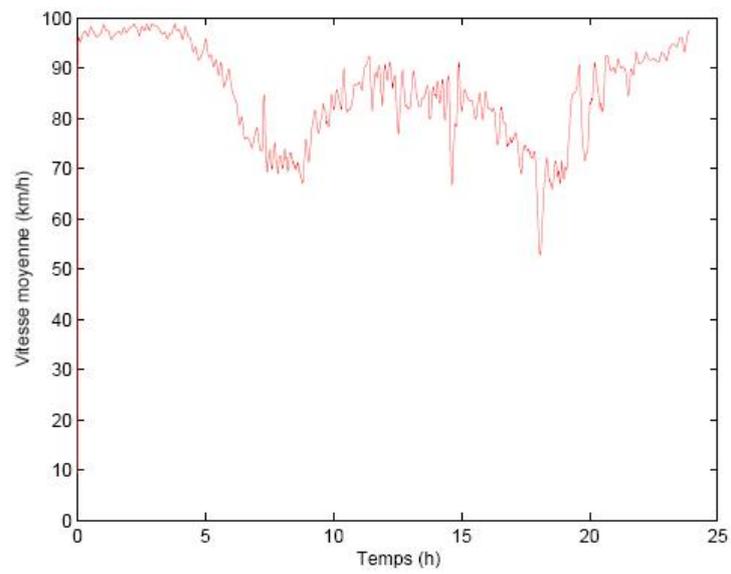


(c) O-Viry

FIGURE 4.4 – Evolution dans le temps des densités : cas avec commande



(a) RisOrangis



(b) O-Grigny

FIGURE 4.5 – Evolution dans le temps des vitesses moyennes : cas avec commande

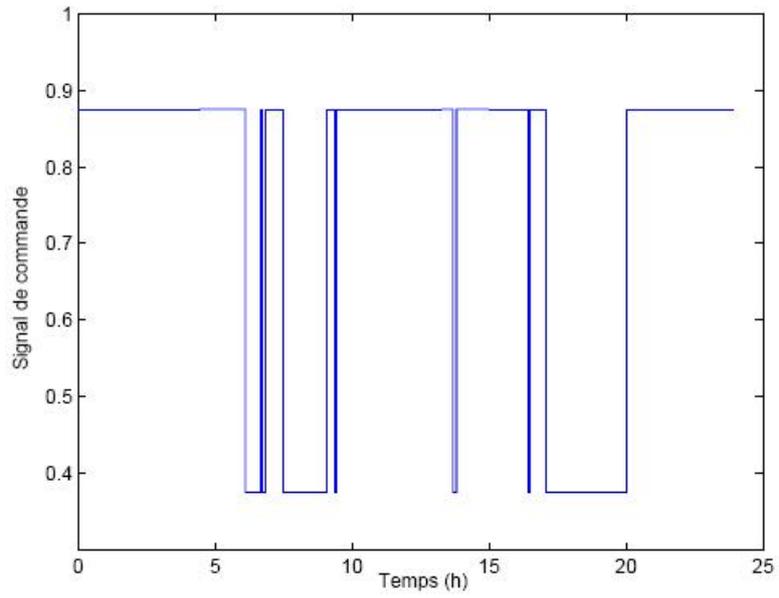


FIGURE 4.6 – Evolution dans le temps du signal de commande : Cas de la rampe O-Grigny

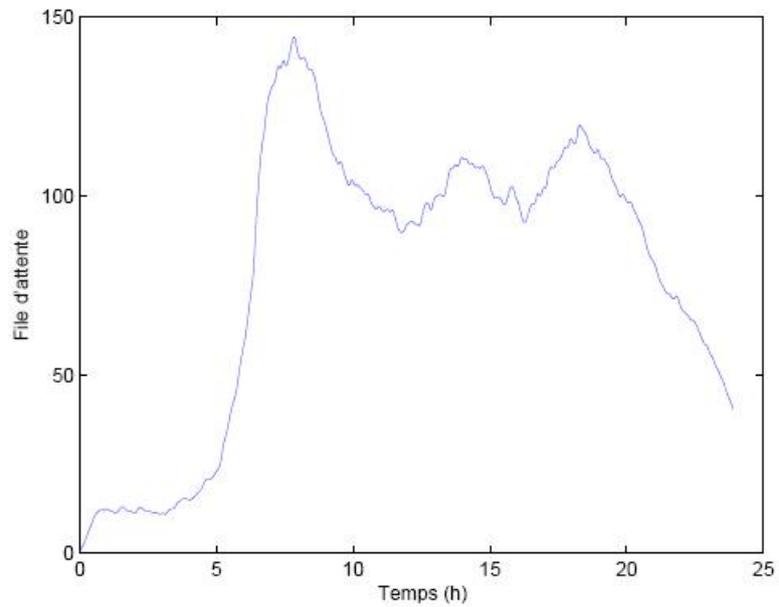


FIGURE 4.7 – Exemple d'évolution de la file d'attente O-Grigny

- $k$  : horizon de temps
- $T$  : pas de simulation

#### 4.4.2 Distance parcourue

Ce critère correspond à la distance parcourue (**DP**) par tous les véhicules dans le système et est exprimée en ( $veh * km$ ). DP est calculée par :

$$DP = T \sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^N L_i q_i(k) \quad (4.9)$$

avec  $q_i(k)$  : débit mesuré au point  $i$ . Les autres paramètres sont identiques à ceux du critère  $TTS$ . Soulignons que ce critère doit être constant et toute différence observée rend l'évaluation délicate.

#### 4.4.3 Vitesse moyenne

Connaissant la **DP** et le **TTS**, la vitesse moyenne  $V_{moy}$  en  $km/h$ , est obtenue par l'expression suivante :

$$V_{moy} = \frac{DP}{TTS} \quad (4.10)$$

#### 4.4.4 Temps de parcours

Le temps de parcours **TP**, est calculé lors de la simulation. Il représente le temps de parcours d'un véhicule fictif injecté au début de la section avec une vitesse égale à celle du flot. Sa position est réactualisée à chaque pas de simulation. Le **TP** final est égal alors, à la différence entre le moment d'entrée et celui de sortie.

#### 4.4.5 Consommation d'énergie

La consommation (en  $vh * litres$ ) est calculée pour tout le réseau et pour chacun des axes du réseau [21] :

$$Consum = \sum_k \frac{T}{100} \sum_m \sum_i \begin{cases} q_{m,i}(k) L_m \left( 4.49 + \frac{122}{v_{m,i}} + 0.0016(v_{m,i}(k) - 60)^2 \right) & \text{Si } v_{m,i}(k) > 60 \\ q_{m,i}(k) L_m \left( 4.49 + \frac{122}{v_{m,i}} \right) & \text{Si } v_{m,i}(k) < 60 \end{cases} \quad (4.11)$$

#### 4.4.6 Émission de polluants

Il s'agit principalement de l'émission du monoxyde de carbone (CO) et d'hydrocarbure (HC). Les formules suivantes sont issues du rapport [21] :

$$CO = 2.3DP + 310TTS \quad (4.12)$$

$$HC = 1.2DP + 60TTS \quad (4.13)$$

Il est important de souligner que les critères d'évaluation sont calculés après chaque exécution de simulations. La variation est exprimée par l'expression suivante (4.14)

$$Gain = \varepsilon \left| \frac{Critère - Critère_{ref}}{Critère_{ref}} \right| 100 \quad (4.14)$$

avec  $\varepsilon = 1$ , s'il s'agit d'un gain et  $\varepsilon = -1$  s'il s'agit d'une perte Le tableau suivant (4.2) montre les résultats en terme de gains obtenus par la commande proposée<sup>7</sup>.

TABLE 4.2 – Résultats de l'évaluation des performances

<b>O-N441-RisOrangis</b>	Cas sans commande	Cas avec Commande	Gain %
<b>TTS</b>	6700	6265	-6.6
<b>DP</b>	120460	120460	-
$V_{moy}$	65	70	6.8
$CO$	252770	252620	-3.75
$HC$	79968	79938	-2.81
<b>O-Grigny</b>	Cas sans commande	Cas avec Commande	Gain %
<b>TTS</b>	14600	12300	-15.6
<b>DP</b>	536250	536250	-
$V_{moy}$	65	70	6.8
$CO$	252770	252620	-3.75
$HC$	298500	215520	-27.80
<b>O-Viry</b>	Cas sans commande	Cas avec Commande	Gain %
<b>TTS</b>	11977	10775	-10
<b>DP</b>	206470	206470	-
$V_{moy}$	62	73	17.7
$CO$	525660	478590	-9.75
$HC$	157850	148740	-6.06

La figure 4.8 montre l'évolution de la distance parcourue sur l'axe considéré.

De même, la figure 4.9, permet de visualiser le temps total passé par tous les véhicules dans le réseau considéré.

## 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons démontré l'efficacité du contrôle d'accès isolé comme solution viable pour faire face aux problèmes quotidiens de congestions. En effet, le CA représente l'action directe, relativement moins chère, par rapport à la construction de nouvelle infrastructure, et plus efficace dans le domaine de la commande des réseaux autoroutiers et les VRU.

Soulignons qu'ALINEA en Europe et l'algorithme Demande/Capacité (DC) aux Etats-Unis, sont parmi les stratégies les plus utilisées par les exploitants sur le terrain. Cependant, l'algorithme DC représente une commande en boucle ouverte très sensible aux perturbations, très fréquentes dans

7. La forte sensibilité aux variations des paramètres de METANET, impose un calibrage rigoureux qui permet d'améliorer les résultats.

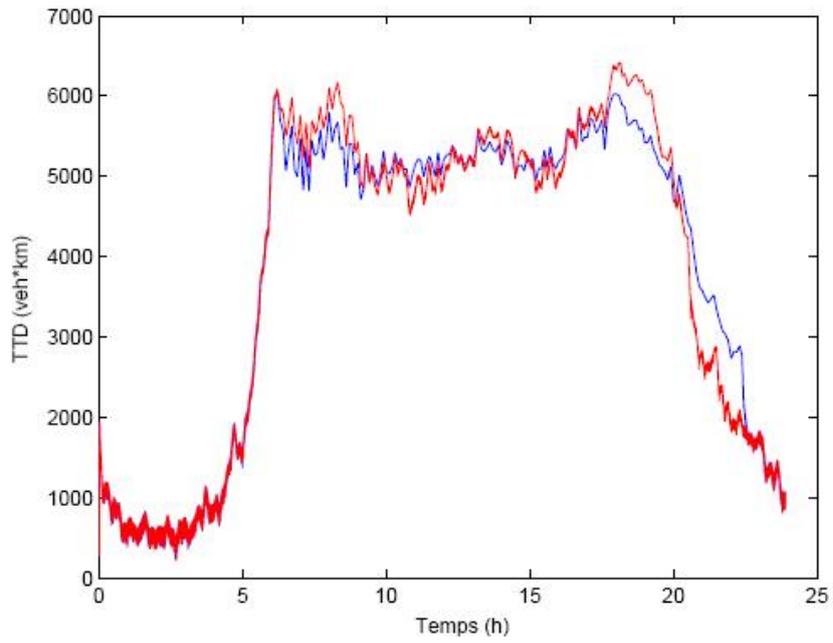


FIGURE 4.8 – Distance parcourue : – sans commande, – avec commande

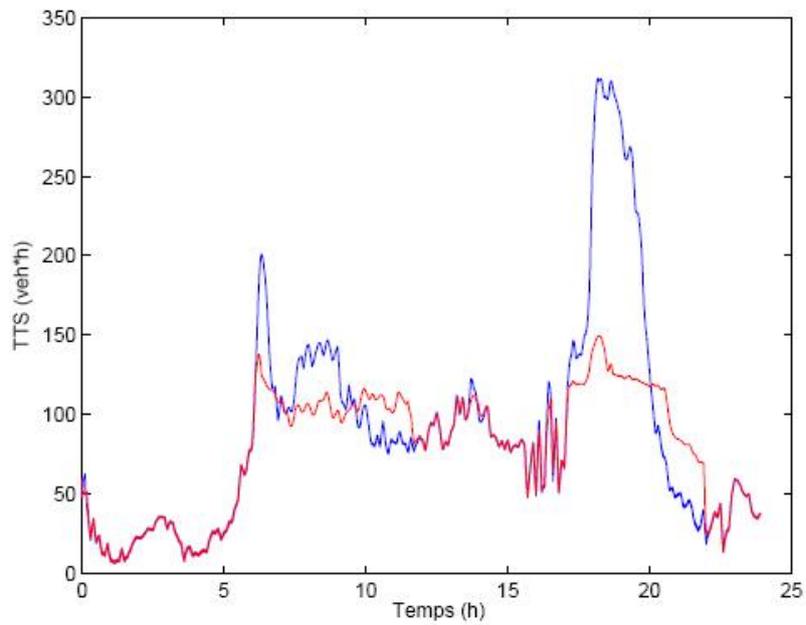


FIGURE 4.9 – Temps de trajet : – sans commande, – avec commande

le domaine du trafic. ALINEA, qui par ailleurs, est une commande par rétro-action (boucle fermée), représente un simple intégrateur et est basée sur une linéarisation du système aux points d'équilibre.

Nous avons donc démontré que l'approche basée sur l'utilisation conjointe de la platitude différentielle et la commande par mode glissant d'ordre supérieur, représente une alternative très intéressante pour le contrôle d'accès. Les résultats des simulations réalisées sur des données réelles ont permis de valider notre approche. En effet, l'avantage de la platitude est qu'elle permet l'inversion du système sans recours à l'intégration d'aucune équation différentielle. Afin de maintenir la densité du trafic au-dessous d'une valeur critique, on obtient alors une trajectoire planifiée. Le bouclage est réalisé par la commande par mode glissant qui, rappelons qu'elle est robuste aux erreurs de modélisation et aux perturbations non mesurables. Soulignons enfin, que l'outil de simulation utilisé, METANET, est très sensible aux variations des paramètres. Ainsi, une étude comparative avec les mêmes paramètres d'ALINEA ne reflète pas la réalité de la comparaison. En effet, la mise en œuvre d'ALINEA, impose un calibrage des différents paramètres de METANET, ce qui risque de fausser la comparaison avec notre algorithme.

Enfin, les différents résultats obtenus méritent d'être comparés avec un second algorithme (en cours de développement) qui est basé sur le principe de la coordination, tirant profit des mesures de plusieurs rampes.

# Chapitre 5

## Conclusions

Dans cette thèse, nous avons traité les problèmes de commande du flux de trafic autoroutier, la modélisation et l'évaluation d'une nouvelle méthode de contrôle d'accès isolé permettant d'améliorer la fluidité du trafic pour répondre aux exigences socio-économiques et environnementales.

Dans l'état de l'art, nous avons présenté de bases de la théorie de commande dans le cadre d'une application autoroutière - le contrôle d'accès coordonné et isolé, la limitation de la vitesse, les panneaux à messages variables. En raison de la complexité des différentes actions de contrôle et de mesures, nous nous sommes focalisé sur l'approches dites de contrôle d'accès. Le principe du contrôle d'accès consiste à régler le flux de la rampe d'entrée par un feu tricolore et de maximiser la capacité de l'autoroute.

Dans le deuxième chapitre nous avons décrit le concept de la commande par mode glissant d'ordre supérieur (CMGOS) à la base de la platitude différentielle pour le contrôle d'accès isolé. L'algorithme de contrôle est basé sur l'inversion du système en utilisant le concept basé sur la platitude. La platitude différentielle est caractérisée par le comportement du système global qui est décrit par la trajectoire d'une sortie plate et un certain nombre de ses dérivées en temps successifs. L'avantage de cette méthode est qu'elle ne nécessite pas l'intégration des équations différentielles. Le mode glissant d'ordre supérieur est utilisé pour forcer le système à converger vers le comportement désiré, pour surmonter les problèmes dus aux incertitudes et aux variations paramétriques du système. La conception est basée sur l'évolution de la structure du contrôleur dans la réponse aux changements des états du système pour obtenir une réponse désirée. Pour éviter les oscillations, nous avons utilisé l'algorithme de commande par mode glissant d'ordre supérieur pour rejeter les incertitudes du système et pour le suivi d'une trajectoire de référence. Le mode glissant d'ordre supérieur généralise l'idée de base de mode glissant agissant sur les dérivées supérieures de l'écart du système de la commande.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons présenté la modélisation macroscopique du flux de trafic autoroutier en utilisant l'outil de simulation METANET. La mise en œuvre des techniques de gestion de trafic impose l'utilisation des modèles pour comprendre et décrire les phénomènes qui se produisent sur les routes. Les modèles macroscopiques, basés sur le mouvement moyen d'un groupe de véhicules, sont mieux adaptés aux conditions de la conduite sur l'autoroute. Cette partie traite la mise en oeuvre de la méthode proposée et l'analyse de l'évolution des variables de trafic pendant les simulations numériques.

Dans le troisième chapitre, nous avons montré les résultats de simulation et de l'évaluation de la

stratégie de commande par mode glissant et la platitude. Les simulations ont été menées en utilisant des données réelles. Le recueil des données a été effectué à partir des capteurs à boucles électromagnétiques disposés le long de l'autoroute ayant servi de site de référence. Ces boucles permettent de compter le nombre de véhicules qui passent sur les routes, leur vitesse et le taux d'occupation.

Le contrôle d'accès du flux de trafic autoroutier reste toujours une alternative potentiellement plus efficace par rapport à la reconstruction des autoroutes, pour résoudre le problème des congestions quotidiennes. Chaque système de contrôle du trafic doit satisfaire certains objectifs – réduire les congestions, diminuer la pollution de l'environnement et minimiser les arrêts et les retards. Les mesures qualitatives offrent une base pour déterminer la capacité du système de contrôle du trafic et leurs stratégies pour atteindre les objectifs désirés. La connaissance du temps de parcours est un élément de confort pour l'utilisateur. On observe en effet une diminution du niveau de stress et une modification de son comportement lorsqu'il perçoit une durée de trajet de son déplacement diminué. Les usagers deviennent satisfaits quand ils arrivent à temps à leur point de destination. Le contrôle d'accès rend la conduite confortable même à une vitesse assez élevée sans conséquences négatives sur l'environnement.

Le travail effectué dans cette thèse démontre l'importance de l'approche non linéaire, présentée par la commande par mode glissant d'ordre supérieur à base de la platitude différentielle. Celle-ci permet de diminuer l'impact des congestions du point de vue social et environnemental. Elle permet également de diminuer le temps de parcours, et de réduire la consommation de carburant et les émissions polluantes sur le réseau de transport. Cette méthode prend en compte l'évolution de la demande, de la densité, de la vitesse et du flux, le nombre de voies de circulation, la présence des rampes d'entrées ou de sortie, qui peuvent influencer le comportement des conducteurs dans les conditions de congestions. Ces travaux peuvent être améliorés et enrichis. Dans les travaux futurs, il peut être envisagé de réaliser des prévisions à plus long terme, le temps de simulation peut être prolongé au-delà d'une semaine ou d'un mois. L'approche proposée est une base à partir de laquelle peut désormais reposer les développements futurs du contrôle d'accès coordonné, le contrôle intégré de flux de trafic autoroutier et l'estimation des paramètres de trafic. Du point de vue des perspectives l'approche de CMGOS à la base de la platitude mérite d'être explorée et d'être adaptée au niveau de la modélisation microscopique et mésoscopique. Du point de vue des critères d'évaluation on peut ajouter les termes de bruit et la sécurité. Nous pouvons également élargir notre investigation dans le cas de différentes variations de la demande, l'influence de météo, des travaux sur l'autoroute ou des incidents qui peuvent influencer le comportement de conducteurs.

# Bibliographie

- [1] A. Alessandri, A. Di Febbraro, A. Ferrara, and E. Punta. Optimal control of freeways via speed signalling and ramp metering. *Control Engineering Practice*, 6 :771–780, 1998.
- [2] Chul-Ho Bae, Ki-Yong Cho, Sung-Ho Ji, Bae-Young Kim, and Myung won Suh. Multi-agent based traffic simulation and integrated control of freeway corridors : Part 2 integrated control optimization. *Journal of Mechanical Science and Technology* 23 (2009) 1374-1382, DOI 10.1007/s12206-008-1108-z, 2009.
- [3] L. Benmohamed and S. M. Meerkov. Feedback control of highway congestion by a fair on-ramp metering. In *in Proc. 33rd IEEE Conf. Decision and Control*, vol. 3, pp. 2437–2442, 1994.
- [4] H. Buhler. Réglage par mode de glissement. Technical report, Presses Polytechniques Romandes, 1986.
- [5] Jr. Carvell, James D., Kevin Balke, Jerry Ullmant, Katherine Fitzpatrick, Lewis Nowlin, and Christophe Brehmer. Freeway management handbook. Technical report, Texas Transportation Institute. Report No.FHWA-SA-97-064, 1997.
- [6] CERTU. La régulation des accès. un outil pour l’exploitation des voies rapides urbaines. Technical report, Rapport d étude. CERTU, 1997.
- [7] I. C. Cheng, J. B. Cruz, and J. G. Paquet. Entrance ramp control for travel rate maximization in expressways. Technical report, Transp. Res., vol. 8, pp. 503–508, 1974.
- [8] C.-C. Chien, Y. Zhang, and P.A. Ioannou. Traffic density control for automated highway systems. *Automatica*, 33 :1273–1285, 1997.
- [9] P. Cohn. Free rings and their relations. *Ed. Academic Press, London*, 1985.
- [10] Le Coz. Les opérations expérimentales : la régulation du trafic corridor nord de marseille. Technical report, Rapport technique, DDE des Bouches du Rhône, 1979.
- [11] A. Di Febbraro, T. Parisini, S. Sacone, and R Zoppoli. Neural approximations for feedback optimal control of freeway systems. In *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 50 (1), pp. 302–312, 2001.
- [12] V. Dryankova, H. Abouašsa, and D. Jolly. High order sliding mode control for real-time ramp metering. In *International Conference on Communications, Computing and Control Applications, CCCA-2011. 3-5 March. Hammamet, Tunisia*, 2011.
- [13] A.F. Fillipov. Differential equations with discontinuous right-hand side. *Amer. Math. Soc. Trans.*, 62, pages pp.199–231, 1960.
- [14] Barak Fishbain, Ianir Ideses, David Mahalel, and Leonid Yaroslavsky. Real-time vision-based traffic flow measurements and incident detection. *Real-Time Image and Video Processing*, edited by Nasser Kehtarnavaz, Matthias F. Carlsohn, *Proc. of SPIE-IS&T Electronic Imaging, SPIE Vol. 7244, 72440I*, 2009.

- [15] M. Fliess. A note on invertibility of nonlinear input-output differential systems. *Systems and Control Letters*, 8 :pp. 147–151, 1986.
- [16] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, and P. Rouchon. Sur les systèmes non linéaires différentiellement plats. *C.R. Acad. Sci.*, I-315 :619–624, 1992.
- [17] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, and P. Rouchon. Sur les systèmes non linéaires différentiellement plats. *C.R. Acad. Sci.*, I-315 :619–624, 1992.
- [18] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, and P. Rouchon. Flatness and defect of non-linear systems : Introductory theory and examples. *Int. J. Control*, 61 :1327–1361, 1994.
- [19] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, and P. Rouchon. Flatness and defect of non-linear systems : Introductory theory and examples. *Int. J. Control*, 61 :1327–1361, 1995.
- [20] H. Haj-Salem. Alinea : un nouvel outil de régulation d'accès isolé sur autoroute : étude comparative sur site réel. Technical report, Rapport technique, N<sup>o</sup>8, INRETS, 1988.
- [21] H. Haj-Salem. Résultat de l'évaluation de la régulation d'accès sur l'île de France. Technical report, Rapport DIRIF, 2008.
- [22] H. Haj-Salem, J.M. Blosseville, and M. Papageorgiou. Alinea-a local feedback control law for on-ramp metering : A real life study. In *3<sup>rd</sup> IEEE International Conference on Road Traffic Control pp. 194-198, Londres, 1990.*
- [23] H. Haj-Salem and F. Middelham. Experimental results and comparative analysis. Technical report, deliverable Project EUROCOR, Vol. 11A, (V2017), Drive-Office, Bruxelles, Belgique, 1995.
- [24] Habib Haj-Salem, Nadir Farhi, and Jean-Patrick Lebacque. Field evaluation results of new isolated and coordinated ramp metering strategies in France. in *INCOM 2012. 14th Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, 2012.*
- [25] J. K. Hedrick and A. Girard. Control of nonlinear dynamic systems : Theory and applications. 2005.
- [26] A. Hegyi, B.D. Schutter, and H. Hellendoorn. Model predictive control for optimal coordination of ramp metering and variable speed limits. Technical report, Transportation Research Part C 13 (2005) 185-209. Delft Center for Systems and Control, Delft University of Technology, Mekelweg 2, 2628 CD, Delft The Netherlands., 2005.
- [27] Andreas Hegyi. *Model Predictive Control for Integrating Traffic Control Measures, Series T2004/2.* PhD thesis, The Netherlands TRAIL Research School, 2004.
- [28] F.S. Ho and P. Ioannou. Traffic flow modeling and control using artificial neural networks. In *IEEE Control Systems*, t. 16, pp. 16–26, 1996.
- [29] S. Hoogendoorn and P. Bovy. Continuum modelling of multiclass traffic flow. Technical report, Transportation Research Part B 34, 123–146.
- [30] V. Iordanova, H. Abouaïssa, and D. Jolly. Sliding mode control and flatness-based concept for real-time ramp metering. In *17th IFAC World Congress. Seoul, Korea, July 6-11, 2008, 2008.*
- [31] Violina Iordanova. *Contribution à la modélisation et la commande du trafic routier : Approches par Bond Graph et commande par platitude.* PhD thesis, Université d'Artois, France, 2006.

- [32] L. Isaksen and H.J. Payne. Suboptimal control of linear systems by augmentation with application to freeway traffic regulation. In *IEEE Trans. Automat. Contr.*, t. 18, p. 210–219, 1973.
- [33] U. Itkis. Control systems of variable structure. *J. Wiley Ed. New-york*, 1976.
- [34] Abdo J. Construire des nouvelles infrastructures : La solution à la congestion du trafic. *Collection Technique CIMBETON, T. 32*, 2011.
- [35] Pushkin Kachroo and Kumar Krishen. System dynamics and feedback control design problem formulation for real time ramp metering. *Transactions of Society for Design and Process Science*, 2000.
- [36] Lawrence A. Klein, Milton K. Mills, and David R.P. Gibson. Traffic detector handbook : Third edition. *U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-HRT-06-108, I*, October 2006.
- [37] E.R. Kolchin. Differential algebra and algebraic group. *Academic Press, New York, USA*, 1973.
- [38] A. Kostialos and M. Papageorgiou. Motorway network traffic control systems. *European Journal of Operational Research*, 152 :321–333, 2004.
- [39] A. Kotsialos and M. Papageorgiou. The importance of traffic flow modeling for motorway traffic control. *Networks and Spatial Economics, Kluwer Academic Publishers, Manufactured in the Netherlands. Dynamic Systems and Simulation Laboratory, Technical University of Crete, 73100 Chania, Greece, I* :179–203, 2001.
- [40] A. Kotsialos and M. Papageorgiou. A hierarchical ramp metering control scheme for freeway networks. In *American Control Conference June 8-10, 2005 Portland, OR, USA, ThA17.4*, 2005.
- [41] Apostolos Kotsialos, Markos Papageorgiou, Christina Diakaki, Yannis Pavlis, and Frans Middelham. Traffic flow modeling of large-scale motorway networks using the macroscopic modeling tool metanet. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 3 :282–292, 2002.
- [42] T. Y. Lam. A first course in noncommutative rings. *Ed. Springer Verlag, New York, USA*, 2001.
- [43] B. Laroche, Ph. Martin, and N. Petit. Commande par platitude, équations différentielles ordinaires et aux dérivées partielles. Technical report, Notes de cours, n Cours, B7-4 du module Automatique Avancée, ([http : //cas.ensmp.fr/ petit/ensta/index.html](http://cas.ensmp.fr/petit/ensta/index.html)), 2004.
- [44] H. Lenz, R. Sollacher, and M Lang. Nonlinear speed-control for a continuum theory of traffic flow. In *14th World Congress of IFAC, vol. Q. Beijing, China, pp. 67–72*, 1999.
- [45] H. Lenz, R. Sollacher, and M. Lang. Standing waves and the influence of speed limits. In *Proceedings of the European Control Conference, Porto, Portugal, pp. 1228–1232*, 2001, 2001.
- [46] A. Levant. Universal higher-order sliding modes, differentiation and output feedback control. *Int. J. of control*, 76. no : 9/10 :924-941, 2003.
- [47] J. Lévine. Analyse et commande des systèmes non linéaires. Technical report, Centre Automatique et Systèmes école des Mines de Paris, 2004.
- [48] S. Mammar. *Systèmes de transport intelligents : Modélisation, information et contrôle*. Hermes- Lavoisier, 2007.

- [49] V. Manish. Higher order sliding mode control of differentially flat systems. Master's thesis, INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, BOMBAY, MUMBAI, 2004.
- [50] Ph. Martin, Murray R. M., and P. Rouchon. Flat systems. Technical report, Mini-course ECC'97, Brussels, pages 211-264, 1997.
- [51] D. P. Masher, D.W. Ross, P. J.Wong, P. L. Tuan, H. M. Zeidler, and S. Peracek. Guidelines for design and operating of ramp control systems. Technical report, SRI, Menid Park, CA, Stanford Res. Inst. Rep. NCHRP 3-22, SRI Project 3340, 1975.
- [52] A.D. May. Traffic flow fundamentals. *Prentice-Hall*, 1990.
- [53] Frans Middelham and Henk Taale. Ramp metering in the netherlands : An overview. control in transportation systems, volume 11, part 1. In *11th IFAC Symposium on Control In Transportation Systems*, 2006.
- [54] OECT. Traffic congestion in europe. european conference of ministers of transport. Technical report, Economic Research Center, 1999.
- [55] M. Papageorgiou. Applications of automatic control concepts to traffic flow modelling and control. *Berlin, Germany : Springer-Verlag. 86 Coordination of ramp metering control in the motorway networks*, 86, 1983.
- [56] M. Papageorgiou, J.-M. Blosseville, and H. Hadj-Salem. Modelling and real-time control of traffic flow on the southern part of boulevard périphérique in paris part i : Modelling. *Transportation Reseach*, 5, N24A :345–359, 1990.
- [57] M. Papageorgiou, H. Hadj-Salem, and J.M. Blosseville. Alinea : A local feedback control law for on-ramp metering. Technical report, U.S. Dept. Transp., Washington, DC, Transp. Res. Record 1320, 1991.
- [58] M. Papageorgiou, H. Haj-Salem, and F. Middleham. Alinea local ramp metering : summary of fields results. *Transportation Research Record*, 1603 :90–98, 1997.
- [59] M. Papageorgiou and A. Kostialos. Freeway ramp metering : An overview. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.3, No.4,r*, Decembe 2002.
- [60] Marcos Papageorgiou. Overview of road traffic control strategies. In *IFAC DECOM-TT 2004, Automatic Systems for Building the Infrastructure in Developing Countries, October 3-5,2004, Bansko, Bulgaria*, 2004.
- [61] Marcos Papageorgiou, Christina Diakaki, Vaya Dinopoulou, Apostolos Kotsialos, and Yibing Wand. Review of road traffic control strategies. In *Proceedings of The IEEE, VOL.91, No.112, 00128-9219/03, December 2003*, 2003.
- [62] Ioannis Papamichail, Elias Kosmatopoulos, Markos Papageorgiou, Ioannis Chrysoulakis, John Gaffney, and Vincent Vong. Hero coordinated ramp metering implemented at the monash freeway. In *2nd International Symposium of Freeway and Toallway Operations, Honolulu, Hawaii, June 21-24, 2009*, 2009.
- [63] Charles Parey and Georges Philippe. *Les transport intelligents. Les cahier du numérique*. Hermes Science Europe, Directeur d publication, 2001.
- [64] H. J. Payne. Models of freeway traffic and control. mathematical models of public systems. *Simulation Council Proceedings*, 1(1), 1971.
- [65] W. Perruquetti and J.P. Barbot. Sliding mode control in engineering. *Control Engineering Series, Marcel Dekker, New York*, 2002.

- [66] J.F. Ritt. Differential algebra. *American Mathematical Society, New York, USA*, 1950.
- [67] P. Rouchon. Flatness based control of oscillators. *ZAMM Z. Angew. Math. Mech.*, 85 (6), pages pages 411–42, 2005.
- [68] J. Rudolph. Flatness based control of distributed parameter systems. *Shaker Verlag*, 2003.
- [69] S. C. Schwartz and H. H. Tan. Integrated control of freeway entrance ramps by threshold regulation. In *in Proc. IEEE Conf. Decision and Control*, pp. 984–986, 1977.
- [70] H. Sira-Ramirez and S.K. Agrawal. Differentially flat systems. *Marcel Dekker*, 2004.
- [71] H. Sira-Ramirez and R. Castro-Linares. Sliding mode rest-to-rest stabilization and trajectory tracking for discretized flexible joint manipulator. *Dynamic and Control Jour.*, 10, pp : 87-105, *Kluwer Academic Publishers*, 2000.
- [72] E. Smaragdīs and M. Papageorgiou. A series of new local ramp metering strategies. Technical report, Transport Research Board 82nd Annual Meeting January 12-16, Washington, D.C, 2003.
- [73] S. Smulders. Control of freeway traffic flow by variable speed signs. *Transportation Research Part B*, 24 (2) :111–132, 1990.
- [74] D. Tabac. A linear programming model of highway traffic control. In *in Proc. 6th Annu. Princeton Conf. Information Science and Systems*, pp. 568–570, 1972.
- [75] V. Utkin. *Sliding modes in control and optimization*. Springer, Berlin, 1992.
- [76] P.E. Vidal. *Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation*. PhD thesis, Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [77] C. F. Wang. On a ramp-flow assignment problem. Technical report, *Transp. Sci.* vol. 6, pp. 114–130, 1972.
- [78] Yubin Wang, Jan H. van Schuppen, and Jos Vrancken. On-line distributed prediction of traffic flow in a large-scale traffic network. *ITSW*, 2012.
- [79] D. Tom van Vuren Watling. The modeling of dynamic route guidance systems. Technical report, Institute of Transport Studies, University of Leed, Working Paper 341, July 1991.
- [80] J. A. Wattleworth. Peak-period analysis and control of a freeway system. Technical report, Highway Res. Board, Washington, DC, Highway Res. Record 157, 1965.
- [81] Wikipedia. Systèmes de transport intelligents. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Systme\\_de\\_transport\\_intelligent](http://fr.wikipedia.org/wiki/Systme_de_transport_intelligent).
- [82] L. S. Yuan and J. B. Kreer. Adjustment of freeway ramp metering rates to balance entrance ramp queues. Technical report, *Transp. Res.*, vol. 5, pp.127–133, 1971.

# Liste des publications

## **Revue Internationale avec Comité de Lecture**

- Hassane ABOUAISSA, Vesela DRYANKOVA, Daniel JOLLY, Real-Time Ramp Metering : High-Order Sliding Mode Control and Differential Flatness Concept, International Journal of Automation and Control Engineering, IJACE, Volume 2 Issue 4, November 2013.

## **Conférence Internationale avec Comité de Lecture**

- Vesela DRYANKOVA, Hassane ABOUAISSA, Daniel JOLLY, Habib HAJ-SALEM, Emil NIKOLOV, Simulation-Based Evaluation of New Freeway Isolated Ramp Metering, 13th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems, IFAC CTS'12, Sofia, Bulgaria, septembre, 2012.
- Vesela DRYANKOVA, Hassane ABOUAISSA, Daniel JOLLY, Habib HAJ-SALEM, Traffic Network Ramp Metering Based on High Order Sliding Mode and Flatness Approaches : A Case Study, First IEEE International Conference on Mobility, Security, and Logistics in Transport, IEEE MSLT'2011, Hammamet, Tunisia, juin, 2011.
- Vesela DRYANKOVA, Hassane ABOUAISSA, Daniel JOLLY, High Order Sliding Mode Control for Real-Time Ramp Metering, IEEE Conf. on Communications, Computing and Control Applications, IEEE-CCCA'11, Hammamet, Tunisia, mars, 2011.

## Abstract

The technological advances, due to the advent of the new information and communication technologies have given rise to the Intelligent Transportation Systems (ITS) concept. The objectives of such applications are to provide effective solutions to deal with the daily problems of congestion. The importance as well as the socio-economic challenges raised by congestion requires the introduction of innovative solutions based on the latest advances in the automatic control field. The works presented in this thesis lie in the frame of ITS and treat the problems of the freeway and Urban Express Routes (UER) control. Among the used control techniques, our works focus mainly on the isolated ramp metering. The objective of this control measurement is to act on the on-ramp flow, through traffic lights, in order to keep the traffic density on the mainstream section around a critical threshold allowing then an optimal use of the freeway or UER infrastructures. The proposed algorithm rests on the jointly use of differential flatness and high order sliding mode control (HOSMC) concept. The main characteristic of the differential flatness lies in its ability to provide a trajectory generation, without integration of any differential equation of the studied model. On the other hand, the advantage of HOSMC is to allow a robust trajectory tracking even in the case of the presence of uncertainties and disturbances which are typical to traffic systems. The relevance of the proposed approach is validated through a set of numerical simulations using real-data from a part of the A6 freeway from Paris ring. In addition, the validation step has been enriched by the performance evaluation based on a set of criteria commonly used by the freeway practitioners. The obtained results paves the way to several perspectives in order to improve the proposed control approach and its generalization for more complex freeway networks.

Keywords : Intelligent Transportation Systems, Traffic Control, Differential Flatness, Sliding Mode Control.

## Résumé

Les avancées technologiques, dues à l'avènement des nouvelles technologies d'information et de communication, ont donné naissance au concept des Systèmes de Transport Intelligents (STI). Les objectifs de telles applications consistent à apporter des solutions efficaces pour faire face aux problèmes quotidiens des phénomènes de congestion. L'importance ainsi que les enjeux socio-économiques posés par les congestions imposent d'introduire des solutions innovantes utilisant les avancées récentes dans le domaine de la commande. Les travaux présentés dans cette thèse se situent dans le cadre des STI et traitent des problèmes de la commande du trafic autoroutier et sur les Voies Rapides Urbaines (VRU). Parmi les techniques de commande utilisée, nos travaux se focalisent principalement sur le contrôle d'accès isolé. L'objectif d'une telle action de régulation est d'agir sur le débit des rampes d'entrée, via des feux de signalisation, afin de maintenir la densité sur la voie principale aux alentours d'un seuil critique permettant ainsi, une utilisation optimale de l'infrastructure autoroutière ou des VRU. L'algorithme proposé repose sur l'utilisation conjointe de la platitude différentielle et le concept de la commande par mode glissant d'ordre supérieur. La principale caractéristique de la platitude réside dans sa capacité à assurer une génération de trajectoires sans intégration d'aucune équation différentielle du modèle étudié. L'intérêt de la commande par mode glissant d'ordre supérieur est de permettre le suivi de trajectoires d'une manière robuste même en présence d'incertitudes et de perturbations typiques aux systèmes de trafic. La pertinence de l'approche proposée est validée via un ensemble de simulations avec des données réelles d'une portion de l'autoroute A6 du périphérique de Paris. De plus, la validation a été enrichie par l'évaluation de performances basée sur des critères couramment utilisés par les exploitants. L'ensemble des résultats ouvre la voie à plusieurs perspectives d'amélioration et de généralisation de cette commande à des réseaux routiers plus complexes.

Mots-clés : Systèmes de transport intelligents, Commande du trafic, platitude différentielle, commande par mode glissant.