

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE 8 MAI 1945-GUELMA

Faculté des Sciences et de la Technologie

Laboratoire d'Automatique et Informatique de Guelma
Département de Génie Électrotechnique et Automatique



THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat 3^{ème} cycle en Automatique

Option : Automatique, Informatique Industrielle et Traitement de Signal

Estimation des systèmes linéaires à commutations : Application au trafic routier

Présentée par : ZEROUAL Abdelhafid.

Devant le jury :

Président :	BABOURI Abdesselam	Pr	U. Guelma
Directeurs de thèse :	KECHIDA Sihem	M.C.A	U. Guelma
	MESSAI Nadhir	Maître de Conférences	U.Reims, France
Examineur :	TEBBIKH Hicham	Pr	U. Guelma
Examineur :	LACHOURI Abderezak	Pr	U. Skikda
Examineur :	TOLBA Cherif	M.C.A	U. Annaba
Invité :	HAMDI Fatiha	M.C.B	U.Batna

Année Universitaire : 2016/2017

Estimation des systèmes linéaires à commutations :

Application au trafic routier

Résumé

Les travaux, menés dans cette thèse, s'attachent à la modélisation et à l'estimation des données du trafic dont l'objectif principal est de développer un modèle linéaire à commutation du trafic puis de synthétiser un observateur hybride permettant l'estimation de la densité du trafic. Cette thèse s'articule autour de deux volets. Le premier volet concerne la proposition d'un modèle hybride du trafic en se basant sur le modèle de transmission cellulaire CTM. Le modèle proposé est sous forme d'un système linéaire à commutations qui bascule entre un ensemble de modes respectant la propagation de l'onde de congestion où chaque mode présente un état spécifique du trafic dans un tronçon choisi. En outre, dans cette partie et dans le but de valider l'approche de modélisation, une nouvelle stratégie de calibrage est proposée pour l'identification des paramètres macroscopiques du modèle. Le deuxième volet porte sur une stratégie originale d'estimation où nous proposons la démarche de synthèse d'un observateur hybride pour l'estimation des données du trafic telles que la densité. Les conditions de stabilité de l'erreur d'estimation sont exprimées en termes d'inégalités matricielles linéaires (LMI). Enfin, les méthodologies de modélisation et d'estimation développées dans le cadre de cette thèse ont été validées sur un tronçon routier choisi en utilisant des données réelles fournies par le système de mesure des performances de Californie PeMS. Après calibrage des données, les résultats de simulation obtenus montrent l'efficacité et la robustesse, aussi bien de la modélisation et de l'estimation. Ainsi, ces contributions ont permis d'enrichir les travaux initiés au LAIG et permettent d'envisager de nouvelles pistes de recherche dans ce domaine susceptibles d'apporter des solutions intéressantes, spécialement dans la commande et la surveillance.

Mots clés : Modélisation du trafic, modèle macroscopique, CTM, systèmes hybrides, système linéaire à commutation, les observateurs hybrides, LMI.

Estimation of linear switched systems: Application to road traffic

Abstract

The work carried out in this thesis focuses on the modelling and estimation of traffic data in which the main objective is to develop a switched linear traffic model and then to synthesize hybrid observer allowing the estimation of traffic density. This thesis is divided into two main parts. The first part concerns the proposal for a hybrid model of traffic based on the cell transmission model CTM. The proposed model is in the form of a linear switching system which switches between a set of modes respecting congestion wave propagation where each mode has a specific status of traffic in a chosen road section. Moreover, in this part and in order to validate the modelling approach, a new calibration strategy is proposed for the identification of the macroscopic parameters. The second part deals with an original strategy of estimation where we propose hybrid observer synthesis for the estimation of traffic data such as the density. The stability conditions of the estimation error are expressed in terms of linear matrix inequalities (LMI). Finally, developed estimation and modeling methodologies in the framework of this thesis are validated on a selected road section using real data provided by the measurement system performance PeMS of California. After calibration data, simulation results show the effectiveness and robustness, both of modeling and estimation. Thus, these contributions have allow to enrich the works begun at LAIG and allow to consider new research outlooks in this field that can provide interesting solutions, especially in control and monitoring.

Keywords : Traffic modelling, macroscopic model, CTM, hybrid systems, switched linear systems, hybrid observer, LMI.

تقدير الأنظمة الخطية التحويلية: تطبيق لحركة المرور على الطرق

الملخص:

ترتكز الأعمال المقدمة في هذه الأطروحة على النمذجة وتقدير بيانات الحركة المرورية التي تهدف أساسا الى تطوير نموذج الحركة الخطية التحويلي و من ثم هيكله المراقب الهجين الذي يسمح بتقدير الكثافة المرورية. وتنقسم هذه الأطروحة إلى قسمين رئيسيين. القسم الأول يتعلق باقتراح نموذج هجين لحركة المرور اعتمادا على نموذج الارسال بين الخلايا MTC. النموذج المقترح هو في شكل نظام خطي تحويلي و الذي يتحول بين مجموعة من وسائط محترما اتجاه موجات الازدحام المروري حيث كل واسطة لديها حالة معينة من حركة المرور في مقطع الطريق الذي تم اختياره. وعلاوة على ذلك ومن أجل التحقق من صحة نهج النمذجة، تم اقتراح في هذا الجزء استراتيجية معايير جديدة لتحديد المعالم المايكروسكوبية. في حين يتناول الجزء الثاني تقديم استراتيجية جديدة لتقدير البيانات حيث نقترح نظام مراقب هجين لتقدير بيانات المرور كالكثافة. و لقد تم التعبير عن الظروف استقرار خطأ التقدير عن طريق المصفوفة الخطية الغير متساوية (IML). وأخيرا، يتم إختبار شرعية منهجيات التقدير والنمذجة المقترحة في إطار هذه الأطروحة على مقطع طريق باستخدام بيانات حقيقية التي يقدمها نظام أداء القياس SMeP لولاية كاليفورنيا. بعد بيانات المعايير، تشير نتائج المحاكاة على فعالية وقوة النمذجة و التقدير على حد سواء. وبالتالي، فإن هذه الإسهامات تساعد في إثراء أعمال مخبر الأوتوماتيك و الاعلام الالي "GIAL" المنتهجة في هذا المجال و تفتح افاق بحث جديدة توفر من خلالها حلول مثيرة للاهتمام خاصة في التحكم والرصد.

كلمات البحث: نمذجة المرور، نموذج المايكروسكوبي ، CTM، الأنظمة الهجينة ، الأنظمة الخطية التحويلية ، المراقبات الهجينة ، LMI.

Remerciements

Le travail de notre thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet TASSILI (un programme de soutien à la coopération scientifique franco-algérienne pilotée par les tutelles sous la responsabilité du Comité Mixte d'Évaluation et de Prospective (CMEP), composé d'experts des deux pays et de deux coprésidents) en collaboration entre le laboratoire LAIG de Guelma, Algérie, Gipsa-Lab de Grenoble, France et CReSTIC de Reims, France portant sur la gestion du réseau de trafic de la ville de Guelma, situé à l'Est de l'Algérie. À cette occasion je remercie les chefs du projet TASSILI en l'occurrence le Pr ALLA Hassane chef de projet du côté Français et Dr MESSAI Nadhir de m'avoir bien accueilli à CReSTIC université de Reims, durant mes années de formation et le Pr TEBBIKH Hicham chef de projet de côté Algérien qui n'a ménagé aucun effort durant tout le long du déroulement de la thèse et d'avoir consenti d'être mon examinateur de thèse.

Mes vifs remerciements s'adressent particulièrement à mes encadreurs Dr KECHIDA Sihem et Dr MESSAI Nadhir qui ont, non seulement dirigé ce travail, mais n'ont épargné aucun effort pour que je puisse préparer ma thèse dans de bonnes conditions. Je tiens aussi, à leur témoigner mon admiration pour leurs hautes qualités pédagogiques et humaines. Ils m'ont encouragé et épaulé. J'ai toujours bénéficié de leurs connaissances, de leur expérience et de leur perspicacité pour mener à bien ce travail. J'espère avoir été à la hauteur de votre confiance et soyez assuré de ma très vive gratitude et de mon éternelle amitié. Je n'oublierai jamais votre soutien.

Je tiens tout particulièrement à remercier Dr. HAMDI Fatiha, qui m'a aidé dans ce travail de mémoire grâce à leurs expériences qu'ils m'ont enrichies scientifiquement, spécialement dans la partie d'estimation.

J'exprime également ma réelle gratitude à Monsieur le Pr BABOURI Abdessalem, pour avoir présidé mon jury et à Messieurs Pr LACHOURI Abderezak et Dr TOLBA Cherif pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'avoir participé en tant qu'examineurs.

Mes remerciements s'adressent aussi à mes collègues et à l'ensemble des chercheurs du LAIG pour leur ambiance conviviale et les bons moments que nous avons passé ensemble.

Table des matières

Remerciements	iv
Table des matières	vi
Table des figures	x
Liste des tableaux	xi
Liste des algorithmes	xi
Liste des abréviations	xiii
Introduction générale	1
1 Aperçu sur la modélisation du trafic	5
1.1 Introduction	6
1.2 Mesure du trafic	7
1.2.1 Capteurs et technologies de mesure des données de trafic . . .	7
1.2.1.1 Les détecteurs à boucles inductives	7
1.2.1.2 Les capteurs magnétiques (les magnétomètres)	7
1.2.1.3 Les capteurs pneumatiques	8
1.2.1.4 Les radars à micro-ondes et lasers	8
1.2.1.5 Les détecteurs vidéo	8
1.2.1.6 Les Probes véhicules	8
1.2.2 Les éléments mesurés du trafic	9
1.2.2.1 Le taux d'occupation	9
1.2.2.2 Le débit	9
1.2.2.3 La vitesse	9
1.2.2.4 Le temps de parcours	10

1.3	Critères de classification des modèles de trafic	10
1.3.1	Temps et nature des variables	10
1.3.1.1	Les modèles continus	10
1.3.1.2	Les modèles discrets (à évènements discrets)	10
1.3.1.3	Les modèles hybrides	11
1.3.2	Niveau de détail	11
1.3.3	Représentation des processus	11
1.3.4	Opérationnalisation	12
1.4	La modélisation microscopique	12
1.4.1	Les variables microscopiques	12
1.4.1.1	L'espace inter-véhiculaire	12
1.4.1.2	Le temps inter-véhiculaire	13
1.4.1.3	La vitesse moyenne	13
1.4.1.4	L'accélération instantanée	14
1.4.2	Les modèles microscopiques	15
1.4.2.1	Modèles de véhicule-suiveur	15
1.4.2.2	Modèle d'automate cellulaire	19
1.4.2.3	Modèle de files d'attente	21
1.5	La modélisation mesoscopique	21
1.5.1	Les modèles fondés sur les distributions des écarts temps inter- véhicules	22
1.5.2	Les modèles mesoscopiques de type cluster	22
1.5.3	Les modèles de Prigogine et Herman basé sur la cinétique des gazes	23
1.6	La modélisation macroscopique	24
1.6.1	Les variables macroscopiques	24
1.6.1.1	La densité	24
1.6.1.2	Le débit	24
1.6.1.3	La vitesse	25
1.6.2	Les Modèles macroscopiques	25
1.6.2.1	Modèle de premier ordre Lighthill-Whitham-Richards	26
1.6.2.2	Le modèle de transmission cellulaire (CTM)	32
1.6.2.3	Le modèle à commutation (Switched Mode Model « SMM »)	35
1.6.2.4	Modèles d'ordre supérieur	37
1.7	Conclusion	40
2	Modélisation et calibrage d'un modèle à commutation par morceaux du trafic	42
2.1	Introduction	43

TABLE DES MATIÈRES

2.2	Concepts liés aux systèmes dynamiques hybrides	44
2.2.1	Structure des systèmes hybrides	44
2.2.1.1	Partie discrète	45
2.2.1.2	Partie continue	46
2.2.1.3	Interface entre la partie discrète et la partie continue	46
2.2.2	Modélisation et définition formelle des systèmes dynamiques hybrides	47
2.2.3	Classes des systèmes dynamiques hybrides	50
2.2.3.1	Systèmes impulsionnels (Systèmes à sauts)	50
2.2.3.2	Systèmes à commutations	50
2.2.3.3	Systèmes linéaires affines par morceaux	51
2.3	Le modèle linéaire à commutation par morceau du trafic	52
2.3.1	Principes et descriptions	52
2.3.2	La partie discrète du modèle	53
2.3.3	La partie continue du modèle	56
2.3.3.1	Les conditions aux limites	56
2.3.3.2	La dynamique de la densité dans une cellule i	57
2.3.3.3	La représentation d'état du modèle PWSL	59
2.3.3.4	La configuration des rampes	62
2.4	Méthodologie de calibrage des données de trafic	65
2.4.1	Description géométrique et données de trafic	68
2.4.1.1	Description géométrique	68
2.4.1.2	Données de trafic	68
2.4.2	Méthodologie de calibrage et estimation des paramètres de trafic	68
2.5	Conclusion	71
3	Synthèse d'un observateur hybride pour l'estimation des données de trafic	72
3.1	Introduction et problématique	73
3.2	Étude de l'observabilité du PWSL	74
3.2.1	Observabilité des systèmes linéaires	74
3.2.2	Étude d'observabilité du modèle PWSL pour un tronçon de quatre cellule	76
3.2.3	Résultats d'observabilité du modèle de PWSL général	81
3.3	Description du principe d'observateurs hybrides	81
3.4	Synthèse d'un observateur pour le PWSL	83
3.4.1	Estimation et reconstruction de l'état discret du trafic	83
3.4.2	Estimation de la dynamique de la densité (l'état continu)	84
3.5	Conclusion	88

4 Applications et discussions des résultats	89
4.1 Introduction	90
4.2 Système de mesure du performances PeMS	90
4.3 Validation du modèle PWSL du trafic par des données réelles.	92
4.3.1 Description géométrique du tronçon choisi pour la validation	92
4.3.2 Résultats de calibrage	93
4.3.3 Validation de PWSL et discussions des résultats de simulation	94
4.4 Résultats d'estimation des données de trafic	97
4.5 Conclusion	101
Conclusion et perspectives	102
Bibliographie	105

Table des figures

1.1	Le rôle d'un modèle dans un système physique	6
1.2	Tronçon routier	27
1.3	Relation vitesse-densité de Greensheilds	29
1.4	Diagramme Fondamental relation débit-densité	30
1.5	Formes des digrammes fondamentaux	32
1.6	Discrétisation spatial d'un tronçon routier	33
1.7	Les fonction offre et demande	34
1.8	Le diagramme Fondamental triangulaire du modèle CTM	35
1.9	Tronçon autoroutier de quatre cellules	36
2.1	Système hybride : interaction entre la partie continue et la partie discrète	45
2.2	Directions de propagation d'onde de congestion	53
2.3	L'évolution discret du modèle de PWSL	55
2.4	simple connexion	57
2.5	Connexion Merge	63
2.6	Connexion Diverger	64
2.7	Identification du flux maximal	70
2.8	Limitation des données congestionnées	70
2.9	Identification de densité critique	70
2.10	Identification de Q_m, v_f, w, ρ_{jam}	71
3.1	Structure d'observateur hybride du trafic	83
4.1	Position du tronçon de SR60-E sur la carte des autoroutes du Californie	93
4.2	La représentation schématique du tronçon d'autoroute de SR60-E de la Californie	93
4.3	Estimation de densité utilisant les données ré-échantillonné du tron- çon SR60-E	95
4.4	La densité estimée et mesurée du tronçon SR60-E	96
4.5	Evolution des modes discrets	97

Liste des tableaux

1.1	Formules des diagramme fondamentaux	31
2.1	Les modes discrets du trafic correspondant au comportement normal	55
2.2	Valeurs des paramètres de sélections selon l'état du trafic de la cellule i et ses cellules voisines	61
2.3	Valeurs des paramètres des cellules aux limites	61
3.1	Résultats d'observabilité du modèle PWSL pour un tronçon de 4 cellules	80
3.2	Étude générale d'observabilité du modèle PWSL	81
3.3	Stratégie de la partie discrète	84
4.1	Les mesures des boucles de détection disponible directement de PeMS	91
4.2	Résultats de calibrage et d'identification des paramètres du DF pour l'autoroute SR60-E	94
4.3	L'erreur relative moyenne	97

Liste des algorithmes

2.1	Méthodologie de calibrage	69
-----	-------------------------------------	----

Liste des abréviations

CTM	Cell Transmission Model,
DF	Diagramme Fondamental,
FR	Off-Ramp,
HOV	High-Occupancy Vehicle lane,
ITS	Intelligent Transportation Systems,
LMI	Linear Matrix Inequality,
LWR	Lighthill Whitham and Richards model,
ML	Mainline,
OR	On-Ramp,
PWSL	Piecewise Switched Linear traffic model,
PeMS	Performance Measurement System,
SMM	Switched Mode Model,
VDS	Vehicle Detector Stations,
VHT	Vehicle Hours Traveled,
VMT	Vehicle Miles Traveled,

Introduction générale

Au cours de ces trois dernières décennies, les véhicules motorisés sont devenus le moyen principal permettant de répondre pleinement aux besoins quotidiens de déplacements. Statistiquement diverses évaluations, effectuées durant la dernière décennie au monde entier, relèvent que le nombre de kilomètres parcourus et le nombre de véhicules enregistrés ont présenté une croissance de manière incroyable (à titre d'exemple en Algérie les statistiques révèlent une augmentation à 10 million de véhicules dans l'année 2014 alors que ce nombre ne dépasse pas 2 million véhicules avant l'année 2000). Par contre le nombre de voies augmente de façon très faible par rapport au nombre de véhicule.

Les statistiques relatives à d'autres pays peuvent être quelque peu différentes, mais l'état actuel ainsi que les prédictions restent de même nature et indiquent une forte augmentation du nombre de véhicules et très peu de nouvelles infrastructures. Parallèlement à cette croissance constante du nombre de véhicules particuliers, la progression du trafic routier de marchandises a significativement intensifié les problèmes quasi quotidiens de la congestion (i.e., une situation où les véhicules se gênent). La garantie d'un bon fonctionnement des infrastructures est devenue, ainsi, un défi capital que les centres de gestion de trafic essayent de relever en se dotant de certains outils et stratégie de régulation pour le développement des systèmes de transport intelligents (ITS). Le suivi de l'état du trafic et par conséquent la mesure ou l'estimation de sa densité est essentielle dans le développement des stratégies de contrôle et de gestion des ITS, telles que l'information du conducteur, l'état du trafic et l'implémentation des algorithmes de détection des incidents. Un compromis serait de trouver une approche qui peut permettre l'estimation des variables de trafic (densités et flux) en utilisant un nombre réduit de boucles d'induction sans

nécessiter du matériel supplémentaire ni de l'accord des pilotes.

Pour résoudre le problème d'estimation de la densité et du flux de trafic, deux approches modèles libres et à base modèles peuvent être utilisées. L'idée principale de l'approche modèle libre est de capitaliser sur la norme statistique et/ou une méthode heuristique pour le trafic sans se référer à un modèle de trafic. D'autre part, le principe des méthodes basées sur le modèle consiste à décrire et d'examiner la dynamique des véhicules dans des sections des autoroutes ou des réseaux urbains. Dans ce contexte, l'étude de l'écoulement du trafic fait actuellement appel à des modèles qui peuvent être microscopiques ou macroscopiques. Les modèles microscopiques s'intéressent au comportement individuel des conducteurs. Les modèles macroscopiques ignorent totalement les véhicules individuels et se concentrent aux flots de véhicules. L'intérêt de la modélisation microscopique réside dans la facilité de traitement de véhicules hétérogènes, la facilité d'implantation des aspects stochastiques, ainsi que la précision et la richesse des informations qui sont susceptible de fournir les vitesses individuelles, diagramme espace-temps, etc... Toutefois, elle nécessite un grand nombre de variables et un temps de calcul élevé.

Compte tenu du fait que les modèles que l'on souhaite développer seront exploités dans le cadre de la surveillance, l'approche microscopique a été exclue. En effet, le temps de calcul élevé et la nature des variables utilisées empêchent l'intégration de ces modèles dans un algorithme de surveillance en temps réel. En revanche, les modèles macroscopiques sollicitent des variables plus facilement mesurables et exigent un temps de calcul, relativement, faible. Ceci répond bien aux exigences de l'application de l'estimation des données de trafic et motive l'exploitation de ces modèles dans la suite de ce travail.

Les modèles macroscopiques considèrent que les équations qui régissent le trafic peuvent être écrites à partir de la vitesse du flot, de la concentration et du débit. Par ailleurs, ils définissent tous un diagramme fondamental. D'autre part, les études théoriques montrent que les modèles du premier ordre possèdent des accélérations non bornées et que les modèles d'ordre supérieur estiment des vitesses négatives. Enfin, le fonctionnement autour de la région critique reste un mystère. Par ailleurs, le modèle de Payne et ses variantes s'avèrent être hyperboliques. Cela signifie que la connaissance des conditions initiales est suffisante pour la prédiction de l'état du trafic. Cependant, jusqu'à présent, la recherche dans ce domaine donne lieu à des

points de vue antagonistes sur la validité théorique et l'utilité pratique des modèles d'ordre supérieur.

L'objectif de ce travail de thèse s'articule autour deux parties. La première concerne la modélisation d'un tronçon routier sous la forme d'un système linéaire à commutation et la validation du modèle en utilisant des données réelles. La seconde concerne la synthèse d'observateurs hybrides permettant l'estimation de la densité du trafic et la validation des grandeurs estimées.

Plan de thèse :

La démarche suivie au cours de ces travaux est basée dans les deux parties mentionnées auparavant, sur une construction pas-à-pas de la modélisation et la synthèse d'observateurs hybrides. Ce mémoire reproduit ce cheminement par étapes et est organisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons un état de l'art de la modélisation du trafic. Après un rappel de quelques concepts de base sur la mesure et les critères de classification des modèles de trafic, nous passons en revue, dans un premier temps, à la modélisation microscopique, le principe de cette modélisation, les variables microscopiques et les différents modèles existants dans la littérature. Ensuite nous exposons la modélisation mesoscopique, son principe et ces différents modèles. Enfin, nous nous intéressons à la modélisation macroscopique en détaillant ses variables, les modèles de premier ordre (modèle LWR, modèle CTM, modèle SMM) et les modèles d'ordre supérieurs.

Le deuxième chapitre concerne la modélisation et le calibrage d'un modèle à commutation par morceaux du trafic. Nous commençons par introduire les systèmes hybrides à savoir les définitions, la structure, la définition formelle et les diverses classes. Ensuite, nous nous concentrons au développement d'un modèle hybride de trafic d'une classe des systèmes linéaires à commutation et des systèmes linéaires par morceaux. On présente une brève explication (description) du modèle avec ces différentes configurations. Enfin, on propose une méthodologie de calibrage pour l'identification des paramètres macroscopiques du modèle.

Le troisième chapitre détaille la synthèse d'observateur hybride pour l'estimation des données de trafic. Nous commençons par l'étude d'observabilité du modèle proposé dans le chapitre 2, ensuite nous décrivons le principe de fonctionnement de

l'observateur hybride et nous clôturons ce chapitre par la conception d'observateurs hybrides pour le modèle développé.

L'étude en simulation des différents travaux est exposée en dernier chapitre. Les résultats de calibrage et de validation du modèle hybride obtenu ainsi que ceux de l'estimation des données de trafic sont exécutés et discutés. Ces résultats sont obtenus en utilisant des données réelles du trafic fournies par la base des données PeMS de Californie.

La synthèse des principaux résultats obtenus au cours de ces travaux de thèse ainsi que les principales perspectives de recherche sont présentées en conclusion.

Chapitre 1

Aperçu sur la modélisation du trafic

1.1 Introduction

Les modèles mathématiques ont un rôle très important dans l'étude des systèmes physiques. Dans lesquels, ils permettent de décrire les comportements et les performances physiques, afin de faciliter l'analyse et l'étude des différents phénomènes complexes qu'ils sont produits dans des systèmes réels. En outre, les modèles mathématiques représentent un outil indispensable dans les diverses stratégies de commande, de prédiction et d'analyse des systèmes physiques.

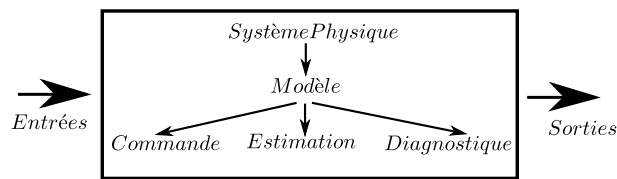


FIGURE 1.1 – Le rôle d'un modèle dans un système physique

Le trafic routier est considéré comme un des systèmes physiques complexes. Par conséquent, des efforts indispensables des scientifiques sont effectués pour étudier ce type de systèmes. Les premiers travaux sur l'écoulement du trafic sont réalisés par Greenshield [Greenshields 35], et depuis, les chercheurs portent un grand intérêt à ce domaine, afin de traiter et d'analyser les différents phénomènes physiques du trafic. Dans ce contexte, la modélisation du trafic vient pour répondre au besoin des scientifiques, où elle transmet les applications scientifiques aux problèmes du trafic.

Par conséquent, la représentation du flux de trafic a été concrétisée par trois approches essentielles. La première est l'approche macroscopique, elle présente l'avènement des premières théories de la modélisation du trafic. Cette approche est réalisée par l'analogie avec la mécanique des fluides. La deuxième est dite microscopique, elle s'intéresse au comportement individuel du couple véhicule-conducteur. Enfin, l'approche mesoscopique, c'est l'intermédiaire entre les deux autres approches, elle s'intéresse au comportement des paquets des véhicules au lieu d'individualité des véhicules ou l'agrégation des comportements.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons exposer un rappel général sur la mesure de trafic et les critères de classification des modèles de trafic. De plus, nous présentons un bref état de l'art sur la modélisation et les différents modèles du trafic. Enfin, nous clôturons le chapitre par une conclusion.

1.2 Mesure du trafic

La manipulation et la mise en œuvre des applications des systèmes de transport intelligent tels que la gestion de la circulation, le contrôle et la surveillance du trafic, nécessitent l'abondance des données de trafic avec une bonne qualité et parfois en temps réel spécialement pour la détection des bouchons et des positions d'embouteillage. Cette exigence prouve l'intérêt principal des mesures de trafic dans les différentes applications de système de transport intelligent. Les capteurs sont des outils les plus efficaces pour fournir les mesures de trafic.

1.2.1 Capteurs et technologies de mesure des données de trafic

Une large gamme de technologies de détection de véhicules existe permettant la collection des mesures de trafic soit d'une façon directe ou indirecte [Cohen 99] à travers des capteurs, qu'ils doivent être installés ou intégrés dans la chaussée. Dans ce paragraphe, nous présentons un aperçu sur quelques capteurs usuellement utilisés dans la mesure des données de trafic.

1.2.1.1 Les détecteurs à boucles inductives

Les capteurs inductifs sont des capteurs intégrés dans la chaussée. Le principe de fonctionnement de ce type de capteurs est fondé sur la détection de la modification d'énergie. Cette dernière est créée par les courants de Foucault qui sont induits lorsque les véhicules passent au-dessus de la boucle inductive. Les détecteurs à boucle inductive fournissent des mesures telles que les débits, l'occupation et les vitesses lorsqu'ils sont installés d'une façon adjacente. Ce type de capteurs présente un coût très élevé d'installation et de maintenance.

1.2.1.2 Les capteurs magnétiques (les magnétomètres)

Les capteurs magnétiques où les magnétomètres détectent les véhicules à travers les changements de champs magnétiques qui sont provoqués par la présence des véhicules sur le capteur. Ce type est intégrable au-dessus de la route, il présente les avantages de la facilité d'implémentation, la maintenance, la fiabilité et la réduction de temps de déploiement des mesures. De plus, il existe aussi des modèles équipés par des transmetteurs wifi. Les capteurs magnétiques sont classés parmi les dispositifs

de mesure les plus répandus dans le monde dans les autoroutes et les réseaux urbains [Papageorgiou 90, Elloumi 96].

1.2.1.3 Les capteurs pneumatiques

Les capteurs pneumatiques sont sous forme des tubes pneumatiques étendus d'une façon perpendiculaire sur la route, permettent la détection des essieux des véhicules lorsqu'ils sont passés sur les tubes. Ces capteurs délivrent des signaux lorsque la pression chute dans les chambres des vérins. Le nombre des véhicules est calculé à travers les impulsions cumulées dans un compteur. Les capteurs pneumatiques possèdent aussi la mesure des vitesses par l'application de deux tubes sur une surface raisonnable.

1.2.1.4 Les radars à micro-ondes et lasers

Ces capteurs sont de type actif, ils ont fondé sur le principe de réflexion des ondes électromagnétiques, qu'ils sont indiqués le mouvement et la présence des véhicules. Ces capteurs ont l'avantage de ne pas être affectés par les conditions météorologiques contrairement dans les capteurs vidéo. De plus, ils fournissent des mesures directes des vitesses. La détection des débits et des densités nécessite un traitement supplémentaire pour avoir ses valeurs dans ce type des capteurs.

1.2.1.5 Les détecteurs vidéo

Les caméras de surveillance jouent un rôle principal dans la gestion des routes en temps réel, ils transmettent des images et des vidéos pour aider les opérateurs. En outre, ces images et vidéos peuvent être aussi utilisées pour estimer les mesures souhaitées tels que le débit et la densité à travers les outils de traitement d'image. Ce type de capteurs fournit des données avec un niveau élevé de qualité et granularité. Par contre, ils sont très sensibles avec le changement des conditions météorologiques et de la visibilité. Aussi, ils nécessitent une maintenance fréquente.

1.2.1.6 Les Probes véhicules

La technique de probes véhicules est parmi les techniques les plus récentes dans le domaine du transport intelligent. Ce type de véhicule est connu aussi avec le nom de véhicules traceurs. Ils sont développés pour la surveillance et la collection des données de trafic en temps réel. Les probes véhicules sont des véhicules équipés par un système de géolocalisation [Herrera 10b]. Ils ont la capacité de communiquer et

de fournir des données telles que la position, la trajectoire spatio-temporelle et spécialement la vitesse et le temps de parcours [Herrera 10a]. Cette technique présente un coût d'implémentation très élevé.

Il existe également d'autres technologies de mesure des données tels que les capteurs à effet Doppler, les capteurs acoustiques actifs et capteurs à ultrasons. Aussi les fournisseurs et les lecteurs des étiquettes de péages des autoroutes, les lecteurs des plaques d'immatriculation, peuvent être utilisés dans la collection des données de trafic. Pour plus de détails sur les différents types de technologies de mesure, le lecteur est invité à se référer au [Klein 06].

1.2.2 Les éléments mesurés du trafic

Les technologies de mesure mentionnée précédemment servent à recueillir des mesures de trafic. Elles fournissent une source très riche des données de trafic comprenant les grandeurs suivantes.

1.2.2.1 Le taux d'occupation

Le taux d'occupation est un pourcentage qui caractérise le temps d'occupation de la zone de détection par des véhicules. Les boucles inductives, le radar à micro-onde, les magnétomètres et les détecteurs vidéo ont la capacité de fournir ce type de mesure.

1.2.2.2 Le débit

Le débit du trafic est le nombre total des véhicules qui passe à travers la zone de détection d'un capteur dans une période de temps bien choisie. Ce type des données peut être mesuré directement par les boucles inductives, les radars, les boucles magnétiques, les détecteurs vidéo ou par les capteurs pneumatiques avec des traitements supplémentaires.

1.2.2.3 La vitesse

Les détecteurs ponctuels tels que les magnétomètres et les boucles inductives sont capables de mesurer la vitesse moyenne des véhicules pour chaque instant du temps, alors que les capteurs sont séparés par une distance connue. La vitesse moyenne est calculée à travers cette distance et le temps d'activation de chaque capteur. Les

nouveaux capteurs vidéo ont la capacité de mesurer la vitesse des véhicules d'une façon directe, de même avec les radars à micro-onde.

1.2.2.4 Le temps de parcours

La technique des probes véhicules est la technique la plus connue et la plus efficace pour la détection de ce type de mesure. Dans cette technologie, le temps de parcours peut être estimé à travers les mesures fournies par les probes véhicules dans deux stations de détection différentes. De plus, les radars, les détecteurs vidéo, les lecteurs d'étiquettes de péage et lecteurs de plaques d'immatriculation sont aussi capable de détecter et mesurer le temps de parcours.

En outre, certaines mesures peuvent être fournies par l'installation des détecteurs dans différentes positions ; l'emplacement des radars et des détecteurs vidéo sur des intersections permet de mesurer des paramètres spéciaux tels que le temps et la longueur de la file d'attente.

1.3 Critères de classification des modèles de trafic

Plusieurs critères sont introduits pour ordonner et classer les modèles de trafic. Selon les contraintes et les domaines d'application, différentes approches peuvent être considérées [Bellemans 02, Champion 03, Majid 14].

1.3.1 Temps et nature des variables

Le temps est une variable principale dans tous les systèmes dynamiques en tenant compte des modèles de trafic et des simulateurs. Selon le type de temps, temps discret ou temps continue, les modèles de trafic peuvent être répertoriés en classes suivantes [Wainer 09] :

1.3.1.1 Les modèles continus

Dans cette classe, la dynamique du système évolue d'une façon continue, où le temps représente un nombre réel et l'état prend ses valeurs à partir d'un ensemble continu défini par un nombre réel.

1.3.1.2 Les modèles discrets (à événements discrets)

En contrepartie, la dynamique d'un système discret évolue d'une façon discontinue, où le temps évolue en faisant progresser dans des portions discrètes. En outre,

l'état peut être représenté par un ensemble fini de nombres entiers.

1.3.1.3 Les modèles hybrides

Les modèles hybrides présentent un mixage entre le continu et le discret, la dynamique du système dans cette classe est évoluée par l'intermédiaire des événements. Par ailleurs, cette classe représente la plupart des systèmes physiques, car dans la réalité les systèmes ne sont ni purement continus ni purement discrets. C'est cette classe qui sera considérée dans cette thèse.

1.3.2 Niveau de détail

Le niveau de détail où le niveau de granularité signifie le nombre des paramètres utilisé dans la description de la dynamique du système de trafic. Il a un rôle principal dans la classification des modèles de trafic. Le niveau de granularité catégorise les modèles de trafic en trois modèles essentiels. Dans la littérature, on peut trouver les modèles microscopiques, les modèles macroscopiques et les modèles mésoscopiques [Hoogendoorn 01].

Les modèles microscopiques présentent le niveau le plus élevé du détail. Ils décrivent le comportement individuel des véhicules et les interactions entre eux. Dans lesquels, ils nécessitent un grand nombre de paramètres et de variables pour représenter la dynamique du trafic urbain. Cependant, les modèles mésoscopiques sont venus dans la classe intermédiaire entre les modèles macroscopiques et microscopiques. Ils représentent la dynamique du trafic en tenant compte du comportement des paquets des véhicules au lieu des véhicules individuels. Ce type des modèles utilise un nombre moins élevé des variables que dans la modélisation microscopique. Par contre, les modèles macroscopiques utilisent un nombre très réduit de variables dans la modélisation du trafic. Ils décrivent la dynamique du trafic à travers la présentation de la dynamique du flux. Donc, la modélisation macroscopique est devenue dans le niveau le plus bas de détail.

1.3.3 Représentation des processus

Les modèles de trafic peuvent être formulés comme des modèles déterministes ou stochastiques [Hoogendoorn 01, Cemerlic 15]. Dans les modèles déterministes, uniquement les conditions initiales et les conditions aux limites conduisent à des solutions uniques. Ils utilisent des relations mathématiques où logiques exactes avec

des variables déterministes, exactes et non aléatoires. Par contre, dans les modèles stochastiques, la solution change pour chaque exécution. Ils utilisent des variables stochastiques, introduites d'une façon probabiliste à travers des générateurs des nombres aléatoires.

1.3.4 Opérationnalisation

Généralement, les modèles de trafic sont représentés soit à travers des modèles analytiques ou des modèles de simulation. Les modèles analytiques donnent des solutions exactes, alors que les modèles de simulation sont des outils diversifiés, tels que les simulations numériques et multi-agents, et ils présentent un rôle crucial dans l'analyse et le diagnostic des systèmes de trafic [Majid 14].

1.4 La modélisation microscopique

Les premiers travaux sur la modélisation microscopiques sont réalisés par Pipes [Pipes 53] et Reuschel [Reuschel 50] dans les années 1950. Durant ces années, l'évolution des outils de calculs a contribué d'une façon cruciale dans le développement de ce type de modélisation. En général, les modèles microscopiques ont pour objectif de décrire la dynamique du trafic à travers la représentation du comportement individuel de la paire véhicule-conducteur et les interactions avec ces voisins. D'autre part, les modèles microscopiques présentent des fonctions multiples telles que le choix de la vitesse désirée, l'ajustement de la vitesse pour gérer les distances de sécurité et l'interaction du conducteur avec les fonctions d'assistance qui ont un rôle principal dans le contrôle du véhicule [Mammar 07]. Dans cette partie, nous présentons un rappel sur les variables et les modèles microscopiques existant dans la littérature.

1.4.1 Les variables microscopiques

Dans ce type de modélisation, un grand nombre des paramètres est pris en compte pour la représentation de l'écoulement du trafic. Par conséquent, chaque véhicule est représenté par ses propres variables qu'ils sont étroitement liés à sa dynamique [Iordanova 06]. Les variables microscopiques se résument en :

1.4.1.1 L'espace inter-véhiculaire

L'espace inter-véhiculaire est la distance entre deux véhicules successifs circulant sur la même voie à un instant de temps t , exprimée en kilomètres.

Plusieurs études ont essayé d'utiliser l'espace inter-véhiculaire pour exprimer la vitesse instantanée afin d'établir les distances normatives de sécurité entre les véhicules circulant en file. Pour déterminer cette vitesse, l'hypothèse admise est que le temps de sécurité peut s'exprimer comme la somme d'un temps de réaction et d'un temps de freinage [Cohen 90]. D'autre part, des travaux utilisent l'espace inter-véhiculaire pour l'estimation du temps de réaction du conducteur afin de développer les simulations microscopiques du trafic [Gazis 59]. Les distributions empiriques de cette variable peuvent être approximées à travers des distributions théoriques telles que la loi log normal ou la loi d'Etang [Cohen 91].

1.4.1.2 Le temps inter-véhiculaire

Le temps inter-véhiculaire est l'écart de temps qui s'écoule entre les instants de passage du front avant de deux véhicules successifs dans un point prédéfini. Les distributions de cette variable sont exprimées à travers des estimations expérimentales [Cohen 90]. Les indications fournies par ces distributions sont limitées par un seuil considéré comme un danger. Le temps inter-véhiculaire est également utilisé dans la gestion des réseaux urbains, exploité par certains algorithmes de régulation tel que l'algorithme de Gestion Electronique de Régulation du Trafic Routier Défiant Urbain les Embouteillages GERTRUDE [Morrish 80].

1.4.1.3 La vitesse moyenne

Sur une période de temps T , la vitesse moyenne $v_{i,moy}$ d'un véhicule i au niveau microscopique est définie par l'équation suivante :

$$v_{i,moy} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v_i(t) dt \quad (1.1)$$

ou $v_i(t)$ est la vitesse instantanée du véhicule i à l'instant t .

L'enregistrement de profil temporaire des mesures de la vitesse instantanée d'un véhicule permet de calculer les vitesses moyennes durant différents cycles de fonctionnement. Ces vitesses moyennes sont exploitées pour l'estimation des indicateurs tels que la consommation du carburant et des indicateurs de la qualité du trafic [Messai 03]. L'agrégation des mesures de la vitesse instantanée nécessite des estimateurs sur un parcours $[x_1, x_2]$ dans un intervalle de temps $[t_1, t_2]$. La vitesse instantanée est définie par (1.2).

$$v_i(t) = \frac{dx}{dt} = \lim_{(t_2-t_1) \rightarrow 0} \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (1.2)$$

Il existe aussi d'autres manières pour calculer la vitesse moyenne des véhicules. En effet, la différence réside sur la méthode de calcul, où la vitesse moyenne peut être calculée dans le temps comme dans l'espace. Dans le cas où l'intervalle de temps est indéterminé, la vitesse moyenne peut être calculée à travers (1.3) [Jordanova 06].

$$v_{i,moy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i(t) \quad (1.3)$$

avec N est le nombre de véhicules.

La vitesse moyenne dans le temps est prouvée qu'elle n'est pas correcte par plusieurs auteurs [Leutzbach 88, Edie 74, Haight 63]. A titre d'exemple, si un véhicule effectue un parcours de $20km$ avec une vitesse moyenne de $80km/h$ à l'aller et une vitesse de $40km/h$ au retour. Donc, dans ce cas la vitesse est $53,3km/h$, par contre la vitesse moyenne fournie par les enregistrements des capteurs est $60km/h$. Pour cette raison plusieurs travaux ont suggéré de calculer la vitesse moyenne dans l'espace [Messai 03]. D'autre part, des études expérimentales montrent que la vitesse moyenne dans l'espace est équivalente à la vitesse moyenne dans le temps, dans le cas d'écoulement libre de trafic par contre dans le cas d'un trafic congestionné, la différence reste insignifiante [Drake 67, Huber 57].

1.4.1.4 L'accélération instantanée

L'accélération instantanée est calculée à travers la différentiation des vitesses mesurées. Cette variable est obtenue afin d'appliquer un lissage des différences successives des vitesses sur un intervalle de temps T . L'accélération moyenne a_{moy} est calculée à partir des accélérations instantanées selon (1.4).

$$a_{moy}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T a_i(t) dt \quad (1.4)$$

Le bruit d'accélération est donné par (1.5). Ce dernier est lié au comportement du conducteur, des conditions de circulation et de l'infrastructure routière [Jordanova 06].

$$\delta^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [a_i(t) - a_{moy}(t)]^2 dt \quad (1.5)$$

1.4.2 Les modèles microscopiques

Les modèles microscopiques considèrent la dynamique des véhicules d'une façon individuelle, ils ont développé afin de décrire le comportement individuel des paires véhicule-conducteur et les interactions entre les véhicules à un niveau élevé de détail. En effet, ce type de modèles cherche à reproduire la dynamique des véhicules en fonction de leurs environnements. Généralement, deux classes de modèles microscopiques existent dans la littérature, les modèles de véhicule-suiveur et les modèles de particules.

1.4.2.1 Modèles de véhicule-suiveur

Le concept général des modèles de véhicule-suiveur (car-following) ou de poursuites est proposé en premier temps par Reuschel et Pipes dans les années cinquante, dans lesquels ils supposent que le véhicule suivant contrôle son comportement par rapport au véhicule précédent [Zheng 12]. Dans ce type de modélisation, le conducteur présente un élément principal, il est considéré comme un contrôleur, pour l'ajustement de la vitesse d'une part et pour la gestion et la commande de la direction d'une autre part. Les modèles de poursuite les plus connus dans la littérature sont : les modèles de poursuite basés sur la distance de sécurité, les modèles de poursuite à stimuler, les modèles psychophysiques et les modèles à vitesse optimale [El Hmam 06, Smaili 12].

a- Les modèles de poursuite basés sur la distance de sécurité

Ce type des modèles est basé sur l'hypothèse : « Une bonne règle pour suivre un autre véhicule à une distance de sécurité est de vous permettre au moins la longueur d'une voiture entre votre véhicule et le véhicule devant pour une vitesse de dix miles par heure (16.1km/heure) » [Pipes 53].

Selon cette hypothèse, la distance de sécurité minimale entre deux véhicules successifs est évoluée d'une façon linéaire avec la vitesse du véhicule suivant. Donc la distance de sécurité d_i entre deux véhicules i (d'une vitesse v et longueur ℓ_i) et $i - 1$ est donnée par (1.6).

$$d_i = \ell_i \left(1 - \frac{v}{1.61} \right) \quad (1.6)$$

Une autre version des modèles de distance de sécurité a été proposée par Forbes

[Forbes 58], elle repose sur le même principe que le modèle de Pipes, dont l'utilisation d'une relation proportionnelle entre la distance de sécurité et la vitesse. Par conséquent, la distance de sécurité calculée par ce modèle et le modèle de Pipes présente une légère variation par rapport aux distances mesurées spécialement dans les vitesses faibles et élevées. D'une autre part, l'introduction du temps de réaction dans le calcul de la distance de sécurité a donné l'apparition du modèle de Leutzbach [Leutzbach 88]. Dans cette version, le temps de réaction τ est relatif au temps de perception du conducteur pour la réception des informations, le temps de décision et le temps de freinage. La distance de sécurité dans ce modèle est donnée par la relation (1.7), où f et g sont successivement les facteurs de frottement.

$$d_i = \ell_i + \tau v + \frac{v^2}{2f.g} \quad (1.7)$$

avec $\frac{v^2}{2fg}$ est le facteur de décélération.

Afin d'améliorer le modèle de Forbes, un facteur de risque et une distance minimale ont été introduits par Jepsen [Jepsen 98], pour limiter l'impact de collision et pour augmenter la capacité du conducteur à l'éviter. Dans lequel, la distance de sécurité est donnée par (1.8), avec la distance minimale \mathfrak{d} présente la distance entre deux véhicules en état congestionné du trafic.

$$d_i = (\ell_i + \mathfrak{d}) + v(\tau + v.f) \quad (1.8)$$

b- Les modèles de poursuite à stimuler

Les modèles de poursuite à stimuler sont les modèles les plus anciens et les plus étudiés dans la littérature [Zheng 12]. Ils sont exprimés par la proposition que le conducteur d'un véhicule répond à un stimulus donné par la formulation suivante [Reuschel 50] :

$$\text{réaction} = \text{sensibilité} \times \text{stimulus}$$

avec le stimulus représente la distance où la vitesse relative de deux véhicules successifs et la réaction résume dans les actions du conducteur telles que le ralentissement, l'accélération ou le freinage. Cette relation peut être représentée par une

fonction linéaire (modèle de Chandler [Chandler 58]) ou non linéaire (modèle de Gazis [Gazis 59]).

Le modèle de poursuite linéaire est parmi les premiers modèles de poursuite à stimuler, il a été proposé par Chandler [Chandler 58]. Dans ce modèle, la réaction du conducteur est déterminée par l'accélération a_{i+1} , elle est représentée par une relation linéaire avec la variation de la vitesse entre le véhicule i et son suivant $i + 1$ pour un temps de réaction τ . Cette relation est donnée par (1.9), où le stimulus est présenté par le produit de la différence de la vitesse et la sensibilité s avec $s = \frac{1}{\tau}$.

$$a_{i+1}(t) = s(v_i(t) - v_{i+1}(t)) \quad (1.9)$$

L'inconvénient principal du modèle linéaire est que la distance inter-véhiculaire n'est pas prise en compte. Par exemple, si nous avons deux véhicules qui ont des espaces inter-véhiculaires différents, les conducteurs des deux véhicules présentent la même réaction d'après le modèle de Chandler. Mais en réalité, pour une même différence de vitesse et avec les mêmes espaces inter-véhiculaires, la réaction des conducteurs dépendra de la vitesse propre de chaque véhicule [Bourrel 03]. Dans ce contexte, Gazis et al [Gazis 59] ont proposé une version améliorée du modèle linéaire en supposant que la sensibilité varie avec la variation de l'espace inter-véhiculaire sous l'équation non linéaire (1.10), avec c , m , l des paramètres calibrés expérimentalement.

$$s = \frac{c.v_{i+1}(t + \tau)^m}{(x_i - x_{i+1})^l} \quad (1.10)$$

c- Les modèles psychophysiques

Les modèles de poursuite à stimuler présentent un caractère mécanique, où l'effet de conducteur apparait seulement dans le temps de réaction. Cependant, l'effet d'ajustement des vitesses par le conducteur est presque négligeable, aussi la réaction du conducteur présente une valeur nulle dans le cas des vitesses égales, quelle que soit la valeur de la distance inter-véhiculaire [Van Wee 13]. De plus, le conducteur ne peut pas :

- Observer les valeurs inférieures au seuil de perception.
- Évaluer une situation et déterminer la réponse avec précision.

- Manipuler l'accélération et le freinage d'une façon précise.

En outre, le conducteur n'est pas capable d'être occupé d'une façon permanente avec les différentes tâches de la poursuite des véhicules. Pour prouver ces limitations, des issues de la psychologie perspective ont été utilisées dans le développement de ce qu'on appelle les modèles psychophysique. Les règles de comportement de base des modèles psychophysiques sont [Hoogendoorn 01] :

- Dans le cas d'espace inter-véhiculaire est grand, le conducteur ne soit pas influencé par les différences de vitesse.
- Dans le cas d'espace inter-véhiculaire est petit certaines combinaisons de vitesses relatives et des espaces inter-véhiculaires n'affectent pas le comportement du véhicule suiveur parce que les mouvements relatifs sont trop petits.

Le premier modèle psychophysique a été développé par Michaels [Michaels 63], il est basé sur les théories empruntées à la psychologie de perception. Le modèle de Wiedemann [Wiedemann 74], est une autre version des modèles psychophysique. Il a exploité le seuil perception et les lois de changement de voie pour faire la distinction entre une conduite contrainte et non-contrainte. D'autres importants modèles psychophysiques s'appellent les modèles de point d'action qui représentent la base de la plupart des modèles microscopiques contemporains [Van Wee 13]. Cependant, Les modèles psychophysiques présentent une grande difficulté de validation, principalement parce que le calibrage de ses éléments n'a pas été couronné de succès [Brackstone 99].

d- Les modèles à vitesse optimale

Dans ces modèles l'adaptation de la vitesse n'est pas seulement en fonction de la vitesse du véhicule suivant, mais en fonction d'une vitesse v_0 qui dépend de la distance entre les véhicules. Cette vitesse s'appelle la vitesse optimale, et correspond à la vitesse jugée satisfaisante par le conducteur pour une distance donnée. Le premier modèle à vitesse optimale est proposé par Newell [Newell 55] formulé par (1.11), où le temps de réaction τ est remplacé par le temps de freinage t_f .

$$v_{i+1}(t + t_f) = v_0(x_i - x_{i+1}) \quad (1.11)$$

Sous l'hypothèse que l'accélération est déterminée par la différence entre la vitesse optimale et réelle, une autre version des modèles à vitesse optimale est proposée par Bando [Bando 95], où l'accélération est donnée par (1.12).

$$a_{i+1}(t) = \frac{1}{t_f} (v_0(x_i - x_{i+1}) - v_{i+1}(t)) \quad (1.12)$$

avec

$$v_0(x_i - x_{i+1}) = \frac{v_0}{2} (\tanh(x_i - x_{i+1} - d_c) - \tanh(d_c))$$

où v_0 et d_c sont des paramètres de la vitesse optimale et $v_0(x_i - x_{i+1})$ est la fonction de la vitesse optimale.

Ce modèle a la capacité de décrire les divers phénomènes de trafic tels que l'instabilité du flux, l'évolution de la congestion de trafic et les informations du phénomène stop-and-go. De plus, il a présenté un grand succès dans le domaine physique à cause de sa faisabilité dans l'analyse de la théorie [Zheng 12].

1.4.2.2 Modèle d'automate cellulaire

Les modèles d'automates cellulaires sont des modèles de particule. Ils présentent un outil de modélisation très efficace capable de représenter et de reproduire les différentes dynamiques complexes du trafic.

Les modèles d'automates cellulaires sont basés sur la description générale du comportement de conduite par une représentation discrète en temps et en espace où la distance est représentée par un vecteur uniforme de N cellules, typiquement d'une longueur de 7.5 mètres. Chaque cellule possède deux états (libre ou occupé) en fonction de la présence du véhicule. A chaque pas du temps et pour un seul véhicule, la vitesse et la position sont mises à jour en fonction de la vitesse désirée et l'existence d'un véhicule bloquant son mouvement en avant. L'état de la cellule sera défini égal à -1 , si elle est inoccupée, et à la vitesse v (la vitesse comprise entre 0 et v_{max}), si elle contient un véhicule. En outre, des perturbations stochastiques sont introduites par Nagel et Schreckenberg [Nagel 92] pour la mise à jour des règles et la présentation d'un modèle d'automate cellulaire typique. Les règles de mises à jour sont résumées dans la formulation suivante [Zheng 12] :

$$\begin{aligned}
 \tilde{v}_i(t+1) &= \min(v_i(t) + 1, x_i(t) - x_{i+1}(t) - 1, v_{max}) \\
 v_i(t+1) &= \begin{cases} \max(\tilde{v}_i(t+1) - 1, 0) & C_{rand} < P_f \\ \tilde{v}_i(t+1) & \text{autrement} \end{cases} \\
 x_{i+1}(t+1) &= x_i(t) + v_n(t+1)
 \end{aligned} \tag{1.13}$$

où $\tilde{v}_i(t+1)$ est la valeur temporelle, C_{rand} un nombre aléatoire entre 0 et 1 et P_f est la probabilité de ralentissement.

La formulation (1.13) résume l'ensemble des règles suivant :

— **Règle d'accélération** : $v_i(t+1) = \min(v_i(t) + 1, v_{max})$

Cette règle traduit le cas d'accélération où le conducteur circule par une accélération linéaire jusqu'à ce qu'il atteigne sa vitesse maximale v_{max} .

— **Règle de décélération** : $v_i(t+1) = \min(v_i(t) + 1, x_i(t) - x_{i+1}(t) - 1)$

Dans ce cas le conducteur décélère sa vitesse pour éviter la collision avec le véhicule en aval (le cas de cellule en aval est occupé).

— **Règle de comportement aléatoire** : $\max(\tilde{v}_i(t+1) - 1, 0)$

Cette règle pris en compte les comportements individuels du conducteur (chaque conducteur présente des comportements différents d'autres conducteurs). Dans ce cas, pour ralentir la vitesse, un générateur aléatoire est introduit, où on la décroît aléatoirement de 1 avec une probabilité P_f .

— **Règle de déplacement des véhicule** : $x_{i+1}(t+1) = x_i(t) + v_n(t+1)$

Cette règle traduit le déplacement des véhicules d'une position à une autre.

Les automates cellulaires montrent la capacité de la simulation des réseaux urbains à grande échelle, à cause d'efficacité et de simplicité de calcul des règles utilisées

dans la modélisation. Pour des automates cellulaires plus réalistes, d'autres règles sont prises en compte par certains chercheurs selon les phénomènes de trafic réels, tels que la règle de démarrage lentement, dans laquelle les véhicules sont lentement accélérés au départ de l'arrêt. Aussi, les règles basées sur l'anticipation sont aussi introduites pour la prédiction des mouvements des véhicules leaders en avance. Pour plus de détails, le lecteur se réfère au [Schadschneider 06].

1.4.2.3 Modèle de files d'attente

La théorie de files est fortement utilisée dans la représentation et la modélisation du trafic urbain spécialement autour des carrefours (avec ou sans feu de signalisation), les rampes d'accès, les positions de péages et plusieurs situations de trafic [Smaili 12]. Un modèle de files d'attente peut représenter par les éléments suivants [Moutari 07] :

- Le flux d'entrée, les véhicules peuvent être ensemble ou individuels.
- La source des véhicules.
- Le comportement du véhicule.
- La loi de la durée de service de chaque client (véhicule), les durées de service sont indépendantes, identiquement distribuées et indépendantes des temps des inter-arrivées.
- La discipline de service (FIFO (First In First Out), LIFO (Last In First Out), Aléatoire, Prioritaire, etc...)
- Le nombre de serveurs, il peut y avoir un ou plusieurs serveurs selon la nature du service à fournir.
- La capacité de la file ou la densité maximale, elle est supposée infinie en général.

1.5 La modélisation mesoscopique

La modélisation mésoscopique vient dans le niveau intermédiaire entre la modélisation microscopique et macroscopique. Elle comble l'écart entre l'approche du niveau global des modèles macroscopiques et les interactions individuelles de celles microscopiques. Ce type de modélisation ne s'intéresse pas au comportement individuel du couple conducteur véhicule, mais plutôt le comportement des paquets

de véhicules qui partagent les mêmes caractéristiques (l'origine, la destination, la vitesse désirée...) et les interactions entre eux. En effet, chaque peloton constitue d'une entité autonome en circulation dans le réseau routier suivant des lois issues de la dynamique macroscopique du flux. Généralement, trois types de modèles mésoscopiques existent dans la littérature, où on trouve les modèles de distribution inter-véhiculaires [Hoogendoorn 98b, Buckley 68, Branston 76], les modèles de groupes clusters [Botma 81] et quelques modèles mésoscopiques qui reposent sur la théorie de la cinétique des gaz [Prigogine 71]. Le lecteur trouvera un état de l'art dans [Hoogendoorn 01].

1.5.1 Les modèles fondés sur les distributions des écarts temps inter-véhicules

Comme défini précédemment, le temps inter-véhicule est l'espace temporel entre deux véhicules. Les modèles des distributions des écarts temps inter-véhicules sont des modèles mésoscopiques. Dans lesquels, ils sont basés sur la distribution identique des écarts temps inter-véhicules d'une façon probabiliste, sans explicitement le comportement de chaque véhicule séparément ni son traçage. Généralement, plusieurs modèles sont basés sur ce principe tel que le modèle semi-poisson de Buckley [Buckley 68] et le modèle généralisé de la file d'attente de Branston [Branston 76].

Les modèles de distribution des écarts temps inter-véhicules ont été critiqués pour qu'ils aient négligé le rôle de la dynamique du trafic. En outre, ils ont supposé que tous les véhicules sont essentiellement identiques, cela signifie que les fonctions de distribution des probabilités sont indépendantes dans la direction, le type des véhicules, le déplacement, la destination ...etc. Pour traiter ces problèmes, une version améliorée a été proposée par Hoogendoorn et al [Hoogendoorn 98b] pour les flux multi-classes et multivoies. En utilisant une nouvelle méthode d'estimation, ils ont analysé le cas multi-classe du flux de trafic sur un tronçon autoroutier de deux voies dans les Pays-Bas.

1.5.2 Les modèles mesoscopiques de type cluster

Ce type de modélisation est caractérisé par le rôle principal des entités de véhicules. Un cluster ou un paquet est un ensemble des véhicules qui partage une propriété spécifique [Botma 81]. Généralement, la dimension (qui est dynamique) et

la vitesse sont des éléments principaux qui caractérisent les paquets, où la dimension paquet est le nombre des véhicules qui le compose. Les conditions de trafic d'un paquet telles que la différence de vitesse, l'écart temps inter-véhicule...etc, ne sont pas considérées explicitement. Dans ce sens les paquets sont homogènes.

1.5.3 Les modèles de Prigogine et Herman basé sur la cinétique des gazes

Le premier modèle basé sur la cinétique des gaz est proposé par Prigogine-Herman [Prigogine 71] pour les flux de trafic. Il est développé en prenant en compte le caractère stochastique du flux de trafic. La notion de la densité de l'espace des phases (PSD : Phase-Space Density) a été introduite dans ce type des modèles, dans laquelle elle représente le nombre des véhicules qui occupe un intervalle spatial. Cette densité est donnée par : $\tilde{\rho}(t, x, v) = \rho(x, t) \tilde{V}(v, x, t)$, avec $\rho(x, t)$ représente la densité des véhicules et $\tilde{V}(v, x, t)$ c'est la distribution de la vitesse d'un véhicule dans un espace x à un instant t . Les changements de la dynamique dans la PSD sont garantis par l'équation partielle suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t} \tilde{\rho}(t, x, v) + \frac{\partial}{\partial x} (v \tilde{\rho}(t, x, v)) = \left(\frac{\partial}{\partial t} \tilde{\rho}(t, x, v) \right)_{acc} + \left(\frac{\partial}{\partial t} \tilde{\rho}(t, x, v) \right)_{int} \quad (1.14)$$

où : $\frac{\partial}{\partial x} (v \tilde{\rho}(t, x, v))$ est le terme de convection qui représente la dynamique des véhicules qui affecte la PSD.

$\left(\frac{\partial}{\partial t} \tilde{\rho}(t, x, v) \right)_{acc}$ est le terme d'accélération qui représente l'accélération du véhicule pour atteindre la vitesse souhaitée. ce terme est donné par l'équation suivante :

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} \tilde{\rho}(t, x, v) \right)_{acc} = \frac{\partial}{\partial v} \left[\frac{\tilde{\rho}(v_0 - v)}{\tau} \right] \quad (1.15)$$

avec v_0 est la vitesse souhaitée ou la vitesse désirée.

$\left(\frac{\partial}{\partial t} \tilde{\rho}(t, x, v) \right)_{int}$ représente le terme d'interaction entre les véhicules et qui garantit la décélération. Ce dernier est donné par l'équation suivante :

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} \tilde{\rho}(t, x, v) \right)_{int} = (1 - \pi) \int (w - v) \tilde{\rho}(t, x, v) \tilde{\rho}(t, x, w) dw \quad (1.16)$$

Cette équation considère que les véhicules d'une grande vitesse w interagissent avec les véhicules lents de la vitesse v dans la proportion $|w - v| \tilde{\rho}(t, x, w) \tilde{\rho}(t, x, v)$

. Le véhicule de la grande vitesse va décélérer avec la probabilité $(1 - \pi)$.

Dans le but d'amélioration de cette version, d'autres modèles basés sur la cinétique des gaz ont été proposés tels que : le modèle de Pavari-Fontana [Pavari-Fontana 75], le modèle multi-classes [Hoogendoorn 98a], le modèle multivoies [Helbing 97], le modèle de Nelson [Nelson 97] et le modèle multivoies et multi-classes [Hoogendoorn 99]. Pour plus de détails sur ces modèles, le lecteur est invité à se référer aux [Awasthi 04] [Hoogendoorn 01].

1.6 La modélisation macroscopique

La modélisation macroscopique correspond à une vision globale et continue de l'écoulement du trafic. Elle est fondée sur l'analogie d'écoulement du trafic avec la mécanique des fluides, ou le flux du trafic est considéré comme un fluide et qui soumis aux conditions de la hydrodynamique des fluides. Les modèles macroscopiques utilisent des variables agrégées dans la description de la dynamique du flux de trafic. Le comportement individuel n'est pas considéré dans cette modélisation, mais plutôt la représentation globale du trafic qui est garantie à travers les paramètres agrégés du trafic.

1.6.1 Les variables macroscopiques

Généralement, trois paramètres essentiels peuvent être utilisés dans la modélisation macroscopique du trafic. Ces paramètres sont : la densité, le débit et la vitesse.

1.6.1.1 La densité

La densité $\rho(x, t)$ ou la concentration des véhicules est le nombre des véhicules $n(x, t)$ qui occupe un intervalle spatial $[x, x + \Delta x]$ à un instant t , elle est exprimée en véhicule par unité de longueur (par exemple veh/mile) et donnée par la relation suivante :

$$\rho(x, t) = \frac{n(x, t)}{\Delta x} \quad (1.17)$$

1.6.1.2 Le débit

Le débit $q(x, t)$ ou le flux des véhicules est le nombre des véhicules $n(x, t)$ qui passe par une position x durant un intervalle de temps $[t, t + \Delta t]$, il est facilement mesuré par des capteurs ponctuels sur la route et souvent donné comme un taux horaire. Le

débit est exprimé généralement en véhicule par unité de temps (par exemple véh/h) et donné par la formulation suivante :

$$q(x, t) = \frac{n(x, t)}{\Delta t} \quad (1.18)$$

1.6.1.3 La vitesse

La vitesse $v(x, t)$ est la vitesse moyenne de mouvement des véhicules au position x et à l'instant t , généralement elle est exprimée en unité de distance par unité de temps (par exemple mile/h). La vitesse est donnée par :

$$v(x, t) = \frac{q(x, t)}{\rho(x, t)} \quad (1.19)$$

En fonction de la mesure, la vitesse peut être exprimée sous la forme d'une vitesse spatiale moyenne et une vitesse temporelle moyenne. La vitesse spatiale moyenne est le temps moyen passé par les véhicules pour traverser une certaine longueur sur la route. La vitesse temporelle moyenne est la vitesse moyenne des véhicules qui passent d'une section donnée de la route. Elle est plus facile à capturer à l'aide des mesures ponctuelles sur la route[Dervisoglu 12].

Généralement, le débit et la vitesse sont des variables mesurables directement, par contre la densité est une variable un peu compliquée de la mesurer. Pour cette raison, une autre approche est introduite pour calculer la densité à travers l'occupation $occ(x, t)$, qui définit par la partie de temps pendant lequel l'intervalle $[x, x + \Delta x]$ est occupé. Cette mesure peut être traduite aux densités par la formulation suivante :

$$\rho(x, t) = \frac{occ(x, t)}{g - factor} v(x, t) \quad (1.20)$$

avec v est la vitesse moyenne, $g - factor$ est une valeur adaptative estimée en fonction de temps effective de la longueur du véhicule spécifique au détecteur et la position [Jia 01].

1.6.2 Les Modèles macroscopiques

Les modèles macroscopiques définissent l'évolution du débit, densité et vitesse en utilisant un ensemble des équations différentielles partielles (EDP), ainsi que

d'autres relations constituantes. Chaque modèle continu a une équation de conservation des véhicules fondamentale, ainsi que d'autres EDP en fonction d'ordre du modèle. Généralement, les modèles macroscopiques de trafic sont catégorisés en deux classes principales, les modèles linéaires (modèle de premier ordre) et les modèles non linéaires (modèles d'ordre supérieur).

1.6.2.1 Modèle de premier ordre Lighthill-Whitham-Richards

Le modèle macroscopique de premier ordre ou modèle de LWR (Lighthill-Whitham-Richards) [Lighthill 55, Richards 56] a été développé par Lighthill, Whitham et Richards dans les années cinquante. Il est connu aussi par le modèle hydrodynamique ou modèle d'onde cinétique. Le modèle de LWR est fondé sur la théorie hydrodynamique des fluides en assimilant le flux de trafic à un fluide en circulation dans des conduites, dans lequel le flux est supposé homogène et unidirectionnel. Les modèles macroscopiques sont basés sur deux lois principales, la loi de continuité et la loi de conservation.

a- La loi de continuité

Le modèle macroscopique de LWR prend en considération le flux des véhicules comme étant continu en se basant sur l'analogie avec la théorie d'hydrodynamique des fluides. Par conséquent, les caractéristiques individuelles des véhicules sont ignorées et les variables macroscopiques sont des fonctions continues dans le temps.

La loi de continuité est une approximation pour la représentation du flux de trafic, l'implémentation de modèles macroscopiques montre qu'elle reste une analogie utile pour la simulation du trafic [Papageorgiou 90, Elloumi 96]. En outre, la loi de continuité ne présente pas de conflits avec la théorie discrète de l'écoulement du trafic [Messai 03, Iordanova 06].

b- La loi de conservation

On considère le tronçon routier présenté dans la figure 1.2. Ce tronçon est de longueur Δx et en supposant qu'il ne présente aucune addition dans l'intervalle spatiale (ni rampe d'entrée ni rampe de sortie). De plus, les véhicules présentent un mouvement unidirectionnel.

Le nombre des véhicules $N(x, t)$ est donné par la relation suivante :

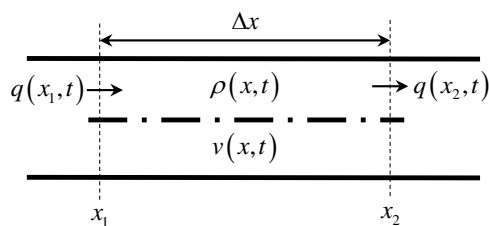


FIGURE 1.2 – Tronçon routier

$$N(x, t) = \int_{x_2}^{x_1} \rho(x, t) dx \quad (1.21)$$

Le nombre des véhicules varie dans le tronçon $[x_1, x_2]$ est :

$$N(x, t + \Delta t) - N(x, t) \quad (1.22)$$

Le bilan net des voitures entrantes et sortantes est :

$$-q(x_2, t) \Delta t + q(x_1, t) \Delta t \quad (1.23)$$

La conservation du nombre des véhicules est donnée par :

$$N(x, t + \Delta t) - N(x, t) = -q(x_2, t) \Delta t + q(x_1, t) \Delta t \quad (1.24)$$

alors

$$\frac{N(x, t + \Delta t) - N(x, t)}{\Delta t} = -q(x_2, t) + q(x_1, t) \quad (1.25)$$

Sous une autre écriture

$$\frac{d}{dt} N(x, t) = -q(x_2, t) + q(x_1, t) \quad (1.26)$$

Nous avons que :

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial}{\partial x} q(x, t) dx = q(x_2, t) - q(x_1, t) \quad (1.27)$$

A partir de (1.21), (1.26) et (1.27), on remarque que :

$$\frac{d}{dt} \int_{x_1}^{x_2} \rho(x, t) dt = - \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial}{\partial x} q(x, t) dx$$

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial}{\partial t} \rho(x, t) dt = - \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial}{\partial x} q(x, t) dx$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(x, t) = - \frac{\partial}{\partial x} q(x, t)$$

Donc l'équation de conservation est définie comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(x, t) + \frac{\partial}{\partial x} q(x, t) = 0 \quad (1.28)$$

Cette équation représente la loi de conservation des véhicules. Dans le cas d'existence des rampes (rampes d'entrée ou/et sortie) l'équation (1.28) devient [Lighthill 55] :

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(x, t) + \frac{\partial}{\partial x} q(x, t) = \psi(x, t) \quad (1.29)$$

avec $\psi(x, t)$ est le terme de génération ou de dissipation des véhicules. La génération des véhicules est interrompue par la présence des intersections ou des rampes.

Le modèle macroscopique de premier ordre de LWR est parmi les modèles macroscopiques les plus cités dans la littérature du trafic. Il considère le flux de trafic comme un fluide compressible qui traverse des liens de la route. Dans lequel, la dynamique du trafic pour chaque tronçon $(L_i)_{i=1, \dots, N}$ est décrite par les relations suivantes [Zeroual 15] :

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_i(x, t) + \frac{\partial}{\partial x} q_i(x, t) = 0 \quad (1.30)$$

$$q_i(x, t) = \rho_i(x, t) v_i(x, t) \quad (1.31)$$

$$q_i(x, t) = f(\rho_i(x, t)) \quad (1.32)$$

Avec $\rho_i(x, t)$ est la densité de la section L_i , $q_i(x, t)$ est le débit de cette section, $v_i(x, t)$ est la vitesse du flux de la section et f est une fonction non linéaire. Cette dernière suppose que le trafic évolue d'une façon équilibre passant d'un état d'équi-

libre à un autre, cette relation s'appelle le diagramme fondamental.

c- Le diagramme fondamental

Les modèles macroscopiques sont basés sur la relation entre les paramètres macroscopiques principaux du trafic, qui sont le débit, la densité et la vitesse. Généralement, ces paramètres sont rassemblés en Diagramme Fondamental (DF).

Les premières issues sur le diagramme fondamental sont réalisées par Greenshields en 1935 [Greenshields 35] où il a été approximé par une relation linéaire entre la vitesse et la densité (figure 1.3) en se basant sur des observations expérimentales effectuées à travers des images prises sur une route de deux voies, cette relation est exprimée comme suit :

$$v = v_f \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{max}} \right)$$

avec v_f est la vitesse libre et ρ_{max} est la densité maximale. Cette relation vitesse-densité est transformée en une relation parabolique entre le débit et la densité comme illustrée dans la figure 1.4.

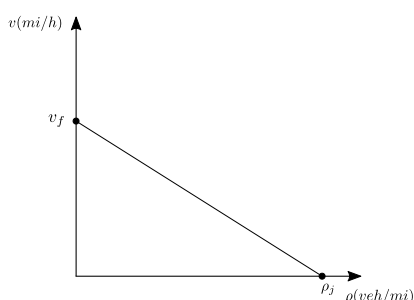


FIGURE 1.3 – Relation vitesse-densité de Greenshields

Dans cette figure, ρ_c représente la densité critique dans laquelle le débit maximal Q_{max} est observable. La densité critique est une valeur qui sépare la dynamique du trafic en deux états, congestion et fluide. Ainsi le flux de trafic est en état congestionné si la valeur de la densité est supérieure à la densité critique (ou le débit supérieur au débit maximal). ρ_j représente la densité maximale du tronçon, elle exprime le nombre maximal des véhicules qui peuvent être accueillies par ce tronçon. Le diagramme fondamental décrit la dynamique du trafic en :

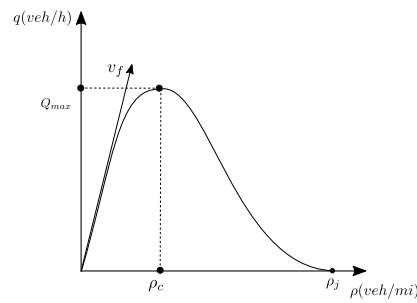


FIGURE 1.4 – Diagramme Fondamental relation débit-densité

- **État fluide de trafic** : si la densité est très réduite ou nulle, le flux de trafic se déplace avec une vitesse maximale qui appelée la vitesse libre v_f .
- **État critique** : le débit augmente avec la densité jusqu'à ρ_c qui correspond à Q_{max} ou la capacité du tronçon.
- **État congestion** : avec la continuité de croissance de la densité, les interactions entre les véhicules s'amplifient, donc la vitesse et le débit diminuent (état congestion du trafic). La densité est limitée par ρ_j (la densité maximale) dans laquelle le flux de trafic atteint une situation de blocage total, où le débit et la vitesse sont nuls.

Dans la littérature, plusieurs formes sont proposées pour le diagramme fondamental, qui est essentiellement une relation constitutive déterminée empiriquement entre les éléments macroscopiques du trafic. De plus, des relations vitesse-débit, vitesse-densité et débit-densité peuvent être aussi établies pour la représentation empirique du diagramme fondamental.

Le diagramme fondamental débit-densité est plus adapté pour l'utilisation dans le contrôle du trafic, car il dispose d'une relation directe entre le débit, qui représente l'entrée (débit principal et débit des rampes) de la commande et la densité qui est l'état à contrôler.

Dans le but d'avoir une bonne représentation de comportement réel de trafic, deux formules générales sont exprimées :

$$q(\rho) = \rho \cdot v_f \cdot \left(1 - \left(\frac{\rho}{\rho_j}\right)^a\right)^l \quad (1.33)$$

$$q(\rho) = \rho \cdot v_f \cdot \exp\left(-\frac{1}{a} \left(\frac{\rho}{\rho_c}\right)^a\right) \quad (1.34)$$

Le tableau 1.1 résume quelques diagrammes fondamentaux existants dans la littérature en utilisant les paramètres a et l des formes générales (1.33) (1.34) [Majid 14, Smaili 12].

TABLE 1.1 – Formules des diagramme fondamentaux

Auteurs	Formules
Chandler	$q(\rho) = Q_{max} \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_i}\right)$
Greenberg	$q(\rho) = \rho \cdot v_f \cdot \ln\left(\frac{\rho_j}{\rho}\right)$
Drew	$q(\rho) = \rho \cdot v_f \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{\rho}{\rho_j}}\right)$
Greenshields	$q(\rho) = \rho \cdot v_f \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_j}\right)$
Edie	$q(\rho) = \rho \cdot v_f \cdot \exp\left(-\frac{\rho}{\rho_c}\right)$
Drake	$q(\rho) = \rho \cdot v_f \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\rho}{\rho_c}\right)\right)$

L'une des caractéristiques les plus compliquées dans le calibrage du diagramme fondamental est l'apparition de la discontinuité autour du débit maximal. À partir de cette caractéristique, plusieurs formes théoriques de la courbe du diagramme fondamental ont été proposées telles que la forme triangulaire (Figure 1.5a), trapézoïdale (Figure 1.5b), parabolique (Figure 1.5c) et la forme $\lambda - inverse$ (Figure 1.5d) [Messai 03, Dervisoglu 12].

Pour l'estimation des paramètres macroscopique du trafic, nous nous proposons, dans cette thèse, une stratégie de calibrage d'un diagramme fondamental d'une forme triangulaire. Le choix de cette forme est à cause de sa simplicité et sa facilité d'utilisation avec le modèle de transmission cellulaire qui est le modèle de base de notre travail. En effet, seulement trois paramètres macroscopiques peuvent être déterminés par le diagramme fondamental triangulaire, qui sont : la vitesse libre (pente de la ligne de la partie fluide), la vitesse d'onde de propagation de congestion (pente de la ligne de la partie congestion) et le débit maximal. Les autres paramètres (la densité critique et la densité maximale) peuvent être déduits à partir de ces trois paramètres.

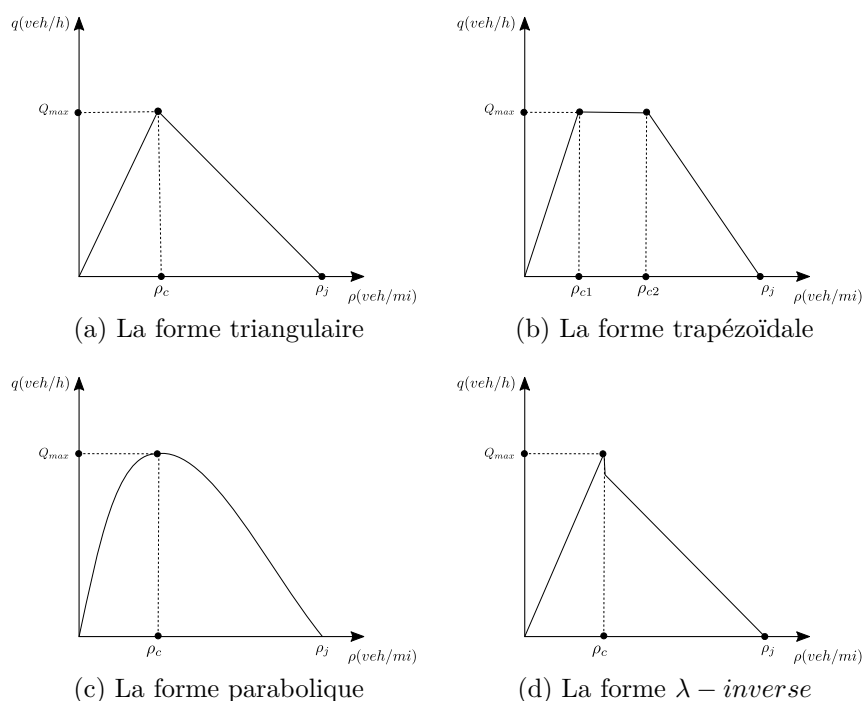


FIGURE 1.5 – Formes des digrammes fondamentaux

1.6.2.2 Le modèle de transmission cellulaire (CTM)

Les lois de conservation hyperbolique telle que l'équation différentielle du modèle LWR 1.28 présentent des solutions discontinues, spécialement dans les cas de la file d'attente et la dissipation des ondes de choc. L'application des méthodes de différence finies standard pour générer les solutions numériques de (1.28) engendrerait des solutions inexactes et instables dans les limites d'onde de choc. Néanmoins, le schéma de Godunov [Godunov 59] présente une approximation numérique stable de l'équation différentielle (1.28) du modèle de LWR [Anderson 15].

Le schéma de Godunov est l'application de la discrétisation spatiale et temporelle sur le modèle de LWR, en discrétisant le temps t en Δt et la longueur en Δx . L'application de l'approximation du schéma de Godunov en utilisant la forme triangulaire du diagramme fondamental résulte d'une approximation numérique convergente connue sous le nom modèle de transmission cellulaire (Cell Transmission Model

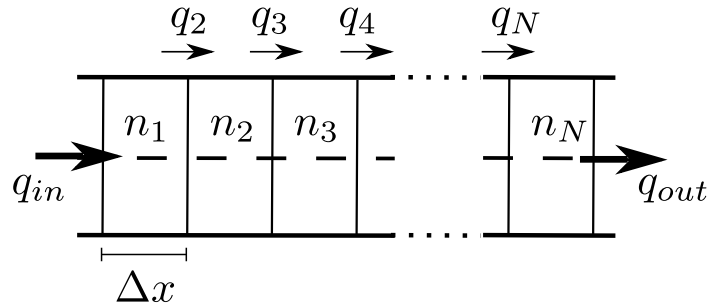


FIGURE 1.6 – Discrétisation spatial d'un tronçon routier

(CTM)).

Le modèle de transmission cellulaire est développé par Daganzo [Daganzo 94] comme une version discrétisée du modèle macroscopique du premier ordre. Considérons un tronçon routier unidirectionnel, partitionné en N segment ou cellule d'une longueur uniforme Δx . Les cellules sont numérotées d'une façon croissante à partir de l'amont vers l'aval (Figure 1.6).

La longueur des cellules est choisie comme étant la distance parcourue Δx par un véhicule typique à faible densité avec une vitesse libre v_f pendant une période Δt (équation (1.35)). Cette dernière connue sous le nom de la condition de Courant-Friedrichs-Lewy.

$$\Delta t < \frac{\Delta x}{v_f} \quad (1.35)$$

La dynamique du nombre des véhicules d'une cellule $i_{i \in [1, N]}$ est illustrée par :

$$n_i(k+1) = n_i(k) + q_i(k) - q_{i+1}(k) \quad (1.36)$$

avec n_i c'est le nombre des véhicules dans la cellule i , q_i et q_{i+1} sont respectivement le flux entrant et sortant de la cellule i à l'instant k . Ces flux sont déterminés à partir de la fonction non linéaire suivante :

$$q_i(k) = \min(S_{i-1}(k), D_i(k)) \quad (1.37)$$

avec $S_{i-1}(k)$ est la fonction offre (le nombre maximal des véhicules qui peut être délivré par la cellule $i-1$, Figure 1.7a) et $D_i(k)$ est la fonction demande (le nombre maximal de véhicules qui peut être accepté par la cellule i , Figure 1.7b). Ces fonc-

tions sont exprimées par :

$$S_{i-1}(k) = \min(n_{i-1}(k) v_{i-1}, Q_{max,i-1}) \quad (1.38)$$

$$D_i(k) = \min(Q_{max,i}, w_i(n_{j,i} - n_i(k))) \quad (1.39)$$

où Q_{max} , v , w et n_j sont respectivement le débit maximal, la vitesse libre, la vitesse d'onde de congestion et le nombre maximal des véhicules. Ces paramètres représentent les paramètres de diagramme fondamental (Figure 1.8), avec ρ_c la densité critique.

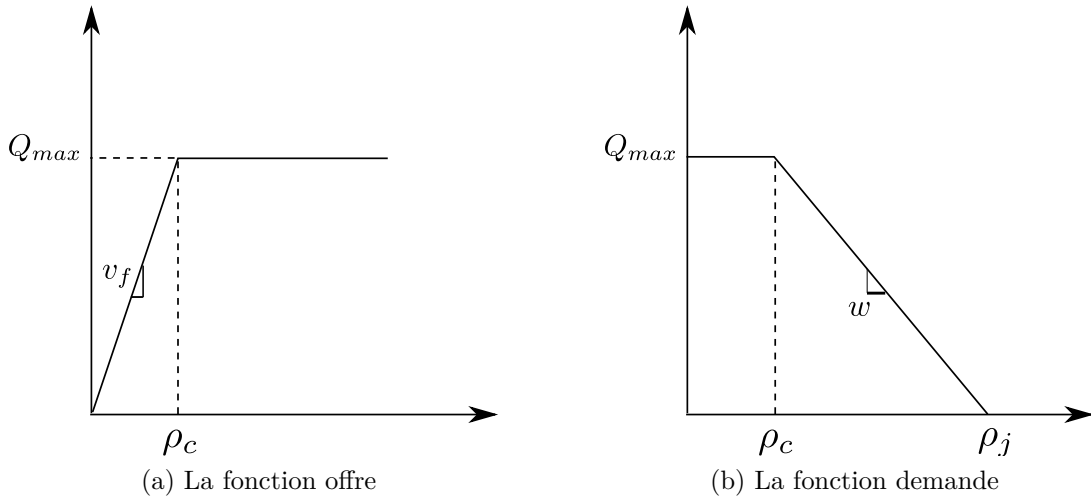


FIGURE 1.7 – Les fonction offre et demande

Le nombre des véhicules peut être converti en densités cellulaire selon $\rho = \frac{n_i}{\Delta x}$. Une autre extension de modèle de transmission cellulaire a été proposé par Daganzo dans [Daganzo 95b] pour le cas des réseaux urbains, où les notions de flux Converge et Diverge sont introduites pour décrire la dynamique du trafic dans ce type d'infrastructure. Plus récent, une autre version proposée comme une version modifiée du modèle de transmission cellulaire, où la densité a remplacé l'occupation et la longueur des cellules est considérée non uniforme de telle sorte que chaque cellule peut avoir une longueur différente des autres cellules [Munoz 03, Muñoz 06].

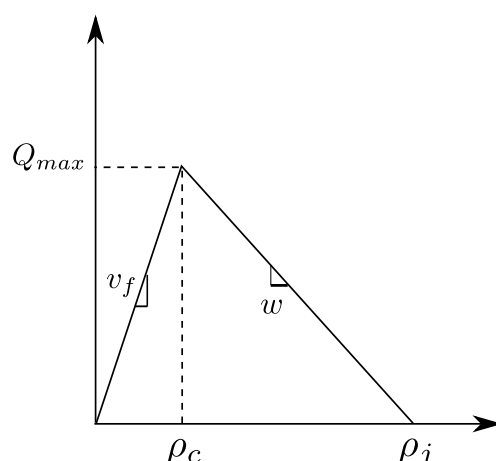


FIGURE 1.8 – Le diagramme Fondamental triangulaire du modèle CTM

1.6.2.3 Le modèle à commutation (Switched Mode Model « SMM »)

Pour traiter le problème de la non-linéarité du modèle de transmission cellulaire, une autre version est proposée dans [Muñoz 06]. Cette version est une extension de la version modifiée du modèle de transmission cellulaire, elle est considérée comme une linéarisation par morceaux du modèle de transmission cellulaire en utilisant la forme triangulaire du diagramme fondamental (Figure 1.8). Cette version est le modèle à commutation (Switched Mode Model :SMM) ou le modèle de transmission cellulaire à commutation. Le SMM est un modèle hybride d'une classe des systèmes à commutation, il commute entre cinq modes, chaque mode représente un état spécifique de la dynamique du trafic (système avec différentes dynamiques). Le SMM est basé sur les deux hypothèses suivant :

- a) Les débits d'entrée, de sortie et de rampes, les densités d'entrée et de sortie doivent être mesurés.
- b) Il y a au maximum une transition dans un tronçon. Où, si les deux bornes de tronçon ont le même état (fluide ou congestion), donc toutes les cellules de 1 à N présentent le même état que les bornes (soit fluide ou congestion). Tandis que, si les deux bornes sont d'état différent, il existe un seul front d'onde dans le tronçon, en amont congestionné (ou fluide) et en aval fluide (ou congestionné).

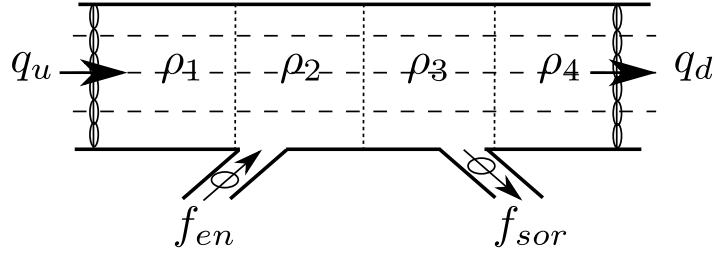


FIGURE 1.9 – Tronçon autoroutier de quatre cellules

La figure 1.9 représente un tronçon de quatre cellules avec deux rampes, une rampe d'accès et une autre de sortie, les débits mesurés sont q_u , q_d , f_{en} , f_{sor} et les densités mesurées sont ρ_u , ρ_d . La dynamique de chaque mode de SMM peut être évoluée comme suite :

$$\rho(k+1) = X_g \rho(k) + Y_g u(k) + Y_{j,g} \rho_j + Y_{q,g} Q_{max} \quad (1.40)$$

Avec $g \in [1, 5]$ est l'indice des modes FF, CC, CF, FC1 et FC2, $\rho = [\rho_1 \dots \rho_4]^T$ est le vecteur d'état, $u(k) = [q_u \ f_{en} \ f_{sor} \ \rho_d]$ est le vecteur d'entrée composé des grandeurs mesurées suivantes sont : le débit d'entrée, flux de la rampe d'entrée, flux de la rampe de sortie et la densité de sortie, $\rho_j = [\rho_{j,1} \dots \rho_{j,5}]^T$ est le vecteur de la densité maximale et $Q_{max} = [Q_{max,1} \dots Q_{max,4}]^T$ est le vecteur des débits maximaux de chaque cellule. L'équation (1.40) peut être écrite avec le débit en aval q_d comme une entrée mesurée au lieu de la densité ρ_d .

En considérant la dernière hypothèse, la dynamique de la densité dans un tronçon routier peut commuter entre les cinq modes suivants :

- Mode FF (Fluide-Fluide) : dans ce mode toutes les cellules sont fluides, le débit de chaque cellule est géré par les conditions en amont. Ce dernier est donné par la fonction offre (1.38), dans laquelle le débit total fournit par cette cellule est : $v_i \rho_i$.
- Mode CC (Congestion-Congestion) : dans ce mode toutes les cellules sont congestionnées, le débit de chaque cellule i est géré par les conditions en aval. Il est donné par la fonction demande (1.39) et le débit total reçu par cette cellule est : $w_i (\rho_{j,i} - \rho_i)$.

- Mode CF (Congestion-fluide) : dans ce mode les cellules en amont sont congestionnées et les cellules en aval sont fluides. Dans lequel, les cellules en amont du front d'onde reçoivent des véhicules en débit congestionné, alors que les cellules en aval fournissent des véhicules en vitesse libre, dans ce cas le flux des véhicules est en débit maximal Q_{max} .
- Mode FC1 (Fluide-Congestion) : dans lequel les cellules en amont sont fluides et les cellules en aval sont congestionnées et l'onde de choc présente une vitesse positive (la transition de la cellule fluide vers la cellule congestionnée se propage en aval). Dans ce mode, les cellules en amont présentent un flux avec un écoulement libre et les cellules en aval présentent un flux congestionné.
- Mode FC2 (Fluide-Congestion) : dans ce mode les cellules en amont sont fluides et les cellules en aval sont congestionnées et l'onde de choc a une vitesse négative (la transition de la cellule fluide vers la cellule congestionnée se propage en amont).

Pour plus de détail, le lecteur peut se référer aux [Munoz 04], [Muñoz 06], [Majid 14].

Les modèles macroscopiques de premier ordre présentent l'avantage de la simplicité et la robustesse dans la représentation et la simulation du flux de trafic. En outre, ils ont disposé des résolutions analytiques et numériques de l'équation d'équilibre permettant l'exactitude et la facilité de l'étude théorique du comportement du flux. Cependant, ces modèles n'ont pas la capacité de décrire certains phénomènes réels complexes tels que la saturation rapide du trafic, l'instabilité des flux de trafic autour des phases transitoires, le phénomène d'hystérésis et la variation de la vitesse [Kuhne 97, Papageorgiou 98, Messai 03]. En effet, ces phénomènes peuvent être traités par les modèles macroscopiques non linéaires ou les modèles d'ordre supérieur.

1.6.2.4 Modèles d'ordre supérieur

Pour décrire le flux de trafic d'une façon plus précise et plus réaliste, les modèles macroscopiques d'ordre supérieurs ont été développés dans le but de remédier aux insuffisances des modèles de premier ordre, en tenant compte des aspects dynamiques du trafic [LECLERCQ 02]. Ces modèles augmentent les équations de conservation avec la dynamique des vitesses spatiales moyennes pour fournir de meilleures des-

criptions de l'évolution du trafic, au détriment d'une augmentation du nombre de variables d'état et des paramètres supplémentaires qui doivent être identifiés. Dans les modèles d'ordre supérieurs l'équation d'équilibre est remplacée par une relation qui exprime l'accélération, définie par :

$$l'acceleration = relaxation + terme\ physique\ de\ comportement\ individuel$$

En se basant sur cette relation, plusieurs versions ont été développées, le premier modèle de ce type a été proposé par Payne [Payne 71] ; il est basé sur le comportement du modèle microscopique de poursuite. Dans cette version la relation du diagramme fondamental est remplacée par l'équation suivante :

$$acc = -\frac{1}{\tau} \left(v - v_{eq}(\rho) + \frac{v}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) \quad (1.41)$$

avec : $acc = \frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x}$ est l'accélération où $v \frac{\partial v}{\partial x}$ est le terme de convection qui représente l'influence des véhicules. $-\frac{1}{\tau} (v - v_{eq}(\rho))$ est le terme de relaxation du vitesse vers la vitesse d'équilibre v_{eq} et qui gère l'accélération et la décélération, τ est le temps de relaxation. $-\frac{1}{\tau} \frac{v}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x}$ est terme physique de comportement individuel qui décrit le comportement d'anticipation des conducteurs (le conducteur adapte son accélération et décélération en fonction de la densité) .

En s'appuyant sur le même principe que dans le modèle de Payne, une autre version de Payne et Whitham (modèle de PW) [Whitham 74, Payne 79] a été proposé en introduisant les rampes (rampes d'accès et de sortie). La dynamique du trafic dans ce cas est représentée par :

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \frac{\partial}{\partial x} \rho v = \psi(x, t) \quad (1.42)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\tau} \left(v - v_{eq}(\rho) + \frac{v}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) = 0 \quad (1.43)$$

avec $\psi(x, t)$ est le terme de génération qui permet l'intégration des rampes dans la dynamique du système.

Ces modèles de Payne présentent de nombreux critique et inconvénients tels que les valeurs calibrées du paramètre de temps de relaxation (entre 30 sec et 1 min) ce

qui n'est pas physiquement réalisable. De plus, dans certaines situations les modèles de Payne prédisent des valeurs négatives de la vitesse (mauvais sens de mouvement des véhicules) et autorisent les véhicules d'être influencés par le trafic en amont [Daganzo 95a].

Ces modèles ont été modifiés et améliorés par des diverses recherches récentes. Dans lesquels, Zhang [Zhang 02] a proposé une amélioration du modèle Payne où il a remplacé l'équation (1.41) par (1.44) en rajoutant un terme Φ_{LWR} qui désigne l'accélération du modèle LWR et qui permet de prédire l'accélération et la décélération des véhicules en fonction de la variation de la densité. Ce modèle est déterminé comme suit :

$$acc = -\frac{1}{\tau} (v - v_{eq}(\rho)) + \Phi_{LWR} \quad (1.44)$$

avec

$$\Phi_{LWR} = -\rho \left(\frac{\partial v_{eq}}{\partial \rho} \right)^2 \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho^2 \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{v_{eq}}{\rho} \right) \frac{\partial v_{eq}}{\partial \rho} \quad (1.45)$$

En outre, plusieurs modèles d'ordre supérieur ont vus le jour. Nous citons le modèle de Aw et Rascle [Aw 00], le modèle de Jiang et al [Jiang 02], le modèle de Ross [Ross 88] et le modèle de Del Castillo [Lesort 96]. Ces Modèles sont représentés par la forme générale (1.46). La matrice $M(U)$ et le paramètre $c(\rho)$ permettent de distinguer ces modèles.

$$\frac{\partial}{\partial t} U + M(U) \frac{\partial}{\partial x} U = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{\tau} (v - v_{eq}(\rho)) \end{bmatrix} \quad (1.46)$$

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ v \end{bmatrix}$$

a- Pour le modèle de Aw et Rascle et le modèle de Jiang, We et Zhu :

$$M(U) = \begin{bmatrix} v & \rho \\ 0 & v + c(\rho) \end{bmatrix}$$

— Modèle de Aw et Rascole : $c(\rho) = -\rho p'(\rho)$ avec $p'(\rho)$ est une fonction donnée homogène à une vitesse qui décrit l'anticipation des conditions de trafic en aval des conducteurs.

— Modèle de Jiang, We et Zhu : $c(\rho) = -c_0$ avec c_0 est une constante qui représente la vitesse de propagation d'une perturbation.

Les valeurs propres de la matrice $M(U)$ dans cette configuration sont : $\lambda_1 = v + c(\rho)$ et $\lambda_2 = v$ avec $\lambda_1 < \lambda_2$. Ce qui montre que les ondes se déplacent plus vite que le flux du trafic, donc ces modèles respectent la contrainte anisotropie du trafic.

b- Pour le modèle de Ross et le modèle de Del Castillo

$$M(U) = \begin{bmatrix} v & \rho \\ \frac{c(\rho)^2}{\rho} & v \end{bmatrix}$$

— Modèle de Ross : $c(\rho) = 0$

— Modèle de Del Castillo : $c(\rho) = -2\rho v \exp\left(\frac{v_{eq}(\rho) - v}{a}\right)$

Les valeurs propres de la matrice $M(U)$ dans cette configuration sont : $\lambda_1 = v - c(\rho)$ et $\lambda_2 = v + c(\rho)$. Dans ce cas $\lambda_2 > v$ ce qui signifie que les ondes se déplacent plus vite que le flux du trafic. D'où le non-respect du caractère anisotropie du trafic.

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu général sur la modélisation du trafic. Tout d'abord, nous avons commencé par un rappel succinct sur les capteurs et les différentes technologies utilisées dans la mesure des paramètres du trafic. Ensuite, nous avons présenté les différents critères de classification des modèles du trafic, où nous avons constaté que le niveau de détail présente un facteur essentiel dans la classification des modèles du trafic. Trois types de modèles de trafic sont connus, les modèles microscopiques, les modèles mésoscopiques et les modèles macroscopiques.

Les modèles microscopiques sont des modèles qui s'intéressent au comportement individuel des véhicules et les interactions entre eux, ces modèles présentent une grande difficulté dans la régulation et la simulation en temps réel à cause du nombre important des paramètres dans la simulation et du temps de calcul énorme. Les modèles mésoscopiques étudient le comportement des paquets des véhicules qui partagent les mêmes propriétés. Les modèles macroscopiques sont venus pour ignorer l'individualité des véhicules dans les modèles microscopiques. Les modèles macroscopiques sont plus appropriés pour élaborer des lois de commande ou simuler le flux routier dans les grands réseaux autoroutiers en temps réel. Pour ces raisons, dans cette thèse, nous nous intéressons à la modélisation macroscopique, et plus particulièrement au modèle CTM où, nous avons proposé une version hybride de CTM plus générale et plus pratique pour l'application des différentes stratégies d'estimation et du contrôle de trafic. Dans ce contexte, le chapitre suivant se concentre sur le principe des modèles hybride et stratégie utilisé dans la modélisation.

Chapitre 2

Modélisation et calibrage d'un modèle à commutation par morceaux du trafic

2.1 Introduction

Pour concevoir des stratégies de contrôle et de gestion sur le trafic, il est nécessaire de comprendre le comportement du trafic et les causes des phénomènes indésirables se produisant sur des autoroutes et des réseaux urbains. L'intégration de nouvelles stratégies en plateforme réelle ne sont pas toujours possibles. En revanche, les techniques de simulation de trafic permettent d'analyser, de tester et d'appliquer les stratégies de contrôle du trafic à partir des données réelles en un temps très court et sans déranger la vie courante. Ils ont un rôle principal dans le choix et l'évaluation des stratégies avant l'implémentation en plateformes réelles. Le modèle de transmission cellulaire (CTM) est un des modèles macroscopiques développés par la communauté des systèmes de transport intelligents, afin de simplifier la représentation et la simulation des phénomènes de trafic. Par conséquent, pour adapter celle-ci aux différentes applications des stratégies de commande et d'estimation du trafic, plusieurs travaux ont proposé des versions améliorées du CTM. Nous trouvons le Lagged CTM, dans laquelle des décalages de temps sont introduites sur la dynamique de la densité. Ce modèle est plus adapté pour les intersections et les autoroutes non homogènes [Daganzo 99]. En outre, pour faire face à des autoroutes comprenant certains sous-réseaux, le Linked Node CTM propose une approche de modélisation qui représente les segments de l'autoroute par des liens et les jonctions de réseau par des nœuds [Muralidharan 09]. Pour une meilleure description des phénomènes de circulation complexes, d'autres extensions de CTM peuvent être utilisées, telles que Location Specific CTM, qui définit diverses formes des diagrammes fondamentaux [Chen 10] et tient compte de certaines variables spécifiques telles que la localisation des capteurs et les caractéristiques géométriques. Une autre version modifiée de CTM, Interval Compositional CTM propose d'analyser la dynamique de la vitesse en prenant en compte un modèle macroscopique de second ordre sur la base des approches d'intervalle [Gning 11].

Enfin, le SMM a été proposé dans [Muñoz 06]; il considère un diagramme fondamental (DF) d'une forme triangulaire et commute entre cinq ensembles d'équations différentielles linéaires en fonction de l'état des deux cellules adjacentes et de la valeur des données principales. Récemment, diverses versions de SMM modifiées sont proposées. Dans ce contexte, les auteurs de [Lemarchand 10] utilisent une forme DF

trapézoïdale avec des incertitudes sur ses paramètres. Une autre stratégie de modélisation est appliquée sur le SMM dans [Canudas-De-Wit 12, Morbidi 14], grâce à l'utilisation de graphiques des contraintes et la mise en place des régions représentant les différents modes de fonctionnement du système.

En se basant sur le SMM, nous proposons une autre version hybride des CTM, dans laquelle nous traitons le mouvement d'onde de congestion dans le tronçon autoroutier. Dans ce chapitre, nous présentons, en premier temps, les systèmes hybrides suivi de leurs définitions et classes. Ensuite, nous détaillons le modèle linéaire à commutation par morceau du trafic. Enfin, nous proposons une méthodologie de calibrage pour identifier les paramètres macroscopiques utilisés pour la validation du modèle proposé.

2.2 Concepts liés aux systèmes dynamiques hybrides

En théorie classique, les systèmes physiques sont généralement considérés soit purement continus ou purement événementiel. En réalité, les systèmes physiques font intervenir explicitement et simultanément des phénomènes de types continu et événementiel. Ce type de systèmes est connu en automatique sous le nom système hybride. Le caractère hybride peut provenir du système lui-même ou de sa commande [Kechida 07]. En effet, ces systèmes représentent une large gamme d'applications industrielles spécialement dans la commande des systèmes automobiles, la navigation et le pilotage aérien, les réactions et les processus chimiques, et bien dans d'autres exemples existant de notre vie quotidienne [Belkhiat 11]. Principalement, différents formalismes des systèmes dynamiques hybrides existent dans la littérature telle que les systèmes intrinsèquement hybrides, les systèmes continus avec commandes discrètes, systèmes à commutations discrètes... [Mezyani 05]. Généralement, cette diversité des systèmes hybrides partage les mêmes caractéristiques qui seront expliquées dans la partie suivante.

2.2.1 Structure des systèmes hybrides

D'une façon générale, un système dynamique hybride (SDH) est un mixage entre deux comportements continu et événementiel qui interagissent entre eux. La figure 2.1 représente la structure générale d'un SDH, dans laquelle la partie continue peut

être décrite par des équations différentielles ou aux différences et la partie discrète par des automates à état finis ou des réseaux de Petri. Chaque partie possède ses entrées (discrète σ , continue u) qui fournissent des sorties (discrète Ψ , continue y). L'état discret est désigné par q et l'état continu par x .

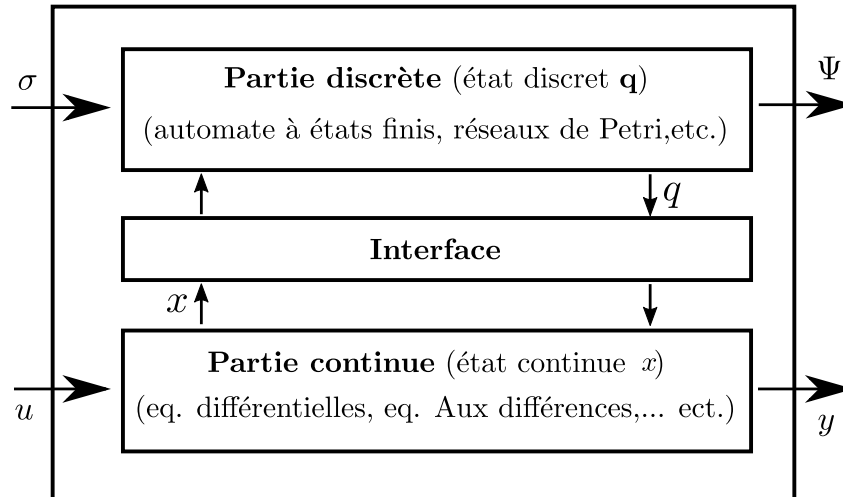


FIGURE 2.1 – Système hybride : interaction entre la partie continue et la partie discrète

2.2.1.1 Partie discrète

La dynamique discrète d'un SDH est déterminée par l'occurrence des événements discrets internes ou externes, qui peuvent être contrôlables ou non. En effet, l'existence de cette occurrence assure le changement de la dynamique continue d'un mode à un autre, qui peut être assuré par le système lui-même ou par les entrées/sorties discrètes [Karoui 11]. L'évolution discrète est associée au système à événement discret où son espace d'état est un ensemble discret fini et son changement est effectué d'une façon instantanée. En outre, l'état discret peut représenter un mode dans lequel le système ou une partie du système fonctionne. Par exemple, l'état discret peut prendre des valeurs représentant des modes tels que "on" ou "off" ; «Première vitesse», «deuxième vitesse», «troisième vitesse» ; «Contrôleur 1» ou «contrôleur 2» ... etc.

Les modèles des systèmes à événement discret les plus connus dans la littérature sont les automates à état fini [Ramadge 87], les réseaux de Petri [David 94], les statecherts [D. Harel, A. Pnueli, J. Schmidt 87] ... etc [Belkhiat 11].

2.2.1.2 Partie continue

Elle est déterminée généralement par des modèles mathématiques continus. Ces modèles décrivent la dynamique du système en traduisant les comportements physiques du processus réel. Les modèles mathématiques peuvent être représentés par des équations d'état qui évoluent en temps continu, dans lesquels l'état du système peut représenter la position, la vitesse et d'autres variables à valeur continue. Par exemple, dans un système de régulation de température, un état discret peut indiquer si un thermostat est "allumé" ou "éteint" alors qu'un état continu peut indiquer la température.

En général, les modèles peuvent être exprimés par : des équations différentielles ou aux différences, des équations algébro-différentielles, les bond-graph, les fonctions de transfert...etc[Vergé 03], [Ould Bouamama 06], [De Larminat 96], [Belkhiat 11].

2.2.1.3 Interface entre la partie discrète et la partie continue

L'interface est l'intermédiaire entre la partie continue et la partie discrète du SDH, il est exprimé par l'interaction entre ces deux aspects. L'état discret q est un élément essentiel pour déterminer la dynamique continue du SDH [Antsaklis 93] [Flaus 96]. En outre, les transitions de l'état discret d'une situation à une autre sont assurées par des signaux provenant de la partie continue. En effet, l'interaction entre les variables discrètes et continues des deux parties est appelée phénomène hybride. Cette dernière peut s'articuler comme une discontinuité de vecteur d'état ou une commutation entre les modes continus, cette commutation est déterminée par le système à événements discrets de la partie discrète.

Lorsque les variables continues atteignent les conditions de commutation, généralement des seuils spécifiques, les phénomènes hybrides peuvent être déclenchés. Dans ce cas, cette interaction est dite autonome [Johansen 97] [Li 05]. Par ailleurs, si la commande discrète extérieure affecte directement le système à événements discret, l'interaction hybride sera déclenchée. Dans ce cas, elle est dite contrôlée. Selon le type de déclenchement, quatre types d'interaction peuvent être distingués : les commutations de modèle autonomes, les commutations de modèle contrôlées, les sauts de l'état autonomes et les sauts de l'état contrôlés. Ainsi, un SDH peut se caractériser par plusieurs types de phénomènes [Branicky 98, Belkhiat 11].

2.2.2 Modélisation et définition formelle des systèmes dynamiques hybrides

Un SDH peut être considéré comme une combinaison d'une dynamique discrète ou symbolique et une dynamique continue. Le problème principal dans la définition et la représentation d'un système hybride est précisément de spécifier l'interaction entre ces deux dynamiques. En outre, une question clé dans la formulation des systèmes hybrides est la modularité souvent nécessaire dans la description du système hybride [van der Schaft 00]. En effet, étant donné que nous traitons de façon inhérente la modélisation de systèmes de trafic qui a une nature complexe, il est très important de modéliser ce type de systèmes comme une interconnexion de sous-systèmes plus simples. Dans ce chapitre nous exposons un modèle hybride de trafic qui présente une forme simple et une composition linéaire.

Généralement trois types d'approches existent dans la littérature pour la formalisation et la modélisation des systèmes dynamiques hybrides [Zaytoon 01] [Belkhiat 11], les approches issues de l'automatique continue, les approches issues des systèmes à événements discrets (SED) et les approches mixtes.

- Les modèles issus de *l'automatique continue* décrivent les phénomènes physiques comme des systèmes continus comportant des discontinuités, ce qui signifie par l'introduction des variables entières dans la dynamique continue. Les modèles Bond-Graph [Buisson 98] peuvent être catégorisés dans cette approche.
- Les modèles issus des systèmes à événements discrets sont des modèles qui représentent les phénomènes continus à travers un ensemble fini des états discrets. Les réseaux de Petri hybride [Bitam 06] peuvent être classés dans ce type. Leur formalisme prend en considération le couplage entre les deux dynamiques discrète et continue du système, en ajoutant des transitions et des places qui permettent de modéliser les phénomènes continus.

Ces deux approches présentent un problème dans la manière de la formalisation d'aspect hybride dans le modèle continu ou discret [Belkhiat 11].

- Pour répondre à cet handicap, les approches mixtes viennent comme une solution [Guéguen 01]; [De Santis 03], elles consistent à intégrer les deux aspects continu et discret dans le même formalisme de modélisation. Différents modèles de cette catégorie existent dans la littérature, tels que les automates hybrides [Lygeros 03], les RdP mixte [Vibert 97], les RdP prédicats-transitions différentiels [Champagnat 98] et les RdP différentiels [Hamdi 09].

Les modèles d'automates hybrides sont des modèles fondamentaux de l'approche mixte. Ils présentent l'avantage de simplifier la description des évolutions possibles de la dynamique d'un système physique. En revanche, les automates hybrides fournissent des modèles formels pour les systèmes physiques complexes et peuvent être considérés comme une extension d'automates à état finis en ajoutant une dynamique continue dans chacun de ses états discrets. Chaque mode est associé à des contraintes dans lesquelles la dynamique continue peut évoluer. Les contours entre les modes sont annotés avec des gardes qui spécifient les conditions dans lesquelles la transition de mode peut être déclenchée. Chaque contour est également associé à un plan de réinitialisation indiquant comment les variables continues sont mises à jour après la transition discrète [Hai 14]. Selon [Lygeros 03] les automates hybrides possèdent la structure suivante :

$$H = (Q, \Sigma, \Psi, X, U, Y, V, Init, F_C, S, \Gamma, \gamma, Inv, R, G)$$

où :

- a) $Q = \{q_i, i \in \{1, 2, \dots, s\}\}$ est un ensemble fini d'états discrets.
- b) $\Sigma = \Sigma_{Ext} \cup \Sigma_{Cont} \cup \{\varepsilon_\sigma\}$ est un ensemble fini d'entrées discrètes avec ε_σ l'évènement d'entrée "vide" (utilisé pour designer les évènements d'entrée non observables).
- c) $\Psi = \{\{\psi_j\} \cup \{\varepsilon_\psi\}, j \in \{1, \dots, r\}\}$ est un ensemble fini de sorties discrètes, ε_ψ est la sortie discrète "vide" (utilisé pour designer les évènements de sorties discrète non observable).
- d) X, U, Y, V sont des parties d'espaces vectoriels de dimension finie et correspondent respectivement aux espaces des états continus, des entrées continus, des sorties continues et des perturbations continues. Pour un état continu

$x \in X$, un état discret $q \in Q$ et une entrée de perturbation $\delta \in V$ donnés, le vecteur des sorties continues est donné par $y = h(x, q, \delta) \in Y$, avec $h : X \times Q \times V \rightarrow Y$.

- e) $init \subset X \times Q$ est l'ensemble des états initiaux.
- f) F_C est une sous-classe de systèmes dynamiques continus. La dynamique $F_i^c \in F_C$ est définie par l'équation en temps continu suivante :

$$\dot{x}(t) = f_i^c(x(t), u(t), \delta(t)) \quad i \in \{1, \dots, s\}$$

où : $t \in R$, $x(t) \in X$ et f_i^c est un champ de vecteurs.

- g) $S : Q \rightarrow F_C$ est une application associant à chaque état discret $q \in Q$ une dynamique continue $F_i^c \in F_C$.
- h) $\Gamma \subset Q \times \Sigma \times Q$ est la collection de transitions discrètes. Le triplet (q, σ, q') représente la transition partant du mode q vers le mode q' suite à l'arrivée de l'entrée discrète σ .
- i) $\gamma : \Gamma \rightarrow \psi$ est une application qui associe une sortie discrète à chaque transition discrète.
- j) $Inv : Q \rightarrow 2^{X \times \Sigma \times U \times V}$ est une application qui associe à chaque mode $q \in Q$ un domaine appelé invariant.
- k) $R : \Gamma \times X \times U \times V \rightarrow 2^X$ est l'application de réinitialisation qui après une transition discrète affecte une nouvelle valeur à l'état continu x .
- l) $G : \Gamma \rightarrow 2^{X \times U \times V}$ est une application qui faisant correspondre à chaque transition une condition de garde qui spécifie quelles conditions doivent être vérifiées pour que la transition soit franchie.

Remarque 2.1. : Les transitions discrètes définies par Γ peuvent être de différentes nature, soit :

- a) des transitions de commutations : elles sont forcées par des entrées discrètes externes $\sigma \in \Sigma_{Ext}$ non contrôlables (l'exemple : perturbation externe).
- b) des transitions contrôlables : elles sont déterminées par des entrées externes contrôlables $\sigma \in \Sigma_{Cont}$ (exemple : commande externe).

- c) des transitions d'invariant : elles se produisent lorsque la condition d'invariant n'est plus respectée (exemple : variable d'état atteignant un certain seuil).

Les transitions de commutations et les transitions d'invariant sont considérées comme des transitions incontrôlables.

2.2.3 Classes des systèmes dynamiques hybrides

L'étude des SDH présente une grande évolution dans ces dernières années, spécialement dans le formalisme et la représentation des phénomènes hybrides. En effet, de nombreuses classes des modèles des SDH apparaissent, on distingue les systèmes hybrides impulsifs [Haddad 06], les systèmes hybrides à commutation [Bourdais 07], les systèmes hybrides stochastiques [Boukas 06] , ... etc. Dans la suite, nous présentons quelques systèmes, de façon non exhaustive, et qui nous semblent significatifs et en rapport avec notre travail de thèse.

2.2.3.1 Systèmes impulsionsnels (Systèmes à sauts)

Les systèmes impulsionsnels ou à saut sont des systèmes hybrides avec une dynamique continue autonome (2.1) et un état discret régi par des entrées externes non contrôlable [Brogliato 01] [Li 05].

$$\begin{cases} x(k+1) = & A_i x(k) \\ y(k) = & C_i x(k) \end{cases} \quad (2.1)$$

avec $A_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ est la matrice d'état, $C_i \in \mathbb{R}^{p \times n}$ est la matrice de sortie et $i \in Q$ est l'indice de sous système dynamique. Cette classe des systèmes hybrides possède un seul mode $Q = \{q_i\}$ et une transition unique $\Gamma = (q_0, q_0)$ de type transition de commutation, qui permet de réinitialisation la dynamique continue à travers la fonction reset $R(\Gamma, x)$. Par conséquent, le système change sa dynamique lorsque la variable d'état $x(k)$ vérifie certaines conditions, dans ce cas le système présente un saut d'un mode à un autre et la variable d'état est affectée par une nouvelle valeur.

2.2.3.2 Systèmes à commutations

Un système commuté est un système dynamique qui se compose d'un nombre fini de sous-systèmes et d'une règle logique qui régit la commutation entre ces sous-systèmes par une loi de commutation. Celle-ci spécifie la dynamique active

du système à chaque instant [Lin 09]. Mathématiquement, les sous-systèmes sont habituellement décrits par une collection d'équations différentielles ou différentielles indexées (2.2). Cette classe des systèmes dynamiques hybride présente une large utilisation dans l'automatique à cause de ces avantages dont la modélisation d'une large gamme des systèmes physiques [Belkhiat 11]. La dynamique continue d'un système à commutation est donnée par la formulation générale suivante :

$$\begin{cases} x(k+1) = A_i x(k) + B_i u(k) \\ y(k) = C_i x(k) \end{cases} \quad (2.2)$$

Avec $A_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ est la matrice d'état, $B_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$ est la matrice d'entrée, $C_i \in \mathbb{R}^{p \times n}$ est la matrice de sortie et $i \in Q$ est l'indice des sous systèmes dynamiques. L'état continu du système à commutation change sa dynamique d'un intervalle à une autre selon la loi de commutation. La valeur de la variable d'état continu $x(t)$ n'est pas actualisée lors d'une commutation. Cette classe des systèmes hybrides peut être catégorisé au plusieurs types. Dans lesquelles, nous trouvons dans la littérature : les systèmes à commutations dépendant de l'état, les systèmes à commutations dépendant du temps et les systèmes à commutations mixtes [Hamdi 10] [Shorten 07] [Lunze 09].

2.2.3.3 Systèmes linéaires affines par morceaux

Les systèmes linéaires affines par morceaux sont devenus comme un outil de modélisation pertinent et puissant dans l'approximation des systèmes non-linéaires d'une façon générale. Par conséquent, ils sont obtenus par la division de l'espace d'état dans un nombre fini des régions polyédriques et en associant à chaque région un modèle dynamique linéaire différent (2.3). En outre, la dynamique discrète est régie par des transitions de type invariant [Mignone 00] [Juloski 04]. Habituellement, cette classe des SDH réussit à cerner de nombreuses caractéristiques générales des systèmes physiques et permet une analyse mathématique manipulable [Rondepierre 05].

$$\begin{cases} x(k+1) = A_i x(k) + B_i u(k) + g_i \\ y(k) = C_i x(k) \end{cases} \quad (2.3)$$

Avec $A_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ est la matrice d'état, $B_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$ est la matrice d'entrée, $g_i \in \mathbb{R}^n$,

$C_i \in \mathbb{R}^{p \times n}$ est la matrice de sortie et $i \in Q$ est l'indice des sous systèmes dynamiques.

Le système linéaire par morceaux évolue suivant plusieurs dynamiques différentes avec un partitionnement de l'espace d'état-entrée du système d'invariant $Inv(q)$, où $\{Inv(q), q \in Q\}$. En effet, le vecteur d'état $x(k)$ du système n'est pas actualisé lors de commutation (la transition $\Gamma = (q_0, q_1)$ n'autorise aucune réinitialisation d'état). Ainsi, pour un instant $k = k_0$, l'état initial x_0 et l'évolution de vecteur d'état $x(k)$ sont régies par le sous système d'invariant $Inv(q_0)$. Lorsqu'un instant donné $x(k)$ atteint (ou dépasse) la frontière séparant le domaine d'invariant $Inv(q_0)$ du domaine d'invariant $Inv(q_1)$, l'évolution de $x(k)$ sera régie par un nouveau sous système d'invariant $Inv(q_1)$ [Birouche 06, Belkhiat 11].

À cause de la nature complexe et non-linéaire du système de trafic, nous adoptons, dans la suite de ce chapitre, les notions des systèmes linéaires affines par morceaux et les systèmes à commutation pour la formalisation d'un modèle hybride de trafic.

2.3 Le modèle linéaire à commutation par morceau du trafic

2.3.1 Principes et descriptions

Dans ce chapitre, nous proposons une version modifiée du CTM. Ce modèle (modèle linéaire à commutation par morceaux) permet de modéliser le flux de trafic d'une façon plus précise pour un tronçon routière donnée, en tenant compte de sa géométrie. Il a l'avantage d'être modulaire et permet à l'utilisateur de l'adapter en fonction du nombre et de la longueur souhaitée des cellules. En comparaison à d'autres travaux, ce modèle permet également de considérer plusieurs ondes de congestion et peut être par conséquent approprié pour certaines applications telles que la détection des incidents. De plus, contrairement aux travaux précédents qui approximent les conditions aux limites à travers le diagramme fondamental, dans le modèle linéaire à commutation par morceaux ce problème est traité à l'aide de la mesure en amont et en aval des limites de chaque section. Cela permet de découpler la dynamique des flux de trafic d'une section donnée de la dynamique de ses sections adjacentes en amont et en aval [Zeroual 17].

Enfin, le problème de la non-linéarité est résolu par l'application d'une linéarisation par morceaux sur le CTM. Cependant, contrairement aux travaux existants

(à titre d'exemple [Muñoz 06]), les deux directions de propagation des ondes de congestion sont considérées dans le modèle proposé. En effet, comme représenté sur la figure 2.2a, quand un goulot d'étranglement est créé dans une position de route, l'encombrement se propage cellule par cellule, à partir du point de blocage vers les cellules supérieures de la section dans le sens inverse de l'écoulement du trafic. Le même phénomène est créé lorsque le flux est libéré, l'onde se déplace de l'aval vers les cellules amont (figure 2.2b).

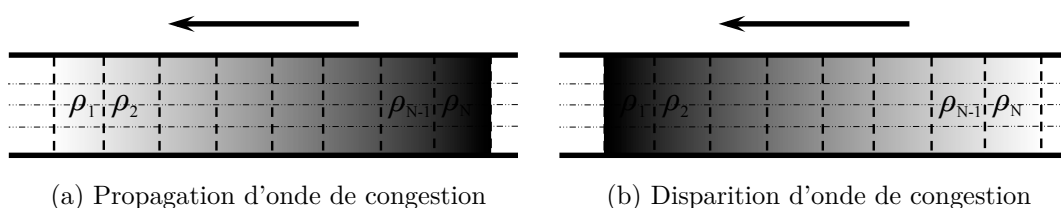


FIGURE 2.2 – Directions de propagation d'onde de congestion

Dans ce chapitre, nous nous concentrerons à la formalisation d'un modèle du trafic en s'appuyant sur la classe des systèmes hybrides linéaires par morceau. Ce système hybride est constitué d'un nombre fini de sous-systèmes et un signal de commutation spécifiant quand et comment se déroule le basculement. Ainsi, nous discutons, en premier, l'évolution discrète du modèle. Ensuite, nous expliquons brièvement la dynamique continue en fonction de l'état de l'écoulement des cellules adjacentes de la circulation puis nous proposons le modèle de trafic sous un formalisme d'un modèle Piecewise Switched linéaire (PWSL). Dans la suite, nous supposons que :

- Chaque cellule peut avoir une rampe maximale (ON rampe ou Off rampe),
- Les cellules de la limite du tronçon sont considérés sans rampes (ni ON rampe ni Off rampe).

2.3.2 La partie discrète du modèle

Dans le but de simplification et sans perte de la généralité, cette partie suppose qu'une seule onde de congestion pourrait apparaître dans le tronçon considéré. Cette hypothèse est crédible pour étudier un tronçon routier d'une longueur raisonnable.

Ainsi, si on considère un tronçon de N cellules avec deux états de trafic (congestionné ou fluide), on obtient 2^N modes possibles. En outre, en tenant compte du comportement normal du trafic (une seule onde de congestion apparaît), on obtient $2 \times N$ modes. Par exemple, si nous avons un tronçon de quatre cellules, nous obtenons huit modes normaux au lieu de seize modes possibles. La commutation entre ces modes est assurée par les conditions de congestion des cellules, qui sont voisines de la densité critique de chaque cellule.

Afin de représenter la dynamique discrète de la circulation, nous introduisons les définitions suivantes :

Définition 2.1. La cellule i est considérée fluide (F) si la valeur médiane ($\tilde{\rho}_i(k)$) de sa densité est inférieure ou égale à sa densité critique ($\rho_{c,i}$).

Définition 2.2. La cellule i est considérée congestionnée (C) si la valeur médiane ($\tilde{\rho}_i(k)$) de sa densité est supérieure à sa densité critique ($\rho_{c,i}$).

Notez que comme les données de trafic sont affectées de bruit, nous proposons d'utiliser une condition de commutation basée sur la valeur médiane du vecteur $[\rho_i(k-l), \dots, \rho_i(k)]$, où l est le nombre des échantillons des données pour une période de temps connue.

En fait, l'utilisation des conditions de commutation classiques, en fonction de la valeur de la densité à l'instant k , se traduira par un nombre élevé de commutations entre les modes dans une période de temps très courte. Cette nouvelle façon d'envisager le changement d'état du trafic permet une modélisation plus réaliste et plus précise de la propagation des ondes de congestions (en réalité, l'état du trafic ne change pas beaucoup dans une courte période de temps).

Comme présenté dans le tableau 1, pour un tronçon de N cellules, lorsque le goulot d'étranglement apparaît, l'onde de congestion se propage à partir de la cellule de bourrage aux cellules amont. L'état de congestion du tronçon commence à partir de la cellule N , et se propage cellule par cellule (mode 2 au mode N) jusqu'à la congestion complète de toute la section (Mode $N + 1$). De la même manière lorsque le trafic devient fluide, l'état d'écoulement libre va se propager à partir de la cellule N aux cellules amont, cellule par cellule (mode $N + 2$ au mode $2N$) jusqu'à ce que l'état libre soit complètement propagé dans toute la section (revenir au Mode 1) .

TABLE 2.1 – Les modes discrets du trafic correspondant au comportement normal

Modes	Cellules					
	1	2	...	$N - 2$	$N - 1$	N
1	F	F	...	F	F	F
2	F	F	...	F	F	C
3	F	F	...	F	C	C
\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots	\vdots	\vdots
N	F	C	...	C	C	C
$N + 1$	C	C	...	C	C	C
$N + 2$	C	C	...	C	C	F
\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots	\vdots	\vdots
$2N$	C	F	...	F	F	F

Enfin, toutes les commutations possibles en évolution normale sont illustrées sur l'automate hybride de la figure 2.3.

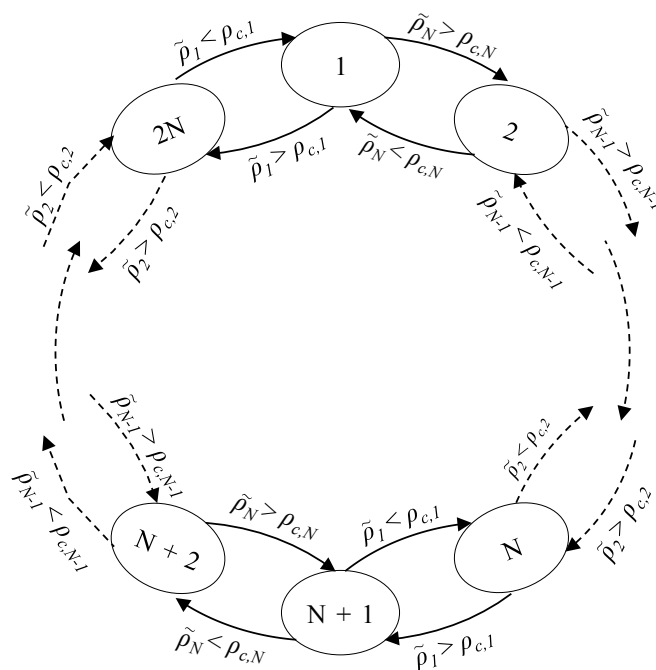


FIGURE 2.3 – L'évolution discret du modèle de PWSL

2.3.3 La partie continue du modèle

Dans cette partie, nous discutons le formalisme de la dynamique du flux de trafic dans chaque mode. Nous supposons que les longueurs des cellules peuvent être non-uniformes et respectent la condition de Courant–Friedrichs–Lewy inequality, dont la condition nécessaire pour la convergence des solutions du CTM aux solutions du modèle LWR [Muñoz 06].

La densité de chaque cellule i est régie par la loi de conservation des véhicules suivante [Muñoz 06] :

$$\rho_i(k+1) = \rho_i(k) + \frac{\Delta T}{\Delta x_i} (q_{i,in}(k) - q_{i,out}(k)) \quad (2.4)$$

avec $q_{i,in}(k)$ et $q_{i,out}(k)$ sont respectivement le débit total entrant et sortant de la cellule i dans l'intervalle $[k, k+1)$ comprenant le débit principal, le débit de rampe d'entrée et le débit de la rampe de la sortie si elles existent. Δx_i et ΔT sont respectivement la longueur de la cellule i et le pas du temps. Le flux peut être obtenu par (2.5).

$$q_i(k) = \min(S_{i-1}(k), R_i(k)) \quad (2.5)$$

Comme illustré précédemment $S_{i-1}(k)$ et $R_i(k)$ sont respectivement la fonction offre et la fonction demande.

2.3.3.1 Les conditions aux limites

Avant d'exprimer la dynamique de la densité dans une cellule donnée, il est important de considérer, tout d'abord, les cellules aux limites du tronçon routier. Selon l'état du trafic, la cellule d'entrée et la cellule de sortie pourraient être soit dans un état fluide ou congestionné. Dans le cas où la première cellule est fluide, sa condition limite correspond à la fonction d'offre S_0 peut être obtenu directement à partir des boucles magnétiques en amont, ce qui correspond au débit mesuré (2.6). De la même façon, la condition limite de la dernière cellule correspond à son débit de sortie donné par la fonction d'offre S_{N-1} (2.7). Par contre, lorsque la première cellule est congestionnée son état limite correspond à la fonction de demande R_1 (2.6), et correspond à la fonction demande R_N si la dernière cellule est congestionnée, elle est directement fournie par le capteur en aval (2.7) [Zeroual 17].

— cellule 1

$$\begin{cases} S_0 = q_{in} \\ R_1 = \min(Q_{M,1}, w_1(\rho_{j,1} - \rho_1(k))) \end{cases} \quad (2.6)$$

— cellule N

$$\begin{cases} S_{N-1} = \min(v_{N-1}\rho_{N-1}(k), Q_{M,N-1}) \\ R_N = q_{out} \end{cases} \quad (2.7)$$

Notons que, contrairement à d'autres travaux, cette modification concernant les conditions aux limites, facilite le découplage de la dynamique d'une section donnée par la dynamique de ses sections voisines, en amont et en aval.

Après cette brève présentation des conditions aux limites, nous examinons maintenant la dynamique du flux selon l'état de la circulation dans les cellules qui sont à l'intérieur de la section.

2.3.3.2 La dynamique de la densité dans une cellule i

En général, on distingue trois types de connexion principales dans une route : simples (sans rampes), merge (avec rampe) et diverge (avec Off rampe).

Pour simplifier la présentation, nous supposons, dans un premier temps, un tronçon routier avec seulement des connexions simples (Figure 2.4) c'est-à-dire aucune rampes d'accès à sa jonction avec ses cellules amont et aval (en effet, une cellule i est relativement simple, si elle n'a pas de rampes d'accès à sa jonction avec ses cellules amont et aval).

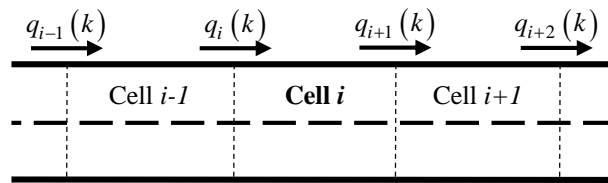


FIGURE 2.4 – simple connexion

La dynamique de la densité dans une cellule i est donnée par (2.4) et (2.5). La forme générale des fonctions offre et demande dans ce type de connexion est exprimée par :

$$S_{i-1}(k) = \min(v_{i-1}\rho_{i-1}(k), Q_{M,i-1}) \quad (2.8)$$

$$R_i(k) = \min(Q_{M,i}, w_i(\rho_{j,i} - \rho_i(k))) \quad (2.9)$$

En tenant compte du fait que la densité dans une cellule i est influencée par la dynamique des cellules voisines (la cellule en amont et la cellule en aval). Pour cela, on peut identifier les cas suivants :

Cas 1. Lorsqu'une cellule i et ses cellules en amont et en aval sont libres, l'onde de choc se déplace vers l'aval. Dans ce cas, la dynamique de la densité dans la cellule i est influencée par l'état de la cellule amont et elle est donnée par :

$$\rho_i(k+1) = \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_i} v_i\right) \rho_i(k) + \frac{\Delta T}{\Delta x_i} v_{i-1} \rho_{i-1}(k) \quad (2.10)$$

Cas 2. Si les deux cellules i et $i-1$ sont fluides et la cellule $i+1$ est congestionnée, congestionnée, la densité dans la cellule i maintient la même dynamique que pour le cas 1. Cela peut expliquer par le mouvement en aval de l'onde de choc dans la cellule i et $i-1$

Cas 3. Si les deux cellules i et $i+1$ sont congestionnées et la cellule $i-1$ est fluide, un phénomène d'interaction entre les ondes de choc se produit. Dans lequel, le mouvement d'onde de choc de la cellule i et la cellule $i+1$ sera en arrière, alors que celui de la cellule $i-1$ sera en avant. Donc, les deux densités en amont et en aval affectent la dynamique de la densité du cellule i , dont elle est donnée par :

$$\begin{aligned} \rho_i(k+1) = & \rho_i(k) + \frac{\Delta T}{\Delta x_i} v_{i-1} \rho_{i-1}(k) + \frac{\Delta T}{\Delta x_i} w_{i+1} \rho_{i+1}(k) \\ & - \frac{\Delta T}{\Delta x_i} w_{i+1} \rho_{j,i+1} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Cas 4. Si la cellule i et ses cellules voisines en amont et en aval sont congestionnées, l'onde de choc sera déplacée en arrière. Dans ce cas, la dynamique de la densité dans la cellule i est influencée par l'état de la cellule en aval. Dans

la quel, la dynamique de la densité dans la cellule i est donnée par :

$$\begin{aligned} \rho_i(k+1) = & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_i} w_i\right) \rho_i(k) + \frac{\Delta T}{\Delta x_i} w_{i+1} \rho_{i+1}(k) \\ & - \frac{\Delta T}{\Delta x_i} w_{i+1} \rho_{j,i+1} + \frac{\Delta T}{\Delta x_i} w_i \rho_{j,i} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Cas 5. Si la cellule i et la cellule $i-1$ sont congestionnées et la cellule $i+1$ est fluide, les deux cellules i et $i+1$ présentent une direction opposée des ondes de choc. Cela peut provoquer l'apparition du débit maximal de la cellule $i+1$ dans la dynamique de la densité de la cellule i , qui est donnée par :

$$\begin{aligned} \rho_i(k+1) = & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_i} w_i\right) \rho_i(k) + \frac{\Delta T}{\Delta x_i} w_i \rho_{j,i} \\ & - \frac{\Delta T}{\Delta x_i} Q_{M,i+1} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Cas 6. Si la cellule i et la cellule $i+1$ sont fluide et la cellule $i-1$ est congestionnée, les deux cellule i et $i-1$ auront des ondes de choc opposées. Dans ce cas, le débit de la cellule i devient maximal, et la dynamique de sa densité est donnée par :

$$\rho_i(k+1) = \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_i} v_i\right) \rho_i(k) + \frac{\Delta T}{\Delta x_i} Q_{M,i} \quad (2.14)$$

2.3.3.3 La représentation d'état du modèle PWSL

Comme on vient de le préciser dans la partie précédente, que la dynamique de la densité dépend des états des trois cellules adjacentes. Maintenant, pour analyser un tronçon routier comportant un nombre quelconque des cellules, nous allons réécrire les équations précédentes d'une façon générale. L'objectif est d'élaborer un modèle de trafic de PWSL permettant de manipuler n'importe quelle partie quelconque d'une manière modulaire. Selon les développements précédents, on peut écrire le modèle d'une section de N cellules sous la forme (2.15)

$$\rho(k+1) = A_s \rho(k) + B_s u(k) + D_s \begin{bmatrix} \rho_j \\ Q_M \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

avec :

- $s = \{1, \dots, 2N\}$ indique le mode de fonctionnement du système,
- $\rho(k) = [\rho_1(k), \dots, \rho_N(k)]^T$ est le vecteur d'état de la densité,
- $u(k) = [q_{in}(k) \quad q_{ON,2}(k) \quad \dots \quad q_{ON,N-1}(k) \quad q_{out}(k)]^T$ est le vecteur de flux d'entrée total (débit d'entrée, débit de sortie, débit de rampe d'entrée),
- $Q_M = [Q_{M,1}, \dots, Q_{M,N}]^T$ est le vecteur des débits maximaux, $\rho_j = [\rho_{j,1}, \dots, \rho_{j,N}]$ c'est le vecteur des densités maximales,

$(\rho(k), u(k), Q_M, \rho_j) \in \mathbb{R}^{N \times 1}$. $A_s \in \mathbb{R}^{N \times N}$, $B_s \in \mathbb{R}^{N \times N}$ et $D_s \in \mathbb{R}^{2N \times 2N}$ sont des matrices connues. D'autre part, $\alpha, \gamma, \delta, \zeta$ et θ sont des paramètres de sélection, qui sont introduits pour le but de faciliter la généralisation du modèle à tout état possible de trafic.

$$A_s = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_1} \alpha_1\right) & \frac{\Delta T}{\Delta x_1} \zeta_2 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{\Delta T}{\Delta x_2} \delta_1 & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_2} \alpha_2\right) & \frac{\Delta T}{\Delta x_2} \zeta_3 & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \frac{\Delta T}{\Delta x_{N-1}} \delta_{N-2} & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_{N-1}} \alpha_{N-1}\right) & \frac{\Delta T}{\Delta x_{N-1}} \zeta_N \\ 0 & \dots & 0 & \frac{\Delta T}{\Delta x_N} \delta_{N-1} & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_N} \alpha_N\right) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$B_s = \begin{bmatrix} \frac{\Delta T}{\Delta x_1} \gamma_1 & \frac{\Delta T}{\Delta x_1} \gamma_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \frac{\Delta T}{\Delta x_{N-2}} \gamma_{N-2} & \frac{\Delta T}{\Delta x_{N-2}} \gamma_{N-1} & \\ 0 & \dots & 0 & \frac{\Delta T}{\Delta x_{N-1}} \gamma_{N-1} & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \frac{\Delta T}{\Delta x_N} \gamma_N \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$D_s = \begin{bmatrix} B_{jam,s} & 0 \\ 0 & B_{Q,s} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$B_{jam,s} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta T}{\Delta x_1} \theta_1 & -\frac{\Delta T}{\Delta x_1} \theta_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{\Delta T}{\Delta x_2} \theta_2 & -\frac{\Delta T}{\Delta x_2} \theta_3 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \frac{\Delta T}{\Delta x_{N-1}} \theta_{N-1} & -\frac{\Delta T}{\Delta x_{N-1}} \theta_N \\ 0 & \cdots & 0 & \frac{\Delta T}{\Delta x_N} \theta_N \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$B_{Q,s} = [b_{m,n}] \quad (2.20)$$

Les valeurs des paramètres de sélections sont données dans le tableau 2.2 et tableau 2.3. Notons que, cette formulation concerne le cas d'une onde et plusieurs ondes de congestion.

TABLE 2.2 – Valeurs des paramètres de sélections selon l'état du trafic de la cellule i et ses cellules voisines

État des cellules			Variables de sélections				
cellule $i-1$	cellule i	cellule $i+1$	α_i	δ_{i-1}	ζ_{i+1}	θ_i	θ_{i+1}
F	F	F	$v_{f,i}$	$v_{f,i-1}$	0	0	0
F	F	C	$v_{f,i}$	$v_{f,i-1}$	0	0	0
F	C	C	0	$v_{f,i-1}$	w_{i+1}	0	w_{i+1}
C	C	C	w_i	0	w_{i+1}	w_i	w_{i+1}
C	C	F	w_i	0	0	w_i	0
C	F	F	$v_{f,i}$	0	0	0	0

En outre le paramètre γ_i est introduit pour gérer l'effet du vecteur du flux d'entrée sur la dynamique de la densité. Les valeurs de ce paramètre pour les cellules aux limites sont résumées dans le tableau 2.3 avec $\gamma_{i,i \in [2, N-1]} = 0$.

TABLE 2.3 – Valeurs des paramètres des cellules aux limites

Cellule	État	Valeurs des variables
1	F	$\gamma_1 = 1$
	C	$\gamma_1 = 0$
N	F	$\gamma_N = 0$
	C	$\gamma_N = -1$

Concernant la matrice D_s , on remarque que $B_{jam,s}$ apparait seulement dans l'état de congestion. En outre, $B_{Q,s}$ apparait dans les deux cellules amont et aval la frontière entre les sous-section fluide et congestion, dans la direction de propagation de l'onde de disparation du congestion (fluidité du tronçon). Ainsi, en considérant que l'onde fluidité est située à la limite des cellules i et $i + 1$, les élément de la matrice $B_{Q,s}$ peuvent être déterminer à partir de la forme suivante :

$$\begin{cases} b_{m,n} = -\frac{\Delta T}{\Delta x_i} & \text{si } m = i \wedge n = i + 1 \\ b_{m,n} = \frac{\Delta T}{\Delta x_{i+1}} & \text{si } m = i + 1 \wedge n = i + 1 \\ b_{m,n} = 0 & \text{autrement} \end{cases}$$

Après ces brèves explications de la configuration du modèle dans le cas d'une section avec des connexions simples, nous allons maintenant traiter les sections avec des connexions merges ou diverges (ON ou Off rampes).

2.3.3.4 La configuration des rampes

Les connexions convergente et divergente sont des connexions typiques qui apparaissent dans les réseaux urbains et les autoroutes, connues dans les autoroutes par la rampe d'accès (ON rampe) et la rampe de sortie (Off rampes), et elles sont généralement définies par l'introduction des coefficients pour prendre en compte le phénomène de Capacity Droop et d'autres phénomènes. Par ailleurs, une autre approche, connue sous l'approche de section, elle est récemment introduite par [Gupta 13] pour modéliser les réseaux urbains. Ceci n'entre pas dans le contexte de notre étude sur le trafic des autoroutes, pour plus de détail, le lecteur est invité à se référer aux [Gupta 06, Gupta 13] et ces références.

a- Connexion Convergente

La connexion **Convergente** représente la configuration dans laquelle une cellule i a une rampe d'accès (ON rampe) considérée comme une jonction supplémentaire, comme présenter dans la figure 2.5.

Un phénomène important apparait dans ce type de connexion, appelé Capacity Droop, où la congestion se manifeste autour de la rampe d'accès. Une réduction

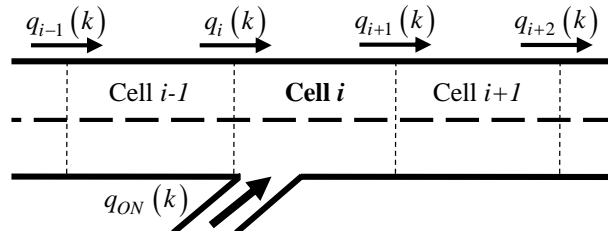


FIGURE 2.5 – Connexion Merge

observable apparait de 10% de débit total qui traverse cette jonction [Chung 07]. Pour remédier à ce problème, les auteurs de [Gomes 06, Lemarchand 12] introduisent un coefficient supplémentaire de convergence γ de manière à permettre le contrôle de l'écoulement dans l'état de congestion. Par conséquent, la fonction offre et demande sont données par :

$$S_{i-1}(k) = \min(v_{i-1}\rho_{i-1}(k), Q_{M,i-1}) \quad (2.21)$$

$$R_i(k) = \min(Q_{M,i}, w_i(\rho_{jam,i} - \rho_i(k)) - \gamma_i q_{ON,i}) \quad (2.22)$$

avec $\gamma_{i,i \in [2, N-1]}$ est le coefficient de fusion (merge coefficient) et $q_{ON,i}$ est le flux de la rampe d'accès de la cellule i .

Dans cette configuration, les matrices A_s , $B_{j,s}$ et $B_{Q,s}$ possèdent la même configuration que dans le cas de la connexion simple. Cependant, l'influence de la rampe d'accès apparait dans la matrice B_s et selon l'état de la circulation, elle peut affecter soit la dynamique de la cellule i ou la dynamique de sa cellule en amont $i - 1$.

Dans le cas où la cellule i contient une rampe d'accès, son coefficient de fusion apparait dans sa dynamique si cette cellule est en état fluide, cela peut être expliqué par le fait que le flux de la rampe d'accès est considéré comme un autre flux d'entrée à la cellule i . Par exemple, si la cellule i et ses cellules voisines $i - 1$ et $i + 1$ sont fluides, la dynamique de la cellule $i - 1$ et $i + 1$ sont régies selon les paramètres définis précédemment. De la même manière, la dynamique de la cellule i est donnée par :

$$\rho_i(k+1) = \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_i} v_{f,i}\right) \rho_i(k) + \frac{\Delta T}{\Delta x_i} v_{i-1} \rho_{i-1}(k) + \frac{\Delta T}{\Delta x_i} q_{ON,i} \quad (2.23)$$

Il est important de noter que cette équation représente un cas particulier de ((2.15)) dans le quel $\gamma_{i,i \in [2, N-1]} = 1$.

Cependant, si la cellule i est congestionné, le coefficient marge apparait seulement dans la dynamique de la cellule amont et sa valeur est $\gamma_{i,i \in [2, N-1]} = 1.1$. Ceci peut être expliqué par le mouvement en arrière de l'onde de choc de congestion [Gomes 06].

b- Connexion Divergente

La connexion divergente représente la configuration dans laquelle la cellule i a une rampe de sortie (Off rampe) considérée comme une jonction supplémentaire, comme l'indique la figure 2.6.

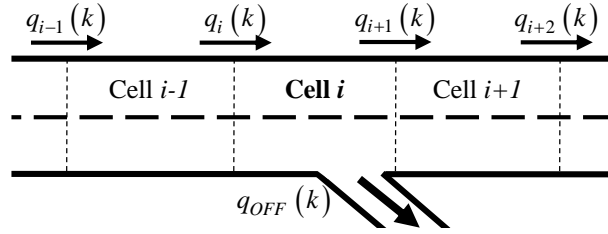


FIGURE 2.6 – Connexion Diverger

Pour gérer ce type de connexion, un ratio divergence est introduit par [Muñoz 06], la loi de divergence est donnée par :

$$q_{i,out}(k) = \min \left(S_i(k), \frac{R_{i+1}(k)}{1 - \beta_i} \right) \quad (2.24)$$

avec β_i est le ratio de convergence et $q_{i,out}(k)$ est le flux total sortant du cellule i avec :

$$q_{i,out}(k) = q_{i+1}(k) + q_{OFF,i} \quad (2.25)$$

Où :

$$q_{OFF,i} = \beta_i q_{i,out}(k) \quad (2.26)$$

Contrairement au cas de la connexion convergente, la présence de la connexion divergente affecte les paramètres des matrices A_s et D_s du système ((2.15)). Ainsi, selon l'état du trafic, le coefficient de divergence peut affecter soit la dynamique du cellule i ou la dynamique de la cellule aval $i + 1$. Cela peut être expliqué par le

mouvement en avant d'onde de fluidité. Par exemple, si la cellule i et ses cellules en amont et en aval sont fluides, les dynamiques de la densité des cellules i et $i - 1$ sont identiques à celles de la connexion simple. De la même façon, la dynamique de la cellule $i + 1$ est donné par :

$$\rho_{i+1}(k+1) = \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_{i+1}} v_{f,i+1}\right) \rho_{i+1}(k) + \frac{\Delta T}{\Delta x_{i+1}} (1 - \beta_i) v_{f,i} \rho_i(k) \quad (2.27)$$

On remarque que cette équation est un cas particulier de l'équation ((2.15)), dans lequel le ratio de divergence qui affecte la cellule $i + 1$ apparaît ($1 - \beta_i$ au lieu de 1).

Autrement, si la cellule i est congestionné, l'influence du ratio de divergence apparaît seulement dans la dynamique de la cellule i (la dynamique de la densité de la cellule $i - 1$ et $i + 1$ sont identiques à celle de la connexion simple). Par exemple, si la cellule i et ses voisines en amont et en aval sont congestionné, la dynamique de la densité de la cellule i est exprimée par :

$$\rho_i(k+1) = \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_i} w_{f,i}\right) \rho_i(k) + \frac{1}{1 - \beta_i} \frac{\Delta T}{\Delta x_i} w_{i+1} \rho_{i+1}(k) - \frac{\Delta T}{\Delta x_i} w_{i+1} \rho_{j,i+1} + \frac{\Delta T}{\Delta x_i} \frac{1}{1 - \beta_i} w_i \rho_{j,i} \quad (2.28)$$

Cependant, si la cellule $i + 1$ est fluide, la dynamique de la cellule i devient :

$$\rho_i(k+1) = \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_i} w_{f,i}\right) \rho_i(k) + \frac{\Delta T}{\Delta x_i} w_i \rho_{j,i} - \frac{\Delta T}{\Delta x_i} \frac{1}{1 - \beta_i} Q_{M,i+1} \quad (2.29)$$

2.4 Méthodologie de calibrage des données de trafic

Généralement, les modèles macroscopiques de trafic comprennent un nombre réduit des paramètres comparant aux d'autres modèles de trafic, ils disposent également d'une forme analytique qui permet leur utilisation pour les différents stratégies

de contrôle et d'estimation au-delà de la simulation. Le diagramme fondamental (DF) représente la relation densité-débit, qui comporte les paramètres macroscopiques du modèle de trafic. Il a un rôle essentiel dans les modèles de flux de trafic.

Pour concevoir des stratégies de contrôle et de gestion sur le trafic, il est nécessaire de comprendre le comportement du trafic et les causes des phénomènes indésirables se produisant sur des autoroutes et des réseaux urbains. L'intégration de nouvelles stratégies en plateforme réelle ne sont pas toujours possibles. En revanche, les techniques de simulation de trafic permettent d'analyser, de tester et d'appliquer les stratégies de contrôle du trafic à partir des données réelles en un temps très court et sans déranger la vie courante. Ils ont un rôle principal dans le choix et l'évaluation des stratégies avant l'implémentation en plateformes réelles. Le modèle de transmission cellulaire (CTM) est un des modèles macroscopiques développés par la communauté des systèmes de transport intelligents, afin de simplifier la représentation et la simulation des phénomènes de trafic. Par conséquent, pour adapter celle-ci aux différentes applications des stratégies de commande et d'estimation du trafic, plusieurs travaux ont proposé des versions améliorées du CTM. Nous trouvons le Lagged CTM, dans laquelle des décalages de temps sont introduites sur la dynamique de la densité. Ce modèle est plus adapté pour les intersections et les autoroutes non homogènes [Daganzo 99]. En outre, pour faire face à des autoroutes comprenant certains sous-réseaux, le Linked Node CTM propose une approche de modélisation qui représente les segments de l'autoroute par des liens et les jonctions de réseau par des nœuds [Muralidharan 09]. Pour une meilleure description des phénomènes de circulation complexes, d'autres extensions de CTM peuvent être utilisées, telles que Location Specific CTM, qui définit diverses formes des diagrammes fondamentaux [Chen 10] et tient compte de certaines variables spécifiques telles que la localisation des capteurs et les caractéristiques géométriques. Une autre version modifiée de CTM, Interval Compositional CTM propose d'analyser la dynamique de la vitesse en prenant en compte un modèle macroscopique de second ordre sur la base des approches d'intervalle [Gning 11].

Enfin, le SMM a été proposé dans [Muñoz 06] ; il considère un diagramme fondamental (DF) d'une forme triangulaire et commute entre cinq ensembles d'équations différentielles linéaires en fonction de l'état des deux cellules adjacentes et de la valeur des données principales. Récemment, diverses versions de SMM modifiées sont

proposées. Dans ce contexte, les auteurs de [Lemarchand 10] utilisent une forme DF trapézoïdale avec des incertitudes sur ses paramètres. Une autre stratégie de modélisation est appliquée sur le SMM dans [Canudas-De-Wit 12, Morbidi 14], grâce à l'utilisation de graphiques des contraintes et la mise en place des régions représentant les différents modes de fonctionnement du système. nt des données réelles du trafic. La procédure de calibrage présente l'objectif de spécifier et d'estimer les paramètres macroscopique du modèle de trafic d'une manière appropriée, de sorte que la représentation des caractéristiques du flux de trafic soit aussi précise que la structure du modèle obtenu. Ainsi, Le calibrage des données de trafic ou l'identification du DF est une étape nécessaire pour chaque modèle macroscopique [Gomes 09] permettant de donner les paramètres de la relation débit-densité (ou DF), qui sont : la vitesse d'écoulement libre, la densité critique, la vitesse de l'onde de congestion, le débit maximum et la densité maximum.

Dans la littérature, peu de travaux sur le calibrage des modèles macroscopiques de trafic, les méthodes existants ont été proposée afin de résoudre le problème d'estimation des paramètres macroscopiques (ou le diagramme fondamental) de trafic. Notamment, des méthodes stochastique et déterministe sont été aussi proposés dans la littérature sur le calibrage, telles que la méthode des moindres carrés [Grewal 76], les méthodes stochastiques trial-and-error [Michalopoulos 93, Helbing 96], l'algorithme génétique stochastique [Poole 12], l'algorithme complexe déterministe de Box [Box 65, Kotsialos 02, Monamy 12] et l'algorithme déterministe de Nelder-Mead [Nelder 65, Ngoduy 04, Spiliopoulou 14]. Pour plus de détail le lecteur est invité au [Spiliopoulou 15].

L'approche des moindres carrés a prouvée leur efficacité dans le calibrage des diagrammes fondamentaux, spécialement pour les modèles CTM [Zhong 16]. Elle est introduite dans la formalisation des méthodes automatiques de calibrage telles que la méthode semi-automatisée [Dervisoglu 12] et la méthode automatisée [Chen 04, Bar-Gera 10].

Dans cette partie, nous intéressons à formaliser le problème d'estimation des paramètres de trafic en utilisant la méthode des moindres carrés, dans laquelle nous nous proposons un nouveau algorithme pour l'estimation des paramètres de diagramme fondamental d'une forme triangulaire qui s'adapte au modèle proposé. Les résultats de cet algorithme seront utilisés pour la validation du modèle proposé.

2.4.1 Description géométrique et données de trafic

2.4.1.1 Description géométrique

La première étape de l'étalonnage est la représentation du réseau sous forme de cellules successives. Le réseau d'autoroute est divisé en cellules, chacune comportant au plus une station de détection de véhicules (VDS), une rampe d'accès et une rampe de sortie. La longueur des cellules doit respecter la condition Courant- Friedrichs-Lewy ($\Delta t < \frac{\Delta x_i}{v_{f_i}}$, avec v_{f_i} est la vitesse libre de la cellule i , Δt est le pas de temps de simulation et Δx_i est la longueur de la cellule), de telle sorte qu'aucune véhicule n'est perdu lors de la simulation. Chaque cellule est homogène en termes de nombre de voies, de qualité et des caractéristiques géométriques de telle façon que chaque cellule peut être représentée par un seul diagramme fondamental. Ces diagrammes fondamentaux sont ensuite calibrés sur les données fournies par les VDSs de chaque cellule.

2.4.1.2 Données de trafic

Dans cette partie, nous exploitons l'abondance des données réelles fournies par la base de données PeMS (Performance Measurement System). Nous utilisons les données brutes obtenues du VDSs avec une période d'échantillonnage de cinq minutes recueillies pour une période de 98 jours (équivalent à 28225 points de données) afin de couvrir l'état de la circulation congestionnée. Pour plus de précision, nous considérons que chaque cellule a sa propre DF et nous supposons que les détecteurs sont fiables (99% de la fonctionnalité au cours de cette période). Les débits et les vitesses ont été fournis par VDS et les densités ont été estimées par l'équation suivante [Zeroual 15, Zeroual 17] :

$$Densité = \frac{Flux}{Vitesse} \quad (2.30)$$

2.4.2 Méthodologie de calibrage et estimation des paramètres de trafic

Pour la méthodologie de calibrage, nous avons développé un nouvel algorithme (Algorithme 1) en basant sur l'approche des moindres carrés dont l'objectif est d'identifier la forme triangulaire du DF [Zeroual 17].

Algorithme 2.1 Méthodologie de calibrage

— **Requis**

Les débits, Les densités

— **Assure**

- a) Trouver la valeur maximale du flux : $\bar{Q}_{max} = \max(q_i)$.
- b) Déterminer la valeur de densité correspondant à \bar{Q}_{max} et séparer les données du scatter-plot en deux régions approximatives (fluides et congestionnées).
- c) Appliquer les moindres carrés de premier ordre sur chaque région.
- d) Border les régions de la ligne des moindres carrés par deux lignes de régression parallèles sur les limites supérieure et inférieure, afin de limiter et de contrôler la direction de cette zone d'évolution.
- e) Identifier la densité critique ρ_c par la projection du point correspondant situé dans le point d'intersection entre la limite supérieure de la zone de congestion et la ligne horizontale de la valeur \bar{Q}_{max} .
- f) Approximer le débit maximal moyen Q_M , par la moyenne des valeurs de débit correspondant à la densité critique avec une approximation désirée.
- g) Ajuster les deux lignes des moindres carrés (congestionné et fluide) jusqu'à ce qu'ils traversent le débit maximal moyen.
- h) Identifier la vitesse d'écoulement libre v_f (valeur de la pente de la ligne de régression d'écoulement libre), la vitesse de l'onde congestionnée w (valeur de la pente de la ligne de régression congestionnée) et la densité maximale ρ_{jam} (le point d'intersection de la ligne de congestion et l'axe des densités).

Comme un exemple illustratif, l'algorithme proposé est appliqué sur des données de trafic du VDS 809968. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures qui correspondent respectivement aux étapes (a-c), étape (d), étape (e) et étapes (f-h).

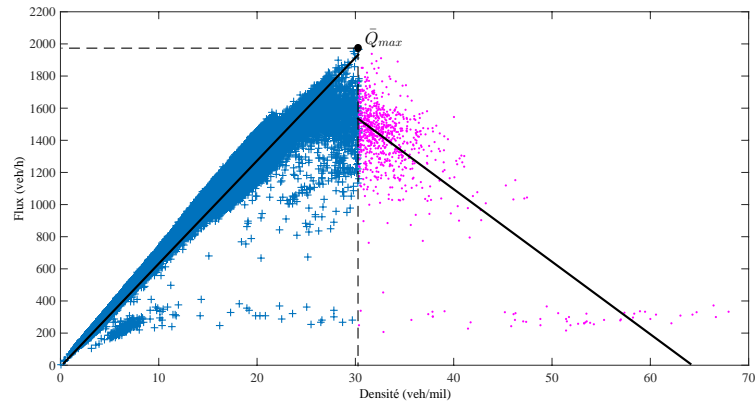


FIGURE 2.7 – Identification du flux maximal

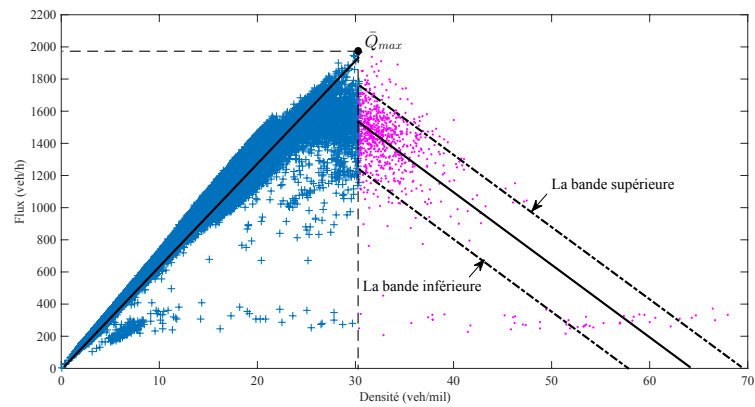


FIGURE 2.8 – Limitation des données congestionnées

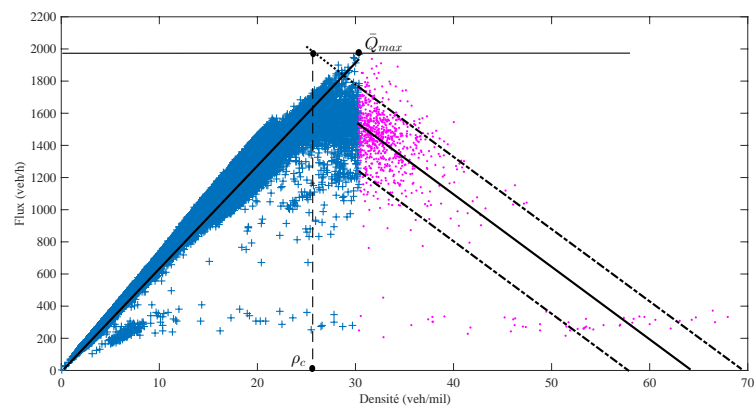


FIGURE 2.9 – Identification de densité critique

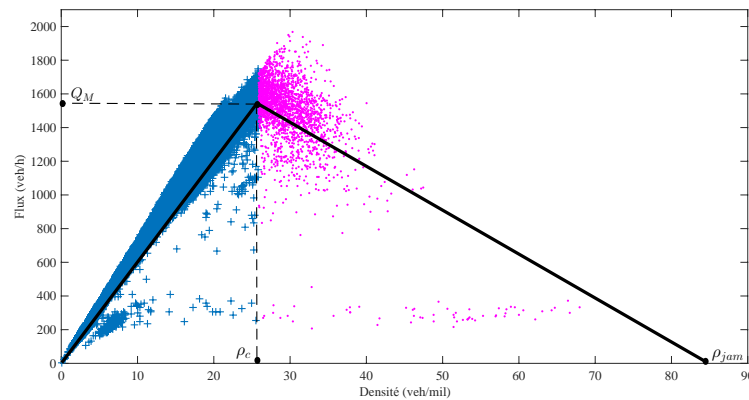


FIGURE 2.10 – Identification de Q_m , v_f , w , ρ_{jam}

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu global sur les systèmes hybrides suivi des différentes classes existantes dans la littérature. Ensuite en se basant sur le CTM et le SMM, nous avons présenté une brève analyse d'un modèle hybride de trafic sous un formalisme générale avec ses paramètres de sélections pour chaque mode. Enfin, nous avons proposé une méthodologie de calibrage à travers un algorithme bien défini pour l'identification des paramètres macroscopique du modèle proposé. Un exemple d'application sur des données réelles est illustré pour valider cette démarche.

Chapitre 3

Synthèse d'un observateur hybride pour l'estimation des données de trafic

3.1 Introduction et problématique

Aujourd'hui, les progrès technologiques dans les smartphones, les systèmes de navigation et d'autres dispositifs facilitent de suivre la position telle que le GPS (Global Positioning System) et permettent une estimation précise de certaines variables de la circulation. Cependant, l'implémentation de ces algorithmes d'estimation a besoin de la disponibilité des données Floating Car, en outre, elle exige l'accord d'un grand nombre de conducteurs pour transmettre leurs données. D'autre part, les boucles d'induction classiques qui sont déployées dans certaines sections de la route fournissent des mesures fiables, mais ils nécessitent des investissements massifs. Pour cette raison, l'amélioration des approches permettant d'obtenir les variables de trafic en utilisant le minimum des boucles d'induction est particulièrement intéressante, car elle est relativement "pas chère" et n'a pas besoin ni de l'accord des conducteurs ni d'autres équipements supplémentaires.

Par conséquent, plusieurs approches sont proposées dans la littérature pour le traitement du problème d'estimation des paramètres de trafic. Les filtres de Kalman, une des approches utilisées dans ce contexte, dans laquelle une large variété des extensions est proposée pour répondre au problème tels que le filtre de Kalman étendu [Wang 05, Wang 08], Kalman unscented filter [Mihaylova 06], le filtre de Kalman de particules [Mihaylova 07], le filtre de Kalman étendu localisé [Van Hinsbergen 12] et d'autres versions et extensions qui sont mise en évidence dans [Work 10, Nantes 16]. Alternativement, une autre stratégie d'estimation est proposée dans [Hidayat 10], en introduisant les notions de logique floue pour l'estimation du trafic. Ceci repose sur la transformation du modèle METANET du trafic au modèle de Takagi-Sugeno (TS) et l'application d'une méthode de conception d'observateur systématique pour l'estimation de l'état. Les observateurs à base du modèle est une autre approche d'estimation appliquée dans le trafic. Cette approche proposée dans [Morarescu 11] utilise l'observateur classique de Luenberger en se basant sur la version modifiée du modèle de transmission cellulaire, SMM.

Dans ce chapitre, nous traitons la synthèse d'observateurs hybrides pour l'estimation des données de trafic en s'appuyant sur le modèle de PWSL proposé dans le chapitre précédent. Dans un premier temps, nous présentons l'étude d'observabilité du modèle pour un tronçon avec un nombre de cellules donné, ensuite nous pro-

posons l'étude générale d'observabilité pour le modèle général de PWSL. En outre, nous exposons la structure de l'observateur permettant d'estimer à la fois l'état continu et le mode actif du PWSL. Enfin, nous considérons la synthèse d'observateur, dans laquelle nous présentons les stratégies d'estimation pour l'estimateur continu et discret.

3.2 Étude de l'observabilité du PWSL

Dans le contexte des systèmes dynamiques, l'observabilité est une propriété fondamentale dans la théorie de la réalisation, l'estimation d'état, la conception du contrôleur et même le diagnostic et la surveillance des défauts. D'une façon générale, l'observabilité concerne l'extraction d'informations sur les variables internes (les variables d'états) du système en utilisant les signaux externes constitués de mesures de sortie et les entrées [Petreczky 15]. Les premiers travaux concernant l'observabilité sont introduits dans [Ezzine 89] par l'étude de l'observabilité et de contrôlabilité d'une classe des systèmes linéaires à commutation. Pour les systèmes linéaires par morceaux, la première analyse d'observabilité de cette classe est effectuée dans [Sontag 81]. Depuis ces travaux, l'observabilité des systèmes hybrides s'étend aux autres classes particulières de SDH [Birouche 06].

Dans le domaine du trafic, les premiers travaux concernant l'observabilité sont introduits dans [Munoz 04], où les auteurs ont étudié l'observabilité et la contrôlabilité de la version modifiée du CTM qui est le modèle de SMM. Dans cette partie, en se basant sur l'étude de l'observabilité de [Munoz 04], nous présentons une analyse d'observabilité du modèle PWSL proposé dans le chapitre 2 de cette thèse, pour objectif de traiter l'estimation des données de trafic. Pour simplifier l'analyse, en premier temps, nous analysons l'observabilité d'un tronçon autoroutier de quatre cellules. Ensuite, nous généralisons l'analyse pour le cas du modèle général proposé dans cette thèse.

3.2.1 Observabilité des systèmes linéaires

Pour simplifier la présentation des notions générales d'observabilité, nous exposons, tout d'abord, l'observabilité des systèmes linéaires dynamiques non hybrides. Par conséquent, comme le modèle de PWSL est un système dynamique hybride en temps discret, dans cette partie nous nous intéressons aux systèmes dynamiques en

temps discret.

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu \\ y(k+1) = Cx(k) \end{cases} \quad (3.1)$$

avec x le vecteur d'état, u le vecteur d'entrée et y le vecteur de sortie. Le système (3.1) est dit observable si et seulement si, la connaissance des signaux externes (u, y) implique la connaissance du signal interne x . Autrement dit, si (x^1, u^1, y^1) et (x^2, u^2, y^2) sont deux solutions du système (3.1) et $(u^1, y^1) = (u^2, y^2)$, il doit alors suivre que $x_1 = x_2$. En outre, la connaissance de $x(k_0)$ pour tout $k_0 \in \mathbb{N}$ implique la connaissance de l'état x , donc l'observabilité d'un système dynamique peut être traduite par la question : « est-ce qu'il est possible de reconstruire la valeur initiale $x(0)$ par la connaissance de u et y ? » [Petreczky 15].

En raison de la linéarité, il est facile de voir que l'observabilité du système (3.1) ne dépend pas de l'entrée u . Par conséquent, la matrice B ne présente aucun rôle avec l'observabilité du système et la question d'observabilité peut être réduite au question : « $y \equiv 0$ implique $x \equiv 0$? ». En prenant des dérivés de la sortie, il est facile de voir que :

$$y \equiv 0 \Leftrightarrow y^{(i)}(0) = 0 \quad \forall i \in \mathbb{N} \Leftrightarrow x(0) \in \ker O_{(A,c)}$$

avec $O_{(A,c)} = \begin{bmatrix} c & cA & \dots & cA^{n-1} \end{bmatrix}^T$ est la matrice d'observabilité de Kalman. Notamment, le système (3.1) est observable si et seulement si, $\ker(O_{(A,c)}) = \{0\}$ c.à.d le rang de la matrice d'observabilité est de rang plein.

$$\text{rang}(O_{(A,c)}) = \dim(x)$$

Lorsqu'on considère l'observabilité des systèmes à commutations, tout d'abord, il est évident que l'observabilité locale et globale ne doit plus coïncider. Par ailleurs, en présence de sauts, il n'est pas vrai en général que la connaissance de $x(0)$ implique la connaissance de x sur l'axe du temps entier.

Nous considérons le système à commutation suivant :

$$\begin{cases} x(k+1) = A_s x(k) + B_s u \\ y(k+1) = c_s x(k) \end{cases} \quad (3.2)$$

avec $s = \{1, 2, \dots, N\}$ est l'indice de modes. Les notions d'observabilité pour un

système linéaire à commutation sont exprimées par :

Définition 3.1. [Tanwani 13, Petreczky 15] Considérons le système à commutation (3.2) .

- Le système (3.2) est dit fortement observable si et seulement si, pour toutes les solutions $(\sigma^1, x^1, u^1, y^1)$, $(\sigma^2, x^2, u^2, y^2)$, l'implication suivante est vérifiée :

$$(\sigma^1, x^1, u^1, y^1) \equiv (\sigma^2, x^2, u^2, y^2) \Rightarrow x^1 \equiv x^2 \quad (3.3)$$

- Le système (3.2) est dit observable pour le signal de commutation σ si et seulement si l'implication (3.3) est valable pour toutes les solutions avec $\sigma \equiv \sigma^1 \equiv \sigma^2$.

Il est clair que la forte observabilité de (3.2) implique l'observabilité pour chaque signal de commutation individuel. En particulier, il implique l'observabilité de chaque mode. On remarque que l'observabilité de chaque mode implique également une forte observabilité du système hybride à commutation. On obtient donc l'équivalence suivante : (3.2) est fortement observable si, et seulement si, chaque mode est observable dans le sens classique. Pour cette raison, la forte observabilité n'est pas un concept intéressant pour les systèmes à commutations [Petreczky 15].

Les conditions établies pour l'observabilité du système (3.2) seront résumées sous forme de tests de rang de matrices similaires à celle correspondant au cas des systèmes linéaires. Dans la partie suivante, nous appliquons les notions d'observabilité des systèmes à commutations pour l'analyse d'observabilité du système PWSL proposé dans le chapitre précédent. Pour faciliter l'analyse, nous commençons tout d'abord par l'étude d'observabilité du modèle PWSL pour un tronçon de quatre cellules.

3.2.2 Étude d'observabilité du modèle PWSL pour un tronçon de quatre cellule

Dans cette partie, nous présentons les résultats d'observabilité du système PWLS à travers le test de rang de la matrice d'observabilité pour chaque mode. Pour simplifier l'étude, on considère un tronçon autoroutier de quatre cellules. Comme

illustré précédemment dans le chapitre 2, le modèle PWLS est présenté par la forme générale suivante :

$$\rho(k+1) = A_s \rho(k) + B_s u(k) + D_s \begin{bmatrix} \rho_j \\ Q_M \end{bmatrix}$$

$$D_s = \begin{bmatrix} B_{jam,s} & 0 \\ 0 & B_{Q,s} \end{bmatrix}$$

Pour un tronçon de quatre cellules, nous obtenons huit modes ($s = 1, \dots, 8$). L'état du système représente la densité des cellules $\rho(k) = [\rho_1(k) \ \rho_2(k) \ \rho_3(k) \ \rho_4(k)]$ et l'entrée est $u(k) = [q_{in}, q_{ON}, q_{out}]^T$. La sortie de système est donnée comme suite :

$$y = c\rho(k)$$

$$\text{avec } c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Dans ce cas, en se basant sur la forme générale du modèle PWLS et la configuration de chaque mode à travers les paramètres de sélection, nous présentons la représentation d'état du modèle PWLS pour quatre cellules :

Mode 1 : ($s = 1$)

$$A_1 = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_1} v_{f,1}\right) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\Delta T}{\Delta x_2} v_{f,1} & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_2} v_{f,2}\right) & 0 & 0 \\ 0 & (1 - \beta_2) \frac{\Delta T}{\Delta x_3} v_{f,2} & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_3} v_{f,3}\right) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta T}{\Delta x_4} v_{f,3} & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_4} v_{f,4}\right) \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{\Delta T}{\Delta x_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_3 \frac{\Delta T}{\Delta x_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{jam,1} = B_{Q,1} = 0_{4 \times 4}.$$

Mode 2 : ($s = 2$)

$$A_2 = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_1} v_{f,1}\right) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\Delta T}{\Delta x_2} v_{f,1} & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_2} v_{f,2}\right) & 0 & 0 \\ 0 & (1 - \beta_2) \frac{\Delta T}{\Delta x_3} v_{f,2} & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_3} v_{f,3}\right) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta T}{\Delta x_4} v_{f,3} & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} \frac{\Delta T}{\Delta x_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_3 \frac{\Delta T}{\Delta x_3} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\Delta T}{\Delta x_4} \end{bmatrix}, B_{jam,2} = B_{Q,2} = 0_{4 \times 4}.$$

Mode 3 : ($s = 3$)

$$A_3 = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_1} v_{f,1}\right) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\Delta T}{\Delta x_2} v_{f,1} & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_2} v_{f,2}\right) & 0 & 0 \\ 0 & (1 - \beta_2) \frac{\Delta T}{\Delta x_3} v_{f,2} & 1 & \frac{\Delta T}{\Delta x_3} w_4 \\ 0 & 0 & 0 & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_4} w_4\right) \end{bmatrix},$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} \frac{\Delta T}{\Delta x_1} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_3 \frac{\Delta T}{\Delta x_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\Delta T}{\Delta x_4} \end{bmatrix}, B_{jam,3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\Delta T}{\Delta x_3} w_4 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\Delta T}{\Delta x_4} w_4 \end{bmatrix},$$

$$B_{Q,3} = 0_{4 \times 4}.$$

Mode 4 : ($s = 4$)

$$A_4 = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_1} v_{f,1}\right) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\Delta T}{\Delta x_2} v_{f,1} & 1 & \frac{1}{(1-\beta_2)} \frac{\Delta T}{\Delta x_2} w_3 & 0 \\ 0 & 0 & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_3} w_3\right) & \frac{\Delta T}{\Delta x_3} w_4 \\ 0 & 0 & 0 & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_4} w_4\right) \end{bmatrix},$$

$$B_4 = \begin{bmatrix} \frac{\Delta T}{\Delta x_1} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_3 \frac{\Delta T}{\Delta x_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\Delta T}{\Delta x_4} \end{bmatrix}, B_{jam,4} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{(1-\beta_2)} \frac{\Delta T}{\Delta x_2} w_3 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta T}{\Delta x_3} w_3 & -\frac{\Delta T}{\Delta x_3} w_4 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\Delta T}{\Delta x_4} w_4 \end{bmatrix},$$

$$B_{Q,4} = 0_{4 \times 4}.$$

Mode 5 : ($s = 5$)

$$A_5 = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_1} v_{f,1}\right) & \frac{\Delta T}{\Delta x_1} w_2 & 0 & 0 \\ 0 & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_2} w_2\right) & \frac{1}{(1-\beta_2)} \frac{\Delta T}{\Delta x_2} w_3 & 0 \\ 0 & 0 & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_3} w_3\right) & \frac{\Delta T}{\Delta x_3} w_4 \\ 0 & 0 & 0 & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_4} w_4\right) \end{bmatrix},$$

$$B_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_3 \frac{\Delta T}{\Delta x_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\Delta T}{\Delta x_4} \end{bmatrix}, B_{jam,5} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta T}{\Delta x_1} w_1 & -\frac{\Delta T}{\Delta x_1} w_2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\Delta T}{\Delta x_2} w_2 & -\frac{1}{(1-\beta_2)} \frac{\Delta T}{\Delta x_2} w_3 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta T}{\Delta x_3} w_3 & -\frac{\Delta T}{\Delta x_3} w_4 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\Delta T}{\Delta x_4} w_4 \end{bmatrix},$$

$$B_{Q,5} = 0_{4 \times 4}.$$

Mode 6 : ($s = 6$)

$$A_6 = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_1} v_{f,1}\right) & \frac{\Delta T}{\Delta x_1} w_2 & 0 & 0 \\ 0 & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_2} w_2\right) & \frac{1}{(1-\beta_2)} \frac{\Delta T}{\Delta x_2} w_3 & 0 \\ 0 & 0 & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_3} w_3\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_4} v_{f,4}\right) \end{bmatrix},$$

$$B_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_3 \frac{\Delta T}{\Delta x_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_{jam,6} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta T}{\Delta x_1} w_1 & -\frac{\Delta T}{\Delta x_1} w_2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\Delta T}{\Delta x_2} w_2 & -\frac{1}{(1-\beta_2)} \frac{\Delta T}{\Delta x_2} w_3 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta T}{\Delta x_3} w_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{Q,6} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\Delta T}{\Delta x_3} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\Delta T}{\Delta x_4} \end{bmatrix}.$$

Mode 7 : ($s = 7$)

$$A_7 = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_1} v_{f,1}\right) & \frac{\Delta T}{\Delta x_1} w_2 & 0 & 0 \\ 0 & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_2} w_2\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_3} v_{f,3}\right) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta T}{\Delta x_4} v_{f,3} & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_4} v_{f,4}\right) \end{bmatrix},$$

$$B_7 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_3 \frac{\Delta T}{\Delta x_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_{jam,7} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta T}{\Delta x_1} w_1 & -\frac{\Delta T}{\Delta x_1} w_2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\Delta T}{\Delta x_2} w_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{Q,7} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{(1-\beta_2)} \frac{\Delta T}{\Delta x_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta T}{\Delta x_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Mode 8 : ($s = 8$)

$$A_8 = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_1} w_1\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_2} v_{f,2}\right) & 0 & 0 \\ 0 & (1 - \beta_2) \frac{\Delta T}{\Delta x_3} v_{f,2} & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_3} v_{f,3}\right) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta T}{\Delta x_4} v_{f,3} & \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta x_4} v_{f,4}\right) \end{bmatrix},$$

$$B_8 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_3 \frac{\Delta T}{\Delta x_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{jam,8} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta T}{\Delta x_1} w_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{Q,8} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\Delta T}{\Delta x_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\Delta T}{\Delta x_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Après le calcul de la matrice d'observabilité pour chaque mode et la vérification du rang de chaque matrice d'observabilité nous obtenons les résultats du tableau 3.1.

TABLE 3.1 – Résultats d'observabilité du modèle PWSL pour un tronçon de 4 cellules

Mode s	rang de la matrice O_s	Observabilité de sous-système de mode s
1	$\text{rang}(O_1) = 4$	Observable
2	$\text{rang}(O_2) = 4$	Observable
3	$\text{rang}(O_3) = 2$	Non observable
4	$\text{rang}(O_4) = 2$	Non observable
5	$\text{rang}(O_5) = 4$	Observable
6	$\text{rang}(O_6) = 4$	Observable
7	$\text{rang}(O_7) = 4$	Observable
8	$\text{rang}(O_8) = 4$	Observable

3.2.3 Résultats d'observabilité du modèle de PWSL général

D'une façon générale, lorsque la section de la route est fluide les informations se propagent vers l'aval avec une vitesse d'écoulement libre v_f , dans lequel l'état du trafic est capable d'être estimé par la mesure en aval. Cependant, lorsque la section de la route est congestionnée l'information se propage en amont avec une vitesse d'onde de congestion w , dans ce cas, l'état du trafic peut être estimé par la mesure en amont. Toutefois, dans le cas de l'état d'écoulement libre des cellules amont et congestionné des cellules en aval de la route, l'état du trafic ne peut être estimé ni de la mesure en amont, ni en aval. Par contre, dans le cas où l'état des cellules en amont est congestionné et les cellules en aval est fluide, l'état du trafic est observable en utilisant les mesures à la fois en amont et en aval. Le tableau 3.2 résume les résultats d'observabilité pour chaque mode du modèle PWSL général.

TABLE 3.2 – Étude générale d'observabilité du modèle PWSL

Modes	État de sous systèmes	Observabilité
1	$FF \dots FFF$	Observable en aval
2	$FF \dots FFC$	
3	$FF \dots FCC$	Non observable
\vdots	\vdots	
N	$FC \dots CCC$	
$N + 1$	$CC \dots CCC$	Observable en amont
$N + 2$	$CC \dots CCF$	Observable amont et aval
\vdots	\vdots	
$2N$	$CF \dots FFF$	

3.3 Description du principe d'observateurs hybrides

Les observateurs sont développés pour estimer le vecteur d'état des systèmes et reconstruire leurs sorties à partir de l'état estimé. Toutefois, les observateurs hybrides sont destinés pour estimer l'état continu et l'état discret du système dynamique hybride. Dans ce contexte, une large variété d'approches d'estimation, considère la synthèse d'observateur hybride, a été proposée dans la littérature ([Balluchi 02]; [Juloski 03]; [Kratz 03]; [Di Benedetto 05]; [Pettersson 05]; [Xu 07]; [Barbot 07]; [Ibrir 09]; [li Li 11]) [Belkhiat 11].

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'estimation des données de trafic à travers un observateur hybride en utilisant l'abondance des approches existantes dans la littérature.

i. Méthodologie de conception

Un observateur hybride est lui-même un système hybride et la méthodologie de sa conception se compose de deux parties (figure 3.1) :

- **Observateur discret** : après un nombre fini d'étapes, l'observateur discret identifie la séquence du mode de fonctionnement saisi par le système hybride en utilisant les informations de sortie discrètes et, si nécessaire, en traitant les entrées et sorties continues par l'utilisation des transitions et des conditions de commutation des modes de fonctions.
- **Observateur continu** : qui associe à chaque mode de fonctionnement une dynamique continue et à chaque transition un plan de réinitialisation, de telle manière que l'évolution continue du système hybride résultant converge exponentiellement à celle du système hybride.

ii. Principe de fonctionnement

Comme représenté dans la figure 3.1, la structure générale de l'observateur proposé pour l'estimation des données de trafic est composée d'un observateur discret et un observateur continu. Selon cette structure, l'observateur discret reçoit en entrée les sorties du système. Sa tâche consiste à fournir le \hat{s} estimé de mode de fonctionnement s de la plante hybride (système hybride) en temps actuel. La tâche de l'observateur continu consiste à construire une estimation $\hat{\rho}(k)$ de l'état continu de la plante qui converge exponentiellement vers $\rho(k)$. L'entrée continue u et la sortie continue y sont utilisées par l'observateur continu à cet effet. Considérons la structure de l'observateur hybride, associé au PWSL donnée par :

$$\hat{\rho}(k+1) = A_s \hat{\rho}(k) + B_s u(k) + D_s \begin{bmatrix} Q_M \\ \rho_{jam} \end{bmatrix} + L_{\hat{s}} (y(k) - c \hat{\rho}(k)) \quad (3.4)$$

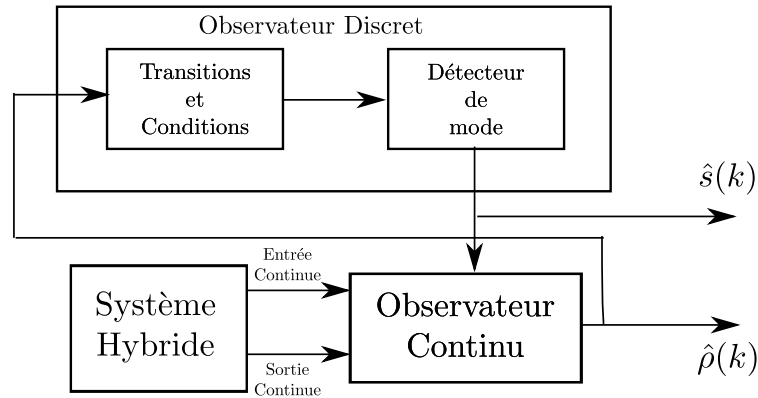


FIGURE 3.1 – Structure d'observateur hybride du trafic

où $L_{\hat{s}}$ est le gain d'observateur et $\hat{\rho}$ est le vecteur estimé des densités.

3.4 Synthèse d'un observateur pour le PWSL

La synthèse d'observateurs des systèmes hybrides consiste à analyser et gérer la convergence de l'état estimé vers l'état réel ceci est traduit par l'erreur de l'estimation. Par conséquent, il s'agit de calculer les gains $L_{\hat{s}}$ associés à chaque sous-système qui garantit la convergence de l'état estimé $\hat{\rho}(k)$ vers l'état réel $\rho(k)$ du système de trafic quelles que soient les conditions initiales. Ainsi, les gains trouvés garantissent la convergence globale de l'erreur d'estimation, et stabilisent les matrices $(A_{\hat{s}} - L_{\hat{s}}c)$. Dans cette partie, nous présentons, tout d'abord, la structure d'observateur discret où nous présentons la méthodologie d'estimation de la l'état du trafic. Ensuite, nous considérons la structure d'observateur continu, dans laquelle, nous étudions la convergence de l'erreur d'estimation pour notre système. Nous supposons les hypothèses de travail suivantes :

- a) Les couples (A_s, c) sont observables.
- b) Les transitions entre les différents modes du système sont observables.

3.4.1 Estimation et reconstruction de l'état discret du trafic

L'observateur discret est conçu pour estimer le mode discret de la loi de commutation. Rappelons que l'état de trafic de chaque sous-système est donné par la valeur

de densité estimée autour de la densité critique pour chaque cellule.

Les modes estimés \hat{s} sont définis par la valeur du vecteur M , avec $M = [M_1 M_2 \cdots M_N]$. La valeur de chaque $M_{i,i=1,\dots,N}$ est exprimée par les conditions suivantes :

- Si $\hat{\rho}_i < \rho_{c,i}$ alors $M_i = 0$
- Sinon $M_i = 1$.

où 0 signifie l'état fluide F et 1 signifie l'état congestionné c . Le mode estimé \hat{s} est reconstitué à travers le tableau 3.3.

TABLE 3.3 – Stratégie de la partie discrète

\hat{s}	M	état du sous-système
1	00...000	$FF \cdots FFF$
2	00...001	$FF \cdots FFC$
3	00...011	$FF \cdots FCC$
\vdots	\vdots	\vdots
N	01...111	$FC \cdots CCC$
$N + 1$	11...111	$CC \cdots CCC$
$N + 2$	11...110	$CC \cdots CCF$
\vdots	\vdots	\vdots
$2N$	10...000	$CF \cdots FFF$

3.4.2 Estimation de la dynamique de la densité (l'état continu)

La connaissance du mode discret facilite la synthèse d'observateur continu. Le problème de synthèse d'observateur s'articule dans la conception des conditions de stabilité d'erreur d'estimation sous l'existence du phénomène de commutation. D'une façon générale, dans la plupart des approches d'estimation, l'existence d'une fonction de Lyapunov commune garantit la convergence asymptotique de l'erreur d'estimation ([Alessandri 01]; [Juloski 03]). Autrement dit la recherche d'une fonction de Lyapunov unique. Cela propose un problème de conservatisme et pour remédier à ce problème, une autre solution alternative est de trouver une fonction de Lyapunov Multiple ([Pettersson 05]; [Hamdi 09]; [Belkhiat 11]). Du fait de la nature du système qui est un système hybride à commutation par morceaux, nous introduisons

un type de fonction de Lyapunov multiple, dite fonction de Lyapunov par morceaux [Lin 09] afin de garantir la stabilité de la dynamique de l'erreur.

La dynamique de l'erreur d'estimation est donnée par :

$$e(k+1) = [A_s - L_s c] e(k) \quad (3.5)$$

$$e(k) = \rho(k) - \hat{\rho}(k) \quad (3.6)$$

La stabilité asymptotique de l'erreur d'estimation est définie par le théorème suivant :

Théorème 3.1. *Le système (3.5) est asymptotiquement stable s'il existe une fonction quadratique $V(k, e(k))$ tel que :*

1 - $V(k, e(k))$ est une fonction définie positive décroissante

$$V(k, e(k)) = e(k)^T P_i e(k) > 0 \quad \forall i \in \mathfrak{J}$$

avec P_1, \dots, P_{2N} sont des matrices symétriques définies positives.

2 - La variation $\Delta V(k, e(k))$ est définie négative au long des solutions du système (3.4)

$$\Delta V(k, e(k)) = V(k+1, e(k+1)) - V(k, e(k)) < 0$$

La dynamique de l'erreur d'estimation présente le même comportement que celui d'un système à commutation.

Pour garantir la stabilité asymptotique de la dynamique d'erreur d'estimation, la fonction piecewise Lyapunov doit être établie à partir de la résolution de la matrice linéaire d'inégalité (LMI). Le théorème 3.2 présente la condition nécessaire et suffisante pour l'existence d'une fonction de Lyapunov piecewise pour le système.

Théorème 3.2. *La stabilité asymptotique globale de la dynamique d'erreur d'estimation d'état est assurée s'il :*

1 - Existe une fonction quadratique de Lyapunov $V(k, e(k))$ d'une variation $\Delta V(k, e(k))$ négative.

2 - Existe $2N$ matrices symétriques G_1, \dots, G_{2N} et $2N$ matrices S_1, \dots, S_{2N} satisfaisant :

$$\begin{bmatrix} S_i - G_i - G_i^T & G_i^T A_i^T - c^T U_i^T \\ A_i G_i - U_i c & -S_j \end{bmatrix} < 0 \quad \forall (i, j) \in \mathcal{I} \times \mathcal{I}$$

avec $G = P^{-1}$ et $U_i c = L_i c G_i$.

Démonstration. Nous considérons qu'il existe une fonction de Lyapunov $V(k, e(k))$, où sa variation $\Delta V(k, e(k))$ est négative, pour laquelle :

$$\begin{aligned} \Delta V(k, e(k)) &= V(k+1, e(k+1)) - V(k, e(k)) \\ &= e(k+1)^T P_j e(k+1) - e(k)^T P_i e(k) \\ &= ([A_s - L_s c] e(k))^T P_j ([A_s - L_s c] e(k)) - e(k)^T P_i e(k) \\ &= e(k)^T [A_s - L_s c]^T P_j [A_s - L_s c] e(k) - e(k)^T P_i e(k) \\ &= e(k)^T ([A_s - L_s c]^T P_j [A_s - L_s c] - P_i) e(k) < 0 \end{aligned}$$

D'où :

$$[A_s - L_s c]^T P_j [A_s - L_s c] - P_i < 0$$

$$[A_s - L_s c]^T P_j [A_s - L_s c] - P_i = [A_s - L_s c]^T P_j P_j^{-1} P_j [A_s - L_s c] - P_i < 0 \quad (3.7)$$

avec l'application de la formule du complément de Schur sur (3.7), on obtient l'inégalité suivante :

$$\begin{bmatrix} -P_i & [A_s - L_s c]^T P_j \\ P_j [A_s - L_s c] & -P_j \end{bmatrix} < 0 \quad (3.8)$$

mettant que $S = P^{-1}$, nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} -S_i^{-1} & [A_s - L_s c]^T S_j^{-1} \\ S_j^{-1} [A_s - L_s c] & -S_j^{-1} \end{bmatrix} < 0$$

ce qui est équivalent à :

$$\begin{bmatrix} -G_i^T S_i^{-1} G_i & G_i^T [A_s - L_s c]^T \\ [A_s - L_s c] G_i & -S_j \end{bmatrix} < 0 \quad (3.9)$$

Avec G_1, \dots, G_{2N} sont des matrices de taille $N \times N$, nous obtenons l'inégalité (3.9) par la multiplication matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} -G_i^T S_i^{-1} G_i & G_i^T [A_s - L_s c]^T \\ [A_s - L_s c] G_i & -S_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_i^T & 0 \\ 0 & S_j \end{bmatrix} \times \\ \begin{bmatrix} -S_i^{-1} & [A_s - L_s c]^T S_j^{-1} \\ S_j^{-1} [A_s - L_s c] & -S_j^{-1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} G_i & 0 \\ 0 & S_j \end{bmatrix}$$

D'autre part, nous avons : $S_i^T S_i^{-1} S_i > 0$, qui est équivalent à :

$$\begin{aligned} (S_i - G_i)^T S_i^{-1} (S_i - G_i) &> 0 \\ \Rightarrow S_i^T S_i^{-1} (S_i - G_i) - G_i^T S_i^{-1} (S_i - G_i) &> 0 \\ \Rightarrow S_i^T S_i^{-1} S_i - S_i^T S_i^{-1} G_i - G_i^T S_i^{-1} S_i + G_i^T S_i^{-1} G_i &> 0 \\ \Rightarrow S_i - G_i - G_i^T + G_i^T S_i^{-1} G_i &> 0 \\ \Rightarrow S_i - G_i - G_i^T &> -G_i^T S_i^{-1} G_i \end{aligned}$$

En remplaçant ce dernier dans l'inégalité (3.9) nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} S_i - G_i - G_i^T & G_i^T [A_s - L_s c]^T \\ [A_s - L_s c] G_i & -S_j \end{bmatrix} < 0 \\ \\ \begin{bmatrix} S_i - G_i - G_i^T & G_i^T [A_s - L_s c]^T \\ [A_s - L_s c] G_i & -S_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_i - G_i - G_i^T & G_i^T A_s^T - G_i^T c^T L_s^T \\ A_s G_i - L_s c G_i & -S_j \end{bmatrix} < 0 \quad (3.10)$$

Pour découpler la non linéarité du terme $L_i c G_i$, nous appliquons le changement de variable avec l'introduction d'une matrice auxiliaire U_i , où : $L_i c G_i = U_i c$.

L'inégalité (3.10) peut être écrite comme suit :

$$\begin{bmatrix} S_i - G_i - G_i^T & G_i^T A_i^T - c^T U_i^T \\ A_i G_i - U_i c & -S_j \end{bmatrix} < 0$$

Permettant la convergence de l'erreur d'estimation (CQFD).

□

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par présenter une étude de l'observabilité du système de trafic PWSL pour un tronçon de courte longueur, pour faciliter l'analyse. Ensuite, nous avons généralisé les résultats d'observabilité pour le cas général de l'évolution du trafic. Une approche de synthèse d'un observateur hybride a été élaborée, aussi dans ce chapitre, pour l'estimation des données de trafic en se basant sur le modèle de PWSL. L'idée principale de la première contribution est d'appliquer les notions d'automatique dans le domaine de transport à travers l'utilisation d'un observateur hybride pour l'estimation des données de trafic. La deuxième contribution concerne les conditions de convergence afin d'assurer la bornitude de l'erreur d'estimation où nous introduisons la fonction quadratique piecewise Lyapunov pour garantir la convergence et la stabilité de l'erreur ainsi que la décroissance de la fonction de Lyapunov. Ces conditions ont été exprimées sous forme des LMIs. Les résultats de l'estimation des données de trafic seront présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Applications et discussions des résultats

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de modélisation, de calibrage, de validation du modèle de PWSL et d'estimation des données de trafic. Ces résultats seront validés en utilisant l'abondance des données de trafic fournies par la base des données PeMS du système de mesure de performances de l'état de Californie des Etats Unis. Dans cette partie de thèse, nous présentons, en premier temps, un aperçu général sur la base des données PeMS. Ensuite, nous exposons la description du tronçon choisi pour la validation des résultats. La section d'étude est un tronçon des autoroutes de Californie contenant les trois types de connexion entre les cellules, à savoir une connexion simple (pas de rampes entre les cellules), une connexion convergente (l'existence d'une rampe d'accès) et une connexion divergente (l'existence d'une rampe de sortie).

En outre, pour la validation du modèle proposé dans cette thèse, nous utilisons les résultats de calibrage obtenus par l'application de la méthodologie présentée dans le chapitre 2. Ensuite, nous exposons les résultats d'estimation des données de trafic en appliquant l'approche de l'observateur hybride montré dans le chapitre 3. La validation de cette approche sera réalisée par le calcul des gains de l'observateur hybride obtenu par la résolution des LMI.

4.2 Système de mesure du performances PeMS

Le système de mesure des performances (Performance Measurement System PeMS) est un système d'archivage des données de trafic utilisé dans l'état de Californie [Chen 01]. Il a été lancé en 1988 comme un projet de collaboration entre l'université de Berkeley et les deux centres de transport de la Californie, PATH et Caltrans [Dervisoglu 12]. Ce système recueille des données en temps réel de plus de 25000 détecteurs (depuis 2012), couvrant plusieurs autoroutes situées dans les grandes régions métropolitaines de la Californie.

Dans le cadre du projet PeMS, la normalisation de la collection des données et les outils d'analyse ont été créés et fonctionnent sur des données brutes collectées à partir des boucles de détections des autoroutes de la Californie. D'autres données provenant aussi d'autres sources comme la pesée dans les stations de mouvement, les lecteurs d'étiquettes, les CHP (California Highway Patrol) et les flux d'incidents,

sont également regroupées dans ce système. Les données collectées sont filtrées, traitées et stockées dans des bases de données, qui sont accessibles par les utilisateurs et qui remontent à 1998. Ces données sont utilisées pour calculer les mesures de performances des autoroutes ainsi que l'accès aux conditions de circulation à la fois historiquement et en temps réel. PeMS a été largement utilisé par les ingénieurs du trafic, les planificateurs, les services d'information aux voyageurs ainsi que des universitaires [Muralidharan 12, Munoz 04].

Le PeMS reçoit des mesures d'occupation et des valeurs de débit toutes les 30 secondes des stations de détection des véhicules (Vehicle Detector Stations VDS) qui abritent les boucles de détection. De plus, il reçoit des mesures de la vitesse et la longueur moyenne des véhicules ($g - factor$) en utilisant deux boucles de détection. Le PeMS agrège les données dans des intervalles de 5 minutes, et estime également la vitesse des véhicules pour les boucles simples grâce à l'utilisation de $g - factor$ [Zhanfeng Jia 01]. Le PeMS élabore les mesures de diagnostic pour déterminer le fonctionnement du détecteur et la qualité des données. Il a également un algorithme d'imputation, qui remplit les données manquantes avec des valeurs plausibles. Enfin, ces données sont utilisées pour calculer des mesures de performance agrégés, y compris les miles des véhicules parcourus VMT (Vehicle Miles Traveled), les heures parcourues par un véhicule VHT (Vehicle Hours Traveled), le retard de congestion, et le ratio de productivité Q (rapport de VMT sur VHT) interprété comme la vitesse moyenne dans la région d'analyse. Une liste partielle des types de données directement disponibles à partir de PeMS est montrée dans le tableau 4.1 [Munoz 04].

TABLE 4.1 – Les mesures des boucles de détection disponible directement de PeMS

Nom	Unité	Intervalle de temps	Emplacement
Occupation	adimensionnelle	30 sec et 5 min	ML, HOV, OR, FR
Volume	Véhicules	30 sec et 5 min	ML, HOV, OR, FR
Débit	Véhicules/Heures	5 min	ML, HOV
Vitesse	Milles/Heures	5 min	ML, HOV
$g - factor$	pieds	5min	ML, HOV

avec : ML (mainline) est l'abréviation de la route principale, HOV (high-occupancy vehicle lane) est la ligne de haute occupation des véhicules, OR (On-Ramp) est la

rampe d'accès et FR (Off-Ramp) est la rampe de sortie.

La vitesse, le débit et la densité peuvent être aussi calculées par les formules suivantes [Munoz 04, Dervisoglu 12, Zeroual 15] :

$$Vitesse = \frac{Débit}{Occupation} \times (g - factor) \quad (4.1)$$

$$Densité = \frac{Débit}{Vitesse} \quad (4.2)$$

$$Débit = \frac{Volume}{30 \text{ sec}} \times (3600 \text{ sec/heure}) \quad (4.3)$$

Les mesures moyennes de 5 minutes ont été interpolées avec une interpolation d'ordre zéro jusqu'à 30 secs, afin de faciliter le calcul et la comparaison directe avec des données de trafic[Gomes 04].

4.3 Validation du modèle PWSL du trafic par des données réelles.

4.3.1 Description géométrique du tronçon choisi pour la validation

Pour la validation du modèle de PWSL, nous utilisons des données réelles fournies par la base PeMS de Californie. Tout d'abord, et avant de procéder au calibrage et à l'identification des paramètres macroscopiques du modèle, nous présentons dans cette partie une description détaillée du tronçon choisi pour cette application.

Le tronçon d'étude est une partie d'autoroute de SR60-E de l'est de l'état de Californie des Etats Unis. Ce tronçon de quatre voies est de 1,73 miles, il présente l'existence d'une variation des connexions, simple, convergente (ON-Ramp) et divergente (Off-Ramp). Il commence de la ville de San Antonio et se termine à la ville de Grove, la rampe d'accès et la rampe de sortie se positionnent à la ville d'Euclide (Figure 4.1).

Ce tronçon d'autoroute est spécialement choisi à cause de l'apparition des périodes de congestion intéressantes qui peuvent nous aider à tester l'efficacité du



FIGURE 4.1 – Position du tronçon de SR60-E sur la carte des autoroutes du Californie

modèle PWSL. De plus, il est équipé par des boucles magnétiques, nécessaires pour la collecte des données, intégrées dans les rampes et les grandes lignes. Ce tronçon est divisé en quatre cellules (Figure 4.2), respectant les conditions de Courant–Friedrichs–Lewy, où chaque cellule est équipée d’un VDS qui permet de faciliter la comparaison des résultats de simulation avec les données réelles du trafic.

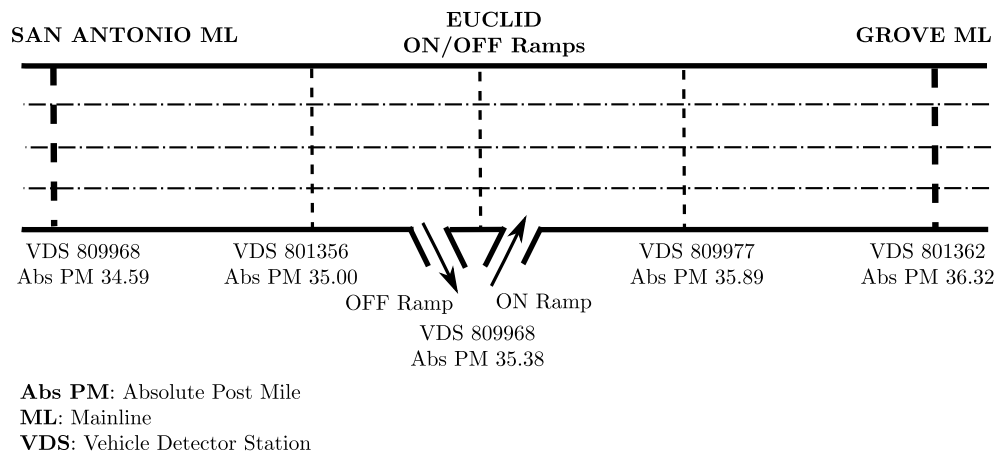


FIGURE 4.2 – La représentation schématique du tronçon d’autoroute de SR60-E de la Californie

4.3.2 Résultats de calibrage

Après la description géométrique du tronçon choisi pour la validation du modèle, nous exploitons, dans cette section, l’abondance des données réelles fournies par le site de la base des données PeMS. Nous utilisons les données brutes des VDSs obtenues avec une période d’échantillonnage de 5 minutes, recueillies en 98 jours

(équivalent à 28225 points de données), afin de garantir que le nombre suffisant de données, correspondant à l'état de la circulation congestionnée, soit utilisé. Pour plus de précision, nous considérons que chaque cellule a sa propre FD et nous prenons en considération le fonctionnement des détecteurs (99% de la fonctionnalité au cours de cette période). Les débits et les vitesses ont été fournis directement par les VDSs à travers la base PeMS. Par contre, les mesures des densités sont déduites en utilisant l'équation (4.2).

En utilisant la méthodologie de calibrage proposée dans le chapitre 2, nous obtenons les résultats d'identification des paramètres du diagramme fondamental pour chaque cellule du tronçon choisi. Ces résultats sont résumés dans le tableau suivant :

TABLE 4.2 – Résultats de calibrage et d'identification des paramètres du DF pour l'autoroute SR60-E

VDS	Longueur(<i>mile</i>)	v_f (<i>mile/h</i>)	w (<i>mile/h</i>)	ρ_c (<i>veh/mile</i>)	Q_M (<i>veh/h</i>)	ρ_{jam} (<i>veh/mile</i>)
809968	0,41	59,0323	25,9709	25,8819	1527	84,8161
801356	0,38	53,9681	26,4288	31,7438	1686	95,5007
801358	0,51	56,4373	16,6045	30,7691	1664,5	130,4298
809977	0,43	54,8030	17,6371	34,0653	1833	138,0098

4.3.3 Validation de PWSL et discussions des résultats de simulation

Afin de valider le modèle de la circulation PWSL, en utilisant les résultats de calibrage obtenu dans la partie précédente, nous présentons ici la dynamique de la densité pour le tronçon choisi avec ses différentes connexions, comme illustrée dans les Figures 4.1 et 4.2. Nous utilisons les données de mesure réelles du 15/05/2012 de 00 :00 à 23 :55. Ces données ont été recueillies avec un temps d'échantillonnage de 5 minutes et ré-échantillonnées avec un pas de 25 secondes afin de garantir la stabilité numérique de résolution du modèle PWSL.

Comme décrit ci-dessus, le tronçon partitionné en quatre cellules (figure 4.2) est traduit par un modèle de trafic PWSL de huit modes ($s = 8$) avec les trois configurations ; configuration simple, configuration convergente et configuration divergente (voir Chapitre 2).

La dynamique de la densité dans le tronçon choisi est représentée sur la Figure 4.3 où l'évolution de la densité est illustrée cellule par cellule sur une plage de

4.3 Validation du modèle PWSL du trafic par des données réelles.

24 heures. Les résultats obtenus montrent que les données simulées chevauchent beaucoup avec celles ré-échantillonnées. On peut également remarquer que l'erreur relative augmente pour certaines périodes et en particulier dans la première et la dernière cellule du tronçon. Ceci peut être expliqué par la présence de certaines données de valeurs aberrantes qui provoquent des erreurs dans l'estimation de la dynamique discrète et continue. Ce problème est également amplifié du fait de l'utilisation des données ré-échantillonnées. Notons ici que, malgré ces erreurs, les résultats obtenus sont encore meilleurs par rapport à ceux obtenus avec d'autres modèles de trafic.

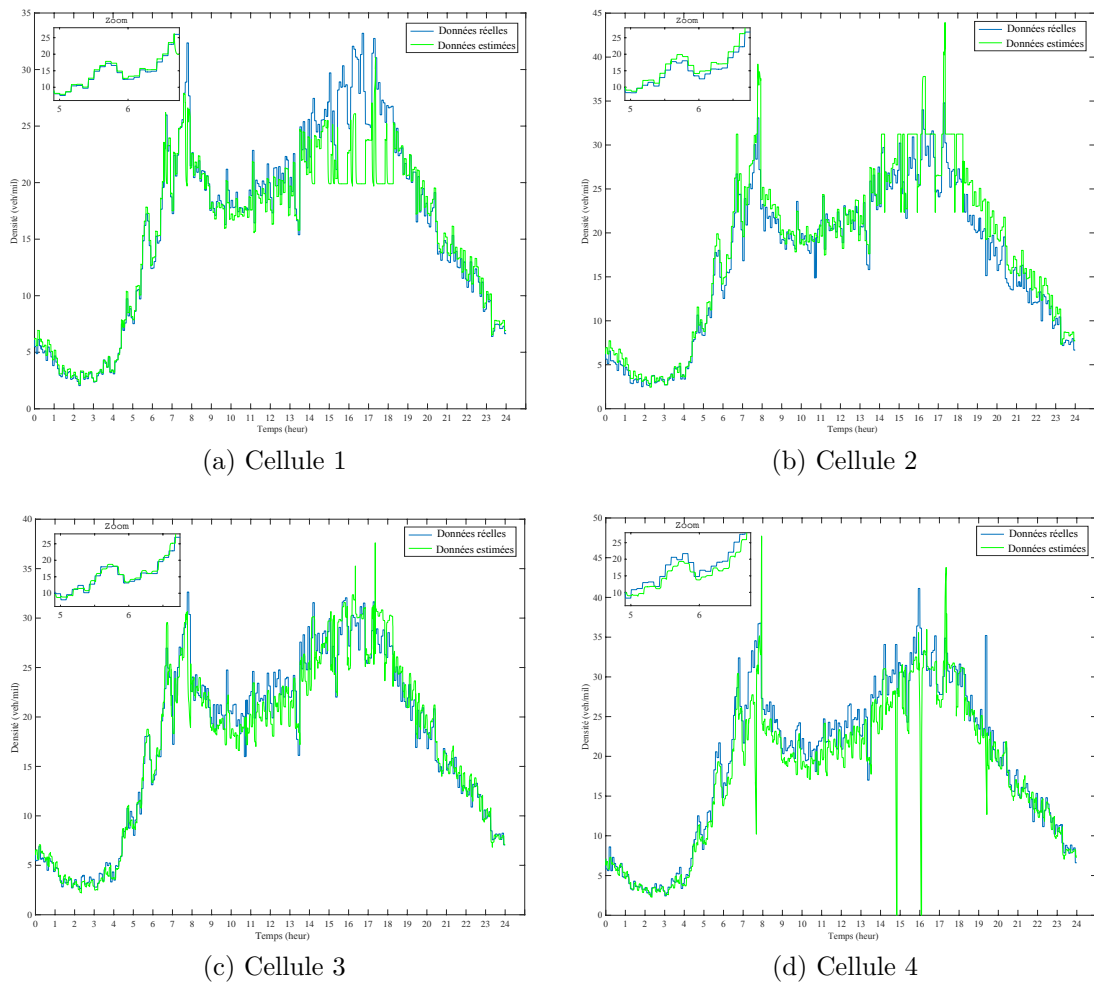


FIGURE 4.3 – Estimation de densité utilisant les données ré-échantillonnées du tronçon SR60-E

D'autre part, les figures 4.4 représentent les résultats de simulation obtenus après

l'agrégation de celles fournies par le modèle, avec un temps d'échantillonnage de 25 secondes. L'objectif ici est de comparer les résultats simulés avec les données réelles obtenues sur une période de 5 minutes. Cette comparaison montre que l'erreur de comparaison diminue et que les densités fournies par le modèle PWSL représentent la même dynamique que les données réelles, et ceci est similaire pour la partie discrète.

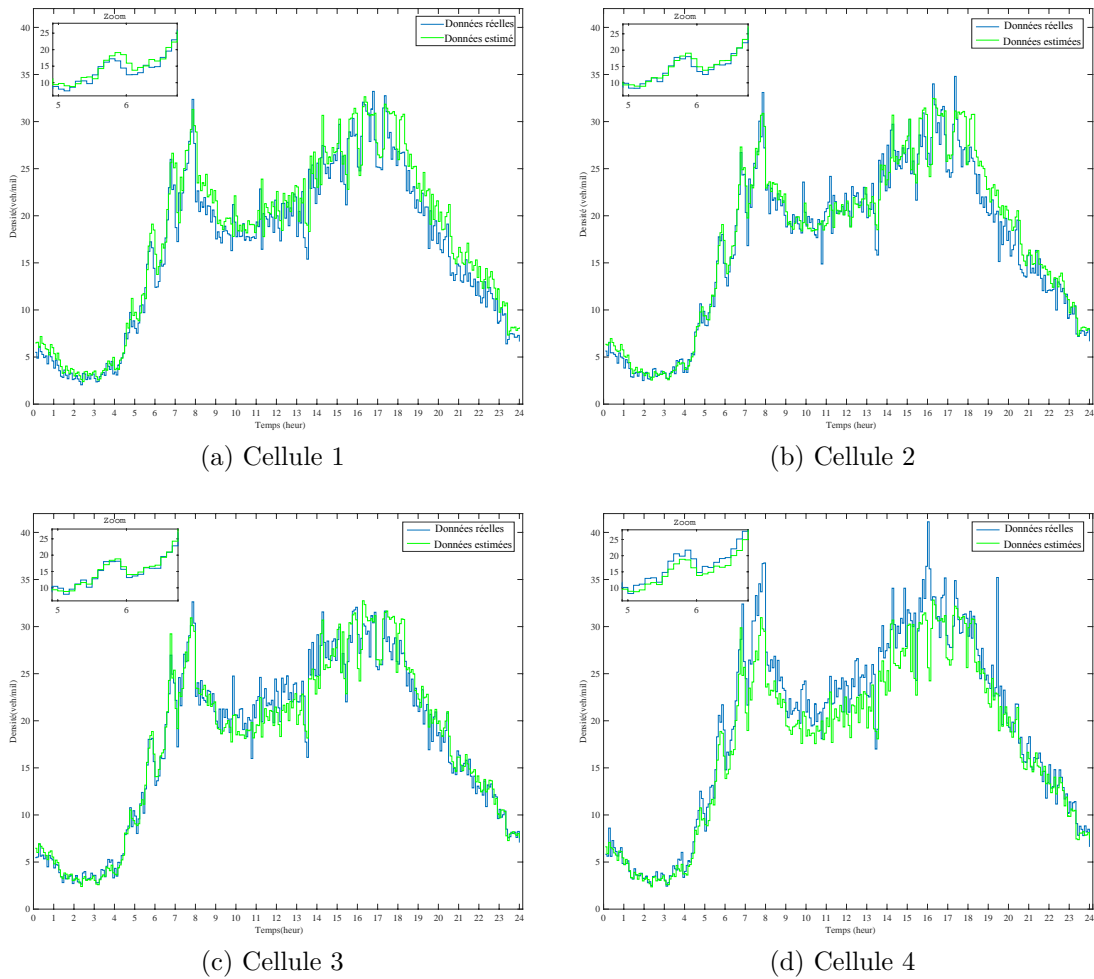


FIGURE 4.4 – La densité estimée et mesurée du tronçon SR60-E

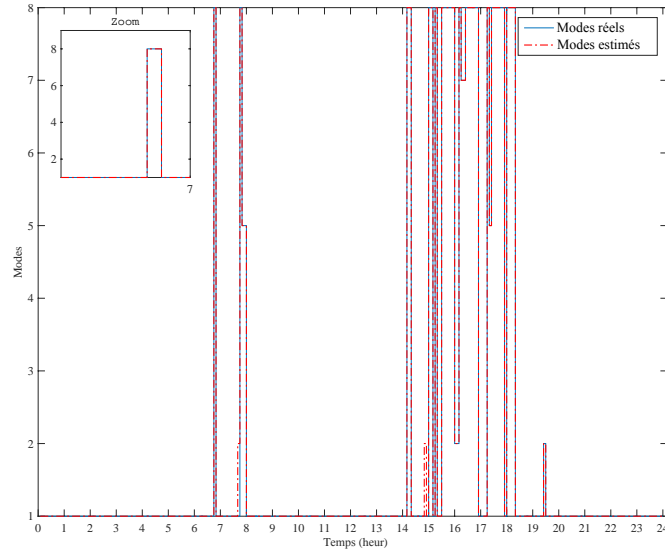


FIGURE 4.5 – Evolution des modes discrets

Notons également que le calcul de pourcentage de l'erreur moyenne donnée par (4.4), indiquent une erreur relative moyenne et un pourcentage moyen d'erreur [Zeroual 17] représentés sur le tableau 4.3.

$$M.E = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left| \frac{\rho_r(k) - \hat{\rho}(k)}{\hat{\rho}(k)} \right| \quad (4.4)$$

où, $\rho_r(k)$ est la densité mesurée à l'instant k et $\hat{\rho}(k)$ est la densité estimée à l'instant k .

TABLE 4.3 – L'erreur relative moyenne

Tronçon	Erreur relative moyenne (%)				Pourcentage Moyen (%)
	Cellule 1	Cellule 2	Cellule3	Cellule 4	
SR60-E	6.7	8	7.7	10.3	8.1

Même en présence des bruits de mesure des données réelles, le modèle PWSL présente une bonne estimation et reconstruction de la dynamique de la densité du tronçon choisi.

4.4 Résultats d'estimation des données de trafic

Pour la validation de l'approche d'observateur hybride développée dans le chapitre 3 pour notre système du trafic, nous considérons le tronçon SR60-E déjà calibré et validé dans la partie précédente, en utilisant les données réelles de la même journée.

Pour la conception d'observateur hybride, considérons tout d'abord les conditions initiales sur l'état continu et l'état discret ; l'état initial de l'observateur a pour valeur $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$, et l'observateur est initialement en mode fluide (mode 1). La sortie d'observateur est donnée par :

$$\hat{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{\rho} \quad (4.5)$$

Les gains d'observateur, pour chaque mode sont obtenus par la résolution des LMI présentés dans le chapitre 3 avec les paramètres calibrés, sont :

$$L_1 = \begin{bmatrix} 0.0066 & 1.0718 & 0.0063 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0208 & 0.1149 \end{bmatrix}^T ;$$

$$L_2 = \begin{bmatrix} 0.0066 & 1.0718 & 0.0063 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0208 & 0.1149 \end{bmatrix}^T ;$$

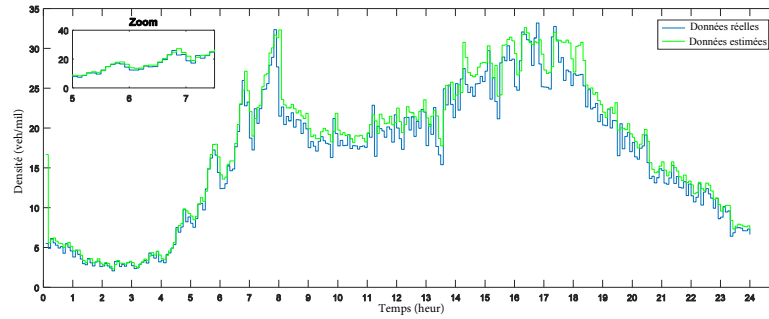
$$L_5 = \begin{bmatrix} 0.4788 & 0.2251 & -0.0219 & 0.0074 \\ 0 & 0.0532 & 0.3854 & 0.6664 \end{bmatrix}^T ;$$

$$L_6 = \begin{bmatrix} 0.4788 & 0.2219 & -0.0267 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1149 \end{bmatrix}^T ;$$

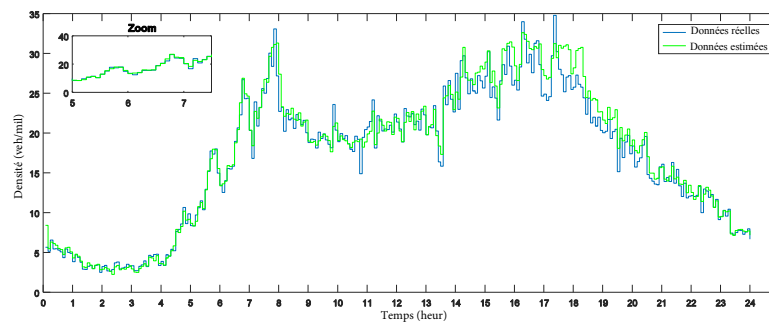
$$L_7 = \begin{bmatrix} 0.4788 & 0.2305 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0287 & 0.1149 \end{bmatrix}^T ;$$

$$L_8 = \begin{bmatrix} 0.4788 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0002 & 0.0208 & 0.1149 \end{bmatrix}^T$$

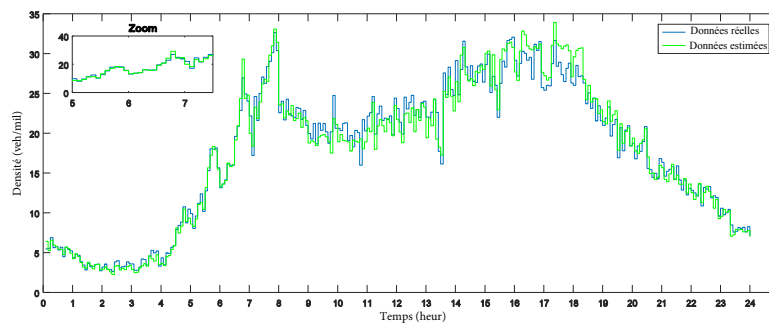
Suivant l'hypothèse du travail, nous considérons que les modes observables et les modes non observables ne sont pas pris en considération et nous laissons la reconstruction de la dynamique de ces modes à la dynamique du modèle de PWSL. Les gains de l'observateur dans ces modes sont nuls. En introduisant les gains obtenus et en respectant les hypothèses de travail, nous obtenons les résultats d'estimation de la densité du trafic et les modes de fonctionnement. Ces résultats sont présentés dans les figures suivantes :



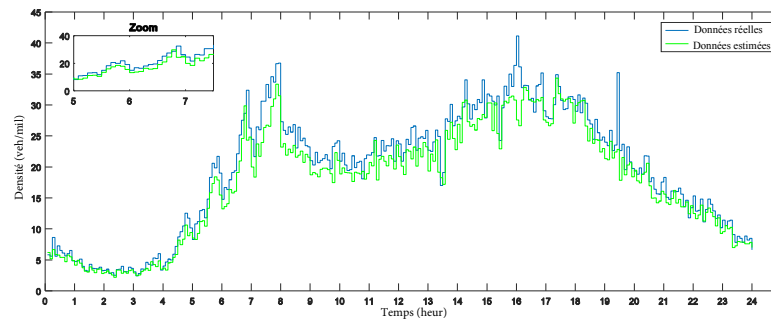
(a) Densité estimée pour la cellule 1



(b) Densité estimée pour la cellule 2



(c) Densité estimée pour la cellule 3



(d) Densité estimée pour la cellule 4

FIGURE 4.6 – Résultats d’estimation de l’évolution de la densité du tronçon SR60- E

Une fois les densités estimées sont obtenues, les états de la circulation (modes discrets) seront identifiés par les stratégies données ci-dessus (Chapitre 3). La Figure 4.6 et la Figure 4.7 décrivent respectivement les résultats d’estimations continues et discrètes pour chaque cellule du tronçon SR60-E choisi.

Ces figures montrent que la densité estimée converge vers la densité réelle avec une erreur faible dans les diverses périodes de temps comme illustré dans le zoom de chaque figure. Cette erreur peut être expliquée par la présence de certaines données de valeurs aberrantes.

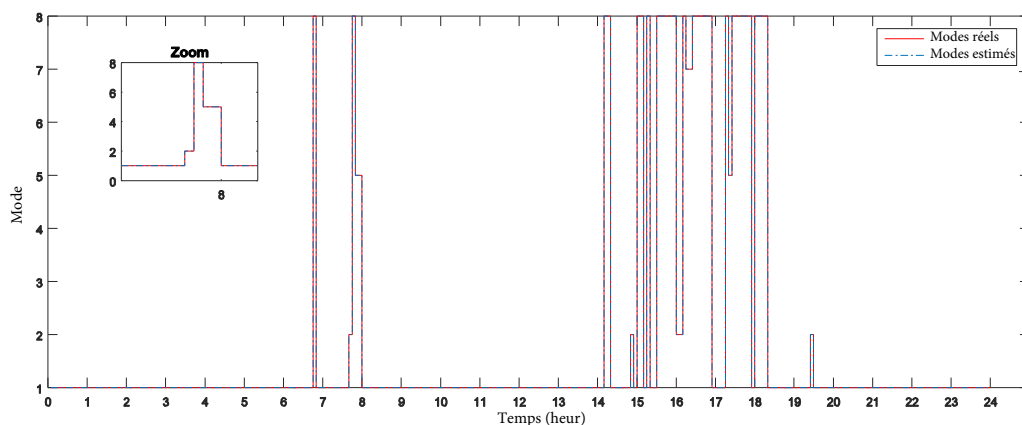


FIGURE 4.7 – Résultats d’estimation de mode de fonctionnement de PWSL sur SR60-E

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation concernant la validation du modèle de PWSL et l'application de l'approche d'estimation hybride des données de trafic à travers le modèle de PWSL en utilisant les données réelles fournies par PeMS. Tout d'abord, nous avons présenté un aperçu général sur la base des données PeMS, ensuite nous avons présenté la validation du modèle PWSL.

Dans cette section, nous avons exposé les phases de validation en commençant par la description du tronçon choisi, ensuite les résultats de calibrage et finalement la validation par les données réelles fournies par la base des données PeMS. Ces résultats sont bien discutés et interprétés par le calcul des pourcentages des erreurs relatives moyennes.

Enfin, nous avons présenté les résultats d'estimation des données de trafic sur le tronçon validé en utilisant des données réelles et les gains fournis par le calcul des LMI. Les résultats obtenus prouvent la robustesse de l'estimateur hybride synthétisé dans le chapitre précédent.

Conclusion et perspectives

Les travaux présentés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre des systèmes de Transport Intelligents (ITS) dont l'objectif est de développer une nouvelle approche de modélisation permettant de décrire la dynamique du flux de trafic tenant en compte des différents phénomènes du trafic. En outre, par la nature hétérogène de ces phénomènes, les notions des systèmes dynamiques hybrides sont introduites pour la création d'un modèle hybride macroscopique du trafic. De plus, le modèle proposé est utilisé pour la conception d'une stratégie d'estimation, où les observateurs hybrides sont adoptés pour la reconstitution des données de trafic tel que la densité et le débit.

Pour atteindre ces objectifs, un aperçu général sur la modélisation du trafic est présenté, dans lequel, les différentes techniques de mesure sont exposées, en outre, une classification bien détaillée des modèles de trafic existants dans la littérature sont exploités dans le domaine d'estimation et de la surveillance du trafic. Dans le cadre de cette thèse, une attention particulière a été portée aux modèles macroscopiques, où nous avons présenté une brève description des modèles macroscopiques de premier ordre, spécialement le modèle de CTM et le modèle de SMM.

D'un point de vue modélisation, un modèle du trafic hybride est proposé selon les concepts des systèmes hybrides. Ensuite, un modèle linéaire à commutation par morceaux (PWSL) de trafic est élaboré pas-à-pas en commençant par le principe de fonctionnement, la description du modèle, la description de la partie continue et la partie discrète du PWSL. Pour la validation de ce modèle, nous avons proposé une nouvelle méthodologie de calibrage des données de trafic afin d'identifier les paramètres macroscopique du modèle proposé.

Dans la suite de ce travail et afin de procéder à l'estimation des grandeurs du trafic, nous rappelons les notions classiques et les conditions nécessaires pour l'observabilité

d'un système linéaire qui serviront à l'analyse de l'observabilité du modèle PWSL d'un tronçon de quatre cellules. Les résultats généraux d'observabilité du modèle PWSL généralisé sont présentés et discutés. En outre, la description de fonctionnement de l'observateur hybride et sa synthèse pour le modèle de PWSL sont détaillées en présentant la méthodologie de reconstruction de l'état de trafic et l'estimation de la dynamique de la densité. Afin de calculer les gains de l'observateur hybride du PWSL, nous avons présenté les conditions LMI qui garantissent la stabilité de l'erreur d'estimation.

Enfin pour la validation de ce travail de thèse, des exemples d'application des stratégies développées (modélisation et estimation) sont exposées en utilisant des données réelles d'un tronçon autoroutier SR60-E des autoroutes de Californie. Ces données sont fournies par la base des données PeMS. En appliquant la méthodologie de calibrage développée, les résultats obtenus ont permis de valider et tester la robustesse du modèle PWSL pour le tronçon choisi. En outre, les grandeurs estimées issus de l'observateur hybride convergent vers les valeurs réelles de la densité du tronçon choisi ce qui vérifie et certifie la démarche de la stratégie d'estimation proposée dans cette thèse.

Bien que plusieurs contributions aient pu voir le jour grâce à ce travail de thèse, il est important de souligner qu'il reste encore beaucoup de pistes de recherche à exploiter dans le domaine de la surveillance, l'estimation et la commande du trafic routier. En effet, la complexité des systèmes de trafic routier impose de chercher d'autres solutions "innovantes" pour mieux améliorer leur représentation et leur gestion.

Par rapport aux différentes approches proposées dans cette thèse, les résultats obtenus sont en général efficaces. Au niveau de la modélisation, le modèle proposé peut être utilisé d'une façon modulaire pour décrire la dynamique du trafic dans n'importe quelle configuration des autoroutes, il peut aussi servir pour la description de la dynamique de la densité dans les réseaux urbains et la synthèse des stratégies de commande. Au niveau de la surveillance et de la reconfiguration, la stratégie d'estimation proposée peut être intégrée pour le développement des algorithmes de surveillance en se basant uniquement sur le modèle de fonctionnement normal du système, qui exploitent l'ensemble des variables de trafic et qui exigent un nombre réduit de capteurs.

Bibliographie

- [Alessandri 01] A Alessandri & P Coletta. *Design of Luenberger Observers for a Class of Hybrid Linear Systems*. Hybrid Systems : Computation and Control, pages 7–18, 2001. [www](#)
- [Anderson 15] Leah Adrian Anderson. *Data-Driven Methods for Improved Estimation and Control of an Urban Arterial Traffic Network*, 2015.
- [Antsaklis 93] P J Antsaklis, M D Lemmon & J A Stiver. *Hybrid system modelling and event identification*. Rapport technique, Technical report of the ISIS Group at the University of Notre Dame ISIS-93-002, Notre Dame, IN, USA, 1993.
- [Aw 00] A. Aw & M. Rascle. *Resurrection of "Second Order" Models of Traffic Flow*. SIAM Journal on Applied Mathematics, vol. 60, no. 3, pages 916–938, jan 2000. [www](#)
- [Awasthi 04] Anjali Awasthi. *Développement d'un système de routage hiérarchique pour les réseaux urbains*. PhD thesis, 2004.
- [Balluchi 02] Andrea Balluchi, Luca Benvenuti, Maria D Di Benedetto & Alberto L Sangiovanni-Vincentelli. *Design of Observers for Hybrid Systems*. pages 76–89. Springer Berlin Heidelberg, 2002. [www](#)
- [Bando 95] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata & Y. Sugiyama. *Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation*. Physical Review E, vol. 51, no. 2, pages 1035–1042, feb 1995. [www](#)

- [Bar-Gera 10] Hillel Bar-Gera. *Proper Presentation of Flow-Speed-Density Plots of Large Data Sets*. Journal of Transportation Engineering, vol. 136, no. 7, pages 689–690, jul 2010. [www](#)
- [Barbot 07] J P Barbot, H Saadaoui, M Djemaï & N Manamanni. *Nonlinear observer for autonomous switching systems with jumps*. Nonlinear Analysis : Hybrid Systems, vol. 1, no. 4, pages 537–547, 2007.
- [Belkhiat 11] Djamel Eddine Chouaib Belkhiat. *Diagnostic d'une classe de systèmes linéaires à commutations : approche à base d'observateurs robustes*, 2011.
- [Bellemans 02] T Bellemans, B De Schutter, B De Moor, B De, Tom Bellemans, Bart De Schutter & Bart De Moor. *Models for traffic control*. Journal A, vol. 43, pages 3–4, 2002.
- [Birouche 06] Abderazik Birouche. *Contribution sur la synthèse d'observateurs pour les systèmes dynamiques hybrides*. PhD thesis, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 2006.
- [Bitam 06] Melha Bitam & Hassane Alla. *L'outil Réseaux de Petri hybrides dans les réseaux de communication : dynamique des transmissions et étude de comportement*. Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA), vol. 40, pages 73–94, 2006.
- [Botma 81] H Botma. *Traffic Flow Models. State of the art report*. Rapport technique, 1981.
- [Boukas 06] El-Kébir Boukas. *Stochastic Switching Systems*. Control Engineering. Springer Science Business Media, Boston, MA, 2006. [www](#)
- [Bourdais 07] Romain Bourdais. *Une contribution à la modélisation et à la commande des systèmes non linéaires à commutation*. PhD thesis, {É}cole centrale de Lile, 2007.
- [Bourrel 03] Emmanuel Bourrel. *Modélisation dynamique de l'écoulement du trafic routier : du macro-*

-
- scopique au microscopique*. PhD thesis, l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2003.
- [Box 65] M.J. Box. *A new method of constrained optimization and a comparison with other methods*. Computer Journal, vol. 8, no. 1, pages 42–52, 1965.
- [Brackstone 99] Mark Brackstone & Mike McDonald. *Car-following : a historical review*. Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour, vol. 2, no. 4, pages 181–196, 1999.
- [Branicky 98] M S Branicky. *Multiple Lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems*. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 43, no. 4, pages 475–482, 1998.
- [Branston 76] David Branston. *Models of Single Lane Time Headway Distributions*. Transportation Science, vol. 10, no. 2, pages 125–148, may 1976. [www](#)
- [Brogliato 01] B Brogliato. *On the control of non-smooth complementarity dynamical systems*. Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 359, no. 1789, pages 2369–2383, 2001. [www](#)
- [Buckley 68] D. J. Buckley. *A Semi-Poisson Model of Traffic Flow*. Transportation Science, vol. 2, no. 2, pages 107–133, may 1968. [www](#)
- [Buisson 98] J Buisson & H Cormerais. *Descriptor Systems for the Knowledge Modelling and Simulation of Hybrid Physical Systems*. J. Européen des Systèmes Automatisés APII-JESA, vol. 32, no. 9-10, pages 1047–1072, 1998.
- [Canudas-De-Wit 12] Carlos Canudas-De-Wit, Luis Leon Ojeda & Alain Y. Kibangou. *Graph constrained-CTM observer design for the Grenoble south ring*. In IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), pages 197–202, 2012.

- [Cemerlic 15] Alma Cemerlic. *Continuum modeling of the deceleration transient state in stochastic traffic flow*. PhD thesis, The University of Tennessee at Chattanooga, 2015.
- [Champagnat 98] Ronan Champagnat. *Supervision des systèmes discontinus : définition d'un modèle hybride et pilotage en temps-réel*. PhD thesis, Toulouse 3, 1998.
- [Champion 03] Alexis Champion. *Mécanisme de coordination multi-agent fondé sur des jeux : Application à la simulation comportementale de trafic routier en situation de carrefour*. PhD thesis, Valenciennes, 2003.
- [Chandler 58] R. E. Chandler, R. Herman & E. W. Montroll. *Traffic Dynamics : Studies in Car Following*. *Operations Research*, vol. 6, no. 2, pages 165–184, 1958.
- [Chen 01] Chao Chen, Karl Petty, Alexander Skabardonis, Pravin Varaiya & Zhanfeng Jia. *Freeway Performance Measurement System : Mining Loop Detector Data*. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1748, pages 96–102, jan 2001. [www](#)
- [Chen 04] D. Chen, J. Zhang, S. Tang & J. Wang. *Freeway Traffic Stream Modeling Based on Principal Curves and Its Analysis*. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 5, no. 4, pages 246–258, dec 2004. [www](#)
- [Chen 10] Xiqun Chen, Qixin Shi & Li Li. *Location specific cell transmission model for freeway traffic*. *Tsinghua Science and Technology*, vol. 15, no. 4, pages 475–480, 2010.
- [Chung 07] Koohong Chung, Jittichai Rudjanakanoknad & Michael J. Cassidy. *Relation between traffic density and capacity drop at three freeway bottlenecks*. *Transportation Research Part B : Methodological*, vol. 41, no. 1, pages 82–95, 2007.

- [Cohen 90] Simon. Cohen. Ingénierie du trafic routier : éléments de théorie du trafic et applications. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1990.
- [Cohen 91] Simon. Cohen. Flow variables, Concise encyclopedia of traffic transportation systems. Pergamon Press, 1991.
- [Cohen 99] Simon Cohen. *Etude prospective dans le domaine du recueil de données du trafic*. Rapport technique, CERTU, 1999.
- [D. Harel, A. Pnueli, J. Schmidt 87] R Sherman D. Harel, A. Pnueli, J. Schmidt. *On the formal semantics of statecharts*. In Proceedings of Symposium on Logic in Computer Science, pages 55–64, 1987. [www](#)
- [Daganzo 94] Carlos F. Daganzo. *The cell transmission model : A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory*. Transportation Research Part B, vol. 28, no. 4, pages 269–287, 1994.
- [Daganzo 95a] Carlos F. Daganzo. *Requiem for second-order fluid approximations of traffic flow*. Transportation Research Part B : Methodological, vol. 29, no. 4, pages 277–286, 1995.
- [Daganzo 95b] Carlos F. Daganzo. *The cell transmission model, part II : Network traffic*. Transportation Research Part B : Methodological, vol. 29, no. 2, pages 79–93, 1995.
- [Daganzo 99] C F Daganzo. *THE LAGGED CELL-TRANSMISSION MODEL*. In 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, 1999.
- [David 94] René David & Hassane Alla. *Petri nets for modeling of dynamic systems. A survey*. Automatica, vol. 30, no. 2, pages 175–202, 1994.
- [De Larminat 96] Philippe De Larminat. *Automatique : commande des systèmes linéaires*. Hermès, 1996.
- [De Santis 03] Elena De Santis, Maria D Di Benedetto, Stefano Di Gennaro & Giordano Pola. *Design Hy-*

- brid Observer Design Methodology*. Rapport technique, 2003.
- [Dervisoglu 12] Gunes Dervisoglu. *Automatic Calibration of Freeway Models with Model-Based Fault Detection*, 2012.
- [Di Benedetto 05] M D Di Benedetto, S Di Gennaro & A D’Innocenzo. *Critical observability and hybrid observers for error detection in air traffic management*. Proceedings of the 20th IEEE International Symposium on Intelligent Control, ISIC ’05 and the 13th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED ’05, vol. 2005, no. 1, pages 1309–1314, 2005.
- [Drake 67] Joseph S Drake, Joseph L Schofer & Adolf D May Jr. *A Statistical analysis of speed density hypotheses*. Highway Research Record, no. 154, 1967.
- [Edie 74] L. C. Edie. *Flow theories in Traffic Science*. Wiley, New York, wiley edition, 1974.
- [El Hmam 06] Mohamed Said El Hmam. *Contribution à la modélisation et à la simulation hybride du flux de trafic*. PhD thesis, Université D’Artois, 2006.
- [Elloumi 96] Nacef Elloumi. *Modélisation et commande du trafic sur un corridor : application de la méthode LP*. PhD thesis, Université Paris XI Orsay, 1996.
- [Ezzine 89] Jejel Ezzine & A. H. Haddad. *Controllability and observability of hybrid systems*. International Journal of Control, vol. 49, no. 6, pages 2045–2055, jun 1989. [www](#)
- [Flaus 96] J M Flaus. *Modeling and analysis of hybrid dynamical systems : an introduction*. Journal européen des systèmes automatisés, vol. 32, no. 7-8, pages 797–830, 1996.
- [Forbes 58] T W Forbes, H J Zagorski, E L Holshouser & W A Deterline. *Measurement of Driver Reaction to Tunnel Conditions*. Highway Re-

-
- search Board Proceedings, vol. 37, pages 345–357, 1958.
- [Gazis 59] Denos C. Gazis, Robert Herman & Renfrey B. Potts. *Car-Following Theory of Steady-State Traffic Flow*. Operations Research, vol. 7, no. 4, pages 499–505, 1959.
- [Gning 11] Amadou Gning, Lyudmila Mihaylova & René K Boel. *Interval macroscopic models for traffic networks*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 12, pages 523–536, 2011.
- [Godunov 59] S. K. Godunov. *A difference method for numerical calculation of discontinuous solutions of the equations of hydrodynamics*. Matematicheskii Sbornik, vol. 89, no. 3, pages 271–306, 1959.
- [Gomes 04] Gabriel Gomes, Adolf May & Roberto Horowitz. *Calibration of VISSIM for a Congested Freeway*. California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH), no. March, page 36, 2004.
- [Gomes 06] Gabriel Gomes & Roberto Horowitz. *Optimal freeway ramp metering using the asymmetric cell transmission model*. Transportation Research Part C : Emerging Technologies, vol. 14, no. 4, pages 244–262, 2006.
- [Gomes 09] Gabriel Gomes & Roberto Horowitz. *Automatic Calibration of the Fundamental Diagram and Empirical Observations on Capacity*. Transportation Research Board, no. January, pages 1–14, 2009. [www](#)
- [Greenshields 35] B D Greenshields, J R Bibbins, W S Channing & H H Miller. *A STUDY OF TRAFFIC CAPACITY*. Highway Research Board Proceedings, vol. 14, 1935.
- [Grewal 76] Mohinder S. Grewal & Harold J. Payne. *Identification of Parameters in a Freeway Traffic Model*. IEEE Transactions on Systems, Man,

- and Cybernetics, vol. SMC-6, no. 3, pages 176–185, 1976. [www](#)
- [Guéguen 01] Hervé Guéguen & Marie Anne Lefebvre. *A comparison of mixed specification formalisms*. Journal Européen des Systemes Automatisés, vol. 35, no. 4, pages 381–393, 2001.
- [Gupta 06] A.K. Gupta & V.K. Katiyar. *Phase transition of traffic states with on-ramp*. Physica A : Statistical Mechanics and its Applications, vol. 371, no. 2, pages 674–682, 2006.
- [Gupta 13] Arvind Kumar Gupta. *A section approach to a traffic flow model on networks*. International Journal of Modern Physics C, vol. 24, no. 05, page 1350018, may 2013. [www](#)
- [Haddad 06] Wassim M Haddad, VijaySekhar Chellaboina & Sergey G Nersesov. *Impulsive and hybrid dynamical systems : stability, dissipativity, and control*. Numeéro April. Princeton University Press, 2006. [www](#)
- [Hai 14] Lin Hai & Panos J. Antsaklis. *Hybrid Dynamical Systems : An Introduction to Control and Verification*. Foundations and Trends® in Systems and Control, vol. 1, no. 1, pages 1–172, 2014. [www](#)
- [Haight 63] FA Haight. *Mathematical theories of traffic flow*. Academic Press, 1963.
- [Hamdi 09] Fatiha Hamdi, Nouredine Manamanni, Nadhir Messai & Khier Benmahammed. *Hybrid observer design for linear switched system via Differential Petri Nets*. Nonlinear Analysis : Hybrid Systems, vol. 3, no. 3, pages 310–322, 2009.
- [Hamdi 10] F Hamdi, N Messai & N Manamanni. *Observer based state feedback control design for switched linear systems : A differential petri net approach*. 2010 Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol), no. 2, pages 167–172, 2010. [www](#)

- [Helbing 96] Dirk Helbing. *Derivation and empirical validation of a refined traffic flow model*. Physica A : Statistical Mechanics and its Applications, vol. 233, no. 1, pages 253–282, 1996.
- [Helbing 97] Dirk Helbing. *Modeling multi-lane traffic flow with queuing effects*. Physica A : Statistical Mechanics and its Applications, vol. 242, no. 1-2, pages 175–194, aug 1997. [www](#)
- [Herrera 10a] Juan C. Herrera & Alexandre M. Bayen. *Incorporation of Lagrangian measurements in free-way traffic state estimation*. Transportation Research Part B : Methodological, vol. 44, no. 4, pages 460–481, 2010. [www](#)
- [Herrera 10b] Juan C. Herrera, Daniel B. Work, Ryan Herring, Xuegang (Jeff) Ban, Quinn Jacobson & Alexandre M. Bayen. *Evaluation of traffic data obtained via GPS-enabled mobile phones : The Mobile Century field experiment*. Transportation Research Part C : Emerging Technologies, vol. 18, no. 4, pages 568–583, 2010. [www](#)
- [Hidayat 10] Z Hidayat, Zs. Lendek, R Babuska & B De Schutter. *Fuzzy observer for state estimation of the METANET traffic model*. In 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, pages 19–24. IEEE, sep 2010. [www](#)
- [Hoogendoorn 98a] Serge Hoogendoorn & Piet Bovy. *Modeling Multiple User-Class Traffic*. Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board, vol. 1644, pages 57–69, jan 1998. [www](#)
- [Hoogendoorn 98b] Serge Hoogendoorn & Piet Bovy. *New Estimation Technique for Vehicle-Type-Specific Headway Distributions*. Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board, vol. 1646, no. 1, pages 18–28, jan 1998. [www](#)

- [Hoogendoorn 99] Serge P. Hoogendoorn. *Multiclass continuum modelling of multilane traffic flow*. PhD thesis, 1999.
- [Hoogendoorn 01] S. P. Hoogendoorn & P. H. L. Bovy. *State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of Systems and Control Engineering, vol. 215, no. 4, pages 283–303, jun 2001. [www](#)
- [Huber 57] Matthew J Huber. *Effect of Temporary Bridge on Parkway Performance*. Highway Research Board Bulletin, no. 167, pages 63–74, 1957.
- [Ibrir 09] Salim Ibrir. *Hybrid observer design for a class of nonlinear systems*. In Asian Control Conference, 2009. ASCC 2009. 7th, pages 142–147, 2009.
- [Iordanova 06] 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, 2006.
- [Jepsen 98] M Jepsen. *On the Speed-Flow Relationships in Road Traffic : A Model of Driver Behaviour*. In R Rysgaard, editeur, Third International Symposium on Highway Capacity, pages 561–585, Denmark, 1998. Danish Road Directorate.
- [Jia 01] Z Jia, C Chen & B Coifman. *The PeMS algorithms for accurate, real-time estimates of g-factors and speeds from single-loop detectors*. In In Intelligent Transportation Systems, 2001. Proceedings, pages 536–541. IEEE, 2001. [www](#)
- [Jiang 02] Rui Jiang, Qing-Song Wu & Zuo-Jin Zhu. *A new continuum model for traffic flow and numerical tests*. Transportation Research Part B : Methodological, vol. 36, no. 5, pages 405–419, 2002.
- [Johansen 97] Tor Arne Johansen & Roderick Murray-Smith. *Multiple Model Approaches to Modelling and Control*. Taylor and Francis, London, 1997.

- [Juloski 03] A.Lj. Juloski, W.P.M.H. Heemels, Y Boers & F Verschure. *Two approaches to state estimation for a class of piecewise affine systems*. 42nd IEEE International Conference on Decision and Control (IEEE Cat. No.03CH37475), vol. 1, no. December, pages 143–148, 2003. [www](#)
- [Juloski 04] Aleksander Ljiljana Juloski. *Observer design and identification methods for hybrid systems : Theory and experiments*. PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven (The Netherlands), 2004.
- [Karoui 11] Mohamed Karoui. *Surveillance des processus dynamiques événementiels*, 2011.
- [Kechida 07] Seham Kechida. *Synthèse des générateurs de résidus robustes pour la détection de défauts.*, 2007.
- [Klein 06] Lawrence a Klein, Milton K Mills & David R P Gibson. *Traffic Detector Handbook*, volume II. Federal Highway Administration, 2006. [www](#)
- [Kotsialos 02] A. Kotsialos, M. Papageorgiou, C. Diakaki, Y. Pavlis & F. Middelham. *Traffic flow modeling of large-scale motorway networks using the macroscopic modeling tool METANET*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 3, no. 4, pages 282–292, dec 2002. [www](#)
- [Kratz 03] F Kratz & D Aubry. *Finite memory observer for state estimation of hybrid system*. In Proceedings of the 15th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and safety of Technical Processes, pages 687–691, Washington DC, USA, 2003.
- [Kuhne 97] R Kuhne & P Michalopoulos. *Continuum flow models*. In Nathan H. G., Carroll J.M. & Ajay K., editeurs, *Traffic flow theory : A state of the art*. 1997. [www](#)

- [LECLERCQ 02] Ludovic LECLERCQ. *Modélisation dynamique du trafic et applications à l'estimation du bruit routier.*, 2002.
- [Lemarchand 10] Antoine Lemarchand, Damien Koenig & John J Martinez. *Robust design of a switched PI controller for an uncertain traffic model.* In 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), pages 2149–2154. IEEE, 2010.
- [Lemarchand 12] Antoine Lemarchand, J. J. Martinez & Damien Koenig. *Dynamical operating mode estimation for an on-ramp neighborhood under normal traffic conditions.* 2012 American Control Conference (ACC), no. 2, pages 6551–6556, 2012. [www](#)
- [Lesort 96] Jean-Baptiste. Lesort. *A car following model based on the Lighthill-Whitham theory.* In Transportation and traffic theory : proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, pages 517–538, Lyon, France, 1996. Pergamon.
- [Leutzbach 88] Wilhelm Leutzbach. *Introduction to the Theory of Traffic Flow.* Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1988. [www](#)
- [li Li 11] Li li Li, Jun Zhao & Georgi M Dimirovski. *Observer-based reliable exponential stabilization and H_{∞} control for switched systems with faulty actuators : An average dwell time approach.* Nonlinear Analysis : Hybrid Systems, vol. 5, no. 3, pages 479–491, 2011.
- [Li 05] Zhengguo Li, Yengchai Soh & Changyun Wen. *Switched and Impulsive Systems : Analysis, Design and Applications*, volume 313 of *Lecture Notes in Control and Information Sciences.* Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2005. [www](#)
- [Lighthill 55] M. J. Lighthill & G. B. Whitham. *On Kinematic Waves. II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads.* Proceedings of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical

-
- and Engineering Sciences, vol. 229, no. 1178, 1955.
- [Lin 09] H Lin & P J Antsaklis. *Stability and Stabilizability of Switched Linear Systems : A Survey of Recent Results*. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 54, no. 2, pages 308–322, 2009.
- [Lunze 09] Jan Lunze & Françoise Lamnabhi-Lagarrigue. *Handbook of Hybrid Systems Control Theory, Tools, Applications*. Cambridge University Press, 2009.
- [Lygeros 03] J Lygeros, K H Johansson, S N Simic & S S Sastry. *Dynamical properties of hybrid automata*. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 48, no. 1, pages 2–17, 2003.
- [Majid 14] Hirsh Majid. *Contribution à l'estimation et à la commande des systèmes de transport intelligents*. PhD thesis, 2014.
- [Mammar 07] Said Mammar. *Systèmes de Transport Intelligents, modélisation, information et contrôle*. Hermes Science Publications, 2007.
- [Messai 03] Nadhir Messai. *Surveillance du trafic urbain et interurbain à base de modèles neuronaux*. PhD thesis, Université de technologie de Belfort-Montbéliard et l'université de Franche Comte, 2003.
- [Mezyani 05] Touria El Mezyani. *Surveillance de Systèmes Hybrides*. PhD thesis, Université de Lille, 2005.
- [Michaels 63] R.M. Michaels. *Perceptual factors in car following*. In Proceedings of the Second International Symposium on the Theory of Traffic Flow, pages 44–59, Paris, 1963.
- [Michalopoulos 93] Panos G. Michalopoulos, Ping Yi & Anastasios S. Lyrintzis. *Continuum modelling of traffic dynamics for congested freeways*. Transportation Research Part B : Methodological, vol. 27, no. 4, pages 315–332, 1993.

- [Mignone 00] D. Mignone, G. Ferrari-Trecate & M. Morari. *Stability and stabilization of piecewise affine and hybrid systems : an LMI approach*. In Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.00CH37187), pages 504–509, 2000.
- [Mihaylova 06] Lyudmila Mihaylova, René Boel & A Hegyi. *An Unscented Kalman Filter for Freeway Traffic Estimation*. Journal of Chemical Information and Modeling, pages 31–36, 2006.
- [Mihaylova 07] Lyudmila Mihaylova, René Boel & Andreas Hegyi. *Freeway traffic estimation within particle filtering framework*. Automatica, vol. 43, no. 2, pages 290–300, 2007. [www](#)
- [Monamy 12] Thomas Monamy, Habib Haj-Salem & Jean-Patrick Lebacque. *A Macroscopic Node Model Related to Capacity Drop*. Procedia - Social and Behavioral Sciences, vol. 54, no. 1, pages 1388–1396, 2012. [www](#)
- [Morarescu 11] Irinel-Constantin Morarescu & Carlos Canudas-de Wit. *Highway traffic model-based density estimation*. In Proceedings of the 2011 American Control Conference, pages 2012–2017. IEEE, 2011. [www](#)
- [Morbidi 14] Fabio Morbidi, Luis Leon Ojeda, Carlos Canudas de Wit & Iker Bellicot. *A new robust approach for highway traffic density estimation*. In 2014 European Control Conference (ECC), pages 2575–2580. IEEE, 2014.
- [Morrish 80] D W Morrish. *Area traffic control in bordeaux : A contrast with british practice*. Traffic Engineering & Control, vol. 21, no. 8/9, 1980.
- [Moutari 07] Mahaman Salissou Mahaman Moutari. *Modélisation mathématique et numérique du trafic automobile*. PhD thesis, Université de Nice-Sophia Antipolis. Faculté des sciences, 2007. [www](#)
- [Munoz 03] L. Munoz, Xiaotian Sun Xiaotian Sun, R. Horowitz & L. Alvarez. *Traffic density estima-*

- tion with the cell transmission model.* Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003., vol. 5, pages 3750–3755, 2003.
- [Munoz 04] Laura Matiana. Munoz. *Macroscopic Modeling and Identification of Freeway Traffic Flow*, 2004. <https://catalog.hathitrust.org/Record/100905536>
- [Muñoz 06] Laura Muñoz, Xiaotian Sun, Roberto Horowitz & Luis Alvarez. *Piecewise-Linearized Cell Transmission Model and Parameter Calibration Methodology.* Transportation Research Record, vol. 1965, no. 1, pages 183–191, 2006.
- [Muralidharan 09] Ajith Muralidharan, Gunes Dervisoglu & Roberto Horowitz. *Freeway traffic flow simulation using the Link Node Cell transmission model.* In 2009 American Control Conference, pages 2916–2921. IEEE, 2009.
- [Muralidharan 12] Ajith Muralidharan. *Tools for modeling and control of freeway networks*, 2012.
- [Nagel 92] Kai Nagel & Michael Schreckenberg. *A cellular automaton model for freeway traffic.* Journal de Physique I, vol. 2, no. 12, pages 2221–2229, dec 1992. [www](#)
- [Nantes 16] Alfredo Nantes, Dong Ngoduy, Ashish Bhaskar, Marc Miska & Edward Chung. *Real-time traffic state estimation in urban corridors from heterogeneous data.* Transportation Research Part C : Emerging Technologies, vol. 66, pages 99–118, 2016. [www](#)
- [Nelder 65] J. A. Nelder & R. Mead. *A Simplex Method for Function Minimization.* The Computer Journal, vol. 7, no. 4, pages 308–313, jan 1965. [www](#)
- [Nelson 97] P Nelson, D D Bui & A Sopasakis. *A Novel Traffic Stream Model deriving from a Bimodal Kinetic Equilibrium.* In M Papageorgiou & A Pouliezios, editeurs, Transportation systems 1997 (TS'97) : a proceedings volume from

- the 8th IFAC/IFIP/IFORS symposium, Chania, Greece, 16-18 June 1997, pages 771–776, Chania, Greece, 1997.
- [Newell 55] G. F. Newell. *Mathematical Models for Freely-Flowing Highway Traffic*. Journal of the Operations Research Society of America, vol. 3, no. 2, pages 176–186, may 1955. [www](#)
- [Ngoduy 04] D. Ngoduy, S. Hoogendoorn & Henk Van Zuylen. *Comparison of Numerical Schemes for Macroscopic Traffic Flow Models*. Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board, vol. 1876, pages 52–61, jan 2004. [www](#)
- [Ould Bouamama 06] B Ould Bouamama, K Medjaher, A K Samantary & M Staroswiecki. *Supervision of an industrial steam generator. Part I : Bond graph modelling*. Control Engineering Practice, vol. 14, no. 1, pages 71–83, 2006.
- [Papageorgiou 90] Markos Papageorgiou, Jean-Marc Blosseville & Habib Hadj-Salem. *Modelling and real-time control of traffic flow on the southern part of Boulevard Peripherique in Paris : Part I : Modelling*. Transportation Research Part A : General, vol. 24, no. 5, pages 345–359, 1990.
- [Papageorgiou 98] Markos Papageorgiou. *Some remarks on macroscopic traffic flow modelling*. Transportation Research Part A : Policy and Practice, vol. 32, no. 5, pages 323–329, 1998.
- [Paveri-Fontana 75] S.L. Paveri-Fontana. *On Boltzmann-like treatments for traffic flow : A critical review of the basic model and an alternative proposal for dilute traffic analysis*. Transportation Research, vol. 9, no. 4, pages 225–235, aug 1975. [www](#)
- [Payne 71] Harold J Payne. *Models of Freeway Traffic and Control*. Mathematical Models of Public Systems, vol. 1, pages 51–61, 1971.
- [Payne 79] HAROLD J Payne. *FREFLO : A macroscopic simulation model of freeway traffic*. Transpor-

- tation Research Record, no. 722, pages 68–77, 1979.
- [Petreczky 15] Mihaly Petreczky, Aneel Tanwani & Stephan Trenn. *Observability of Switched Linear Systems*. In Mohamed Djemai & Michael Defoort, editeurs, Hybrid Dynamical Systems Observation and Control, chapitre 8, pages 205–240. Springer International Publishing, 2015. [www](#)
- [Pettersson 05] Stefan Pettersson. *Switched state jump observers for switched systems*. In IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), volume 16, pages 127–132, 2005.
- [Pipes 53] Louis A. Pipes. *An Operational Analysis of Traffic Dynamics*. Journal of Applied Physics, vol. 24, no. 3, page 274, 1953. [www](#)
- [Poole 12] A. Poole & A. Kotsialos. *METANET Model Validation using a Genetic Algorithm*. IFAC Proceedings Volumes, vol. 45, no. 24, pages 7–12, 2012.
- [Prigogine 71] I Prigogine & R Herman. *Kinetic Theory of Vehicular Traffic*, 1971.
- [Ramadge 87] P J Ramadge & W M Wonham. *Supervisory Control of a Class of Discrete Event Processes*. SIAM Journal on Control and Optimization, vol. 25, no. 1, pages 206–230, jan 1987. [www](#)
- [Reuschel 50] A Reuschel. *Vehicle Movements in a Platoon with Uniform Acceleration or Deceleration of the Lead Vehicle*. Zeitschrift des Oesterreichischen Ingenieur-und Architekten-Vereines, vol. 95, pages 73–77, 1950.
- [Richards 56] Paul I. Richards. *Shock Waves on the Highway*. Operations Research, vol. 4, no. 1, pages 42–51, feb 1956. [www](#)
- [Rondepierre 05] Aude Rondepierre. *Piecewise affine systems controllability and hybrid optimal control*. In In Proceedings of the 2005 International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, pages 1–6, 2005.

- [Ross 88] Paul Ross. *Traffic dynamics*. Transportation Research Part B : Methodological, vol. 22, no. 6, pages 421–435, 1988.
- [Schadschneider 06] Andreas Schadschneider. *Cellular automata models of highway traffic*. Physica A : Statistical Mechanics and its Applications, vol. 372, no. 1, pages 142–150, 2006.
- [Shorten 07] Robert Shorten, Fabian Wirth, Oliver Mason, Kai Wulff & Christopher King. *Stability Criteria for Switched and Hybrid Systems*. SIAM Review, vol. 49, no. 4, pages 545–592, 2007.
- [Smaili 12] Samia Smaili. *Modélisation et commande d'un système de trafic multimodal*. PhD thesis, 2012.
- [Sontag 81] E. Sontag. *Nonlinear regulation : The piecewise linear approach*. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 26, no. 2, pages 346–358, apr 1981. [www](#)
- [Spiliopoulou 14] A. Spiliopoulou, M. Kontorinaki, M. Papageorgiou & P. Kopelias. *Macroscopic traffic flow model validation at congested freeway off-ramp areas*. Transportation Research Part C : Emerging Technologies, vol. 41, pages 18–29, 2014.
- [Spiliopoulou 15] Anastasia Spiliopoulou, Ioannis Papamichail, Markos Papageorgiou, Ioannis Tyrinopoulos & John Chrysoulakis. *Macroscopic Traffic Flow Model Calibration Using Different Optimization Algorithms*. Transportation Research Procedia, vol. 6, pages 144–157, 2015.
- [Tanwani 13] Aneel Tanwani, Student Member & Hyungbo Shim. *Observability for Switched Linear Systems : Characterization and Observer Design*. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 58, no. 4, pages 1–14, 2013.
- [van der Schaft 00] Arjan van der Schaft & Hans Schumacher. An introduction to hybrid dynamical systems, volume 251 of *Lecture Notes in Control and Information Sciences*. Springer London, London, 2000. [www](#)

- [Van Hinsbergen 12] Chris P I J Van Hinsbergen, Thomas Schreiter, Frank S Zuurbier, J W C Van Lint & Henk J Van Zuylen. *Localized extended kalman filter for scalable real-time traffic state estimation*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 13, no. 1, pages 385–394, 2012.
- [Van Wee 13] Bert Van Wee, Jan Anne Annema & David Banister. *The transport system and transport policy : an introduction*. Edward Elgar Publishing, Inc, 2013.
- [Vergé 03] Michel Vergé & Daniel. Jaume. *Modélisation structurée des systèmes avec les bonds graphs*. Technip, 2003.
- [Vibert 97] D Vibert, C Valentin-Roubinet & E Niel. *A modelling method to take into account fluctuations of continuous variables in a class of hybrid system*. In European Control Conference, Brussels, Belgium., 1997.
- [Wainer 09] Gabriel a. Wainer. *Discrete-Event Modeling and A Practitioner ’ s Approach*. 2009. [www](#)
- [Wang 05] Yibing Wang & Markos Papageorgiou. *Real-time freeway traffic state estimation based on extended Kalman filter : a general approach*. Transportation Research Part B : Methodological, vol. 39, no. 2, pages 141–167, 2005. [www](#)
- [Wang 08] Yibing Wang, Markos Papageorgiou & Albert Messmer. *Real-time freeway traffic state estimation based on extended Kalman filter : Adaptive capabilities and real data testing*. Transportation Research Part A : Policy and Practice, vol. 42, no. 10, pages 1340–1358, 2008. [www](#)
- [Whitham 74] G. B. (Gerald Beresford) Whitham. *Linear and nonlinear waves*. Wiley, 1974.
- [Wiedemann 74] R Wiedemann. *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. Rapport technique, Institute for Traffic Engineering, University of Karlsruhe (German), German, 1974.

- [Work 10] D B Work, S Blandin, O P Tossavainen, B Piccoli & a. M Bayen. *A Traffic Model for Velocity Data Assimilation*. Applied Mathematics Research eXpress, vol. 2010, no. 1, pages 1–35, 2010. [www](#)
- [Xu 07] Jun Xu, Ai Poh Loh & Kai Yew Lum. *Observer-based Fault Detection for Piecewise Linear Systems : Continuous-time Cases*. In 2007 IEEE International Conference on Control Applications, pages 379–384. IEEE, oct 2007. [www](#)
- [Zaytoon 01] Janan. Zaytoon. *Systèmes dynamiques hybrides*. Hermès Science publications, 2001.
- [Zeroual 15] A. Zeroual, N. Messai, S. Kechida & F. Hamdi. *Calibration and validation of a switched linear macroscopic traffic model*. In 2015 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT), pages 1–5. IEEE, may 2015. [www](#)
- [Zeroual 17] A. Zeroual, Nadhir Messai, S. Kechida & F. Hamdi. *A Piecewise Switched Linear Approach for Traffic Flow Modeling*. International Journal of Automation and Computing, pages 1–13, 2017.
- [Zhanfeng Jia 01] Zhanfeng Zhanfeng Jia, Chao Chao Chen, B. Coifman & P. Varaiya. *The PeMS algorithms for accurate, real-time estimates of g-factors and speeds from single-loop detectors*. In ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No.01TH8585), pages 536–541. IEEE, 2001. [www](#)
- [Zhang 02] H.M. Zhang. *A non-equilibrium traffic model devoid of gas-like behavior*. Transportation Research Part B : Methodological, vol. 36, no. 3, pages 275–290, 2002.
- [Zheng 12] Jian Zheng, Koji Suzuki & Motohiro Fujita. *Evaluation of Car-following Models Using Trajectory Data from Real Traffic*. In Procedia

- [Zhong 16] - Social and Behavioral Sciences, volume 43, pages 356–366. Elsevier, 2012. [www](#)
- Renxin Zhong, Changjia Chen, Andy H. F. Chow, Tianlu Pan, Fangfang Yuan & Zhaocheng He. *Automatic calibration of fundamental diagram for first-order macroscopic freeway traffic models*. *Journal of Advanced Transportation*, vol. 50, no. 3, pages 363–385, apr 2016. [www](#)